

Dr. Rácz Pál¹ – Dr. Göbl Nándor² – Horváth Dániel³

ELEKTRODINAMIKUS MEGMUNKÁLÁSOK⁴

Az elektrodinamikus alakítás két típusa ismert; az elektromágneses alakítás, és az elektrohidraulikus alakítás. Az elektromágneses alakításnál a kondenzátortelepben tárolt energiát egy tekercsen keresztül sütik ki, így a tekercs és az alakítandó munkadarab közötti villamos kölcsönhatás eredményezi a munkadarab alakváltozását. Az elektrohidraulikus alakításnál a tárolt energiát szikraközön vagy fémhuzalon keresztül sütik ki és a kisütési folyamat által egy átvad közegben keltett lökéshullámok hatására alakváltozik a munkadarab. A cikk bemutatja az elektromágneses és az elektrohidraulikus alakítás alkalmazási területeit, külön figyelmet fordítva a repüléstechnikai alkalmazási lehetőségekre, mint például a cső alakú alkatrészek expanziós, vagy kompressziós alakítása, sík lemezek alakítása, kötési, szerelési műveletek elvégzése, nem-fémes anyagok aprítása.

ELECTRO-DYNAMIC FORMING PROCESSES

Electro-magnetic and electro-hydraulic forming are the two main types of electro-dynamic machining processes. In electro-magnetic forming the energy stored in the tank of capacitor has been discharged through a coil, and by the magnetic inter-action between the coil and the work-piece results plastic deformation of the work-piece. In electro-hydraulic forming the capacitor energy has been discharged on a spark gap between electrodes or on a metal wire, which is immersed into water with the work-piece. The electrical energy is converted into a pressure wave in the water which forms the work-piece into a die. Present article introduces the application fields of electro-magnetic and electro-hydraulic forming, paying special attention on the applications in aviation industry, like expansion or compression forming of tubes, sheet metal forming, joining and assembly operations, dis-integrations of non-metallic materials.

BEVEZETÉS

Az ipar igényeinek gyors fejlődése, új iparágak kialakulása jelentősen befolyásolták a gyártási eljárások fejlődését. A fő irányzat olyan munkadarabok gyártása, amelyek a konstrukciós igényeket csökkenő gyártási költségek és minimális anyagfelhasználás mellett elégítik ki. A képlékenyalakító eljárások ebből a szempontból igen nagy jelentőségűek, mivel olyan alakkövető előgyártmányokat készítenek, melyeken az utólagos megmunkálás minimális, sőt bizonyos esetekben további megmunkálásra nincs is szükség.

Több évtizedes fejlesztési munkával alakult ki az elektrodinamikusan alakítási eljárások pontos helye a képlékenyalakítások rendszerében, az eljárások felhasználási területe, pontos technológiája, a munkadarabok konstrukciós kialakítása és maga az elektrodinamikusan alakító berendezés.

A képlékenyalakító gépek munkavégző képességének növelése a mozgó tömegeknek, vagy azok sebességének növelésével valósítható meg. Az alakítási sebesség növelése a mozgó tömegek csökkentésével, vagy teljes elhagyásával járhat, továbbá olyan anyagok képlékenyala-

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, racz.pal@bgk.uni-obuda.hu

² S-Metalltech 98 Kft., nandor.gobl@smet.hu

³ S-Metalltech 98 Kft., daniel.horvath@smet.hu

⁴ Lektorálta: Dr. Réger Mihály egyetemi tanár, Óbudai Egyetem

kítása is lehetővé válik, amelyek a hagyományos alakítógépeken másként viselkednek.

A nagysebességű fémalakítási eljárások közös jellemzője, hogy a nagyobb alakítási sebességet koncentrált energiák impulzusszerű felszabadításával biztosítják. Az elektrodinamikusan alakítási eljárások esetében a szükséges mechanikai energiát kondenzátor telepek tárolják villamos energia formájában. Ezt a villamos energiát impulzusszerűen sütik ki, az elektromágneses eljárásnál egy, az alakítandó darabnak megfelelő tekercselrendezésen, az elektrohidraulikus alakítás esetében pedig egy átható közegben (legtöbbször vízben) elhelyezett szikraközön vagy huzalátkötésen keresztül.

A gépben tárolt energiát a kondenzátor telepek kapacitása és a töltési feszültsége határozza meg ($E = 1/2 CU^2$). Egy adott berendezés tárolt energiája a töltési feszültség beállításával fokozatmentesen szabályozható.

Az eljárás alkalmazhatóságát a munkadarab anyagszerkezeti és geometriai tulajdonságai szabják meg. Elektromágneses alakításra elsősorban alumínium, réz és azok ötvözetei alkalmasak. A kis villamos vezetőképességű, nagyszilárdságú anyagok csak igen rossz hatásfokkal alakíthatók. Az elektrohidraulikus eljárás felhasználását a vezetőképesség nem befolyásolja, és a jobb hatásfok folytán nagyobb szilárdságú, pl. acél, anyagok is jól alakíthatók.

A konstrukció kialakításánál tehát az alkalmazott fém mechanikai tulajdonságain kívül figyelembe kell venni az anyagok villamos vezető képességét is. Rendszerint már a gyártmányrajz elkészítés idején eldől, hogy az alkatrész elektrodinamikusan eljárással gyártható-e, vagy sem. Sok esetben a konstrukció változtatása nélkül is megvalósítható az eljárás bevezetése, más esetekben pedig a gyártmány módosítása is szükséges.

Az eljárásnál alkalmazott hatásmechanizmus megköveteli az alakítandó darab esetében a zárt alakzatot. Az alkalmazhatóság megítélésénél figyelembe kell tehát venni az alakítás jellegzetességeit, mint például mechanikus érintkezés nélküli impulzusszerű erőátadást (kivágás, lyukasztás), így az alakítandó anyag nem sérül, nem szennyeződik, lazább mérettűrések engedhetők meg.

A fejlesztő munka során kialakultak a fő alkalmazási területek:

1. csőalakú előgyártmány expanziós vagy kompressziós alakítása, kivágása, lyukasztása;
2. sík előgyártmány (lemez) viszonylag kis mélységű alakítása;
3. expanziós vagy kompressziós alakzáró kötésen alapuló szerelési művelet elvégzése csőalakú előgyártmány felhasználásával;
4. szerelési műveletek elvégzése sík (lemez) előgyártmány felhasználásával.

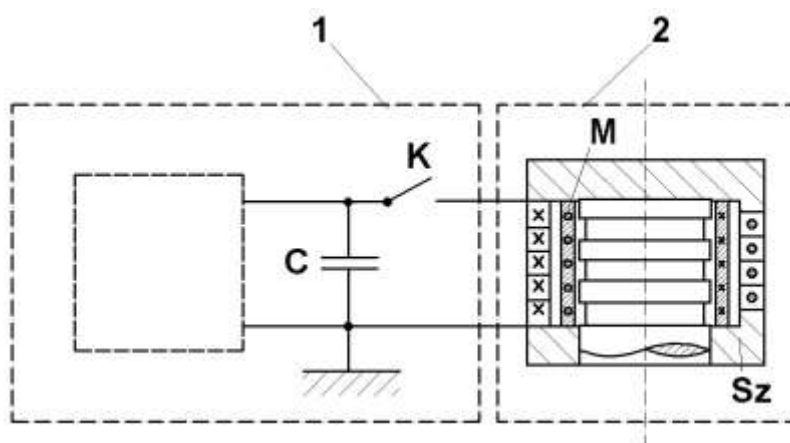
AZ ELEKTRODINAMIKUS ALAKÍTÓBERENDEZÉS ELVI FELÉPÍTÉSE

Az elektrodinamikusan fémalakítási eljárások esetében az adott méretű és anyagú előgyártmány alakításához szükséges mechanikai energiát kondenzátortelep tárolja villamos energia formájában. A feltöltött kondenzátortelepet az alakítási műveletre alkalmas szerszámon keresztül kisütve valósul meg az energiaátalakítás, amely a mechanizmusa szerint az elektromágneses és az elektrohidraulikus fémalakításra tagolható.

Az elektromágneses eljárás esetében (1. ábra) a szerszámelrendezés alakítótekercsén áthaladó áramimpulzus hatására a kialakuló mágneses tér közvetítésével a tekercs és az alakítandó

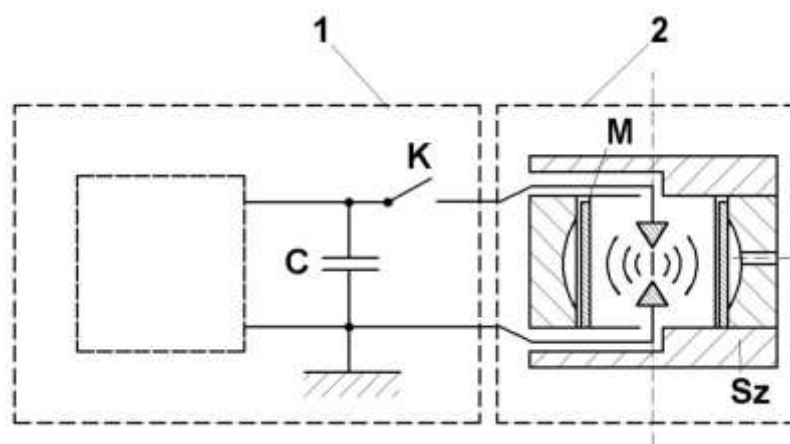
munkadarab között transzformátoros kapcsolat jön létre. Ennek következtében a megfelelő villamos vezetőképességgel rendelkező munkadarabban is áram alakul ki. A két áram kölcsönhatásaként a tekercs és a munkadarab között mechanikai erőhatás jön létre, és ez az erőhatás alakítja az előgyártmányt.

A tekercs és a munkadarab egymáshoz képest elfoglalt helyzete alapján megkülönböztethető meg síktekercses, hengeres kivitelű expanziós tekercsű és hengeres kivitelű kompressziós tekercssel ellátott szerszámelrendezést. A megmunkálendő előgyártmány meghatározott felületére, adott mértékű energiakonzentráció lehetősége is fennáll a különböző kialakítású térformáló elemek alkalmazásával.



1. ábra Az elektrodinamikus alakítás elvi vázlata
1-nagyáramú impulzusgenerátor, 2-alakítóegység,
C-kondenzátor, K-nagyáramú kapcsoló, M-munkadarab, Sz-szerszám

A megmunkálási folyamat hatásossága a berendezés impulzusgenerátorán és a szerszám tekercselésén áthaladó áramimpulzustól függ. Az áramimpulzus nagyságát és időbeni lefolyását az áramköri paraméterek határozzák meg, ezért a munkadarab villamos vezetőképessége is döntő jelentőségű. Így a megmunkálendő előgyártmány anyagára jellemző folyáshatár és fajlagos villamos vezetőképesség lesz az a két jellemző paraméter, amelynek alapján eldönthető, hogy az adott előgyártmány elektromágnesesen megmunkálható-e vagy sem.



2. ábra. Az elektrodinamikus alakítás elvi vázlata
1-nagyáramú impulzusgenerátor, 2-alakítóegység,
C-kondenzátor, K-nagyáramú kapcsoló, M-munkadarab, Sz-szerszám

Az elektrohidraulikus eljárás esetében (2. ábra) a szerszámelrendezés munkaterébe elektródák segítségével vezetjük be a villamos energiát. Az energiaátalakítási folyamat az elektródák közötti közvetlen ívkisüléssel, vagy a kisülési művelet kezdetekor szilárd vagy folyékony halmazállapotú vezető elgőzölögtetésével jön létre. A közvetlen vagy a közvetett ívkisüléssel előidézett lökéshullámok a folyékony vagy légnemű, vagy szemcsézetten szilárd vagy viaszhoz hasonló halmazállapotú közvetítőközeg segítségével alakítják a szerszámba helyezett előgyártmányt.

Az elektrohidraulikus fémalakítás esetén a berendezés impulzusgenerátorában lévő kondenzátortelep kisülésével előidézett áramimpulzus nagyságát és időbeni lefolyását az elektródák közötti "áthidalás" villamos paraméterei határozzák meg. A további energiaátalakítási folyamatot a lökéshullámot közvetítő közeg áramlástechnikai és az alakítandó előgyártmány képlékenységtani paraméterei határozzák meg.

Az elektrodinamikus fémalakító berendezés, mint szerszámgép villamosan két fő részből áll:

- a nagyáramú impulzusgenerátorból és
- az alakítási műveletre alkalmas szerszámelrendezésből.

Az impulzusgenerátorban található az energiatároló kondenzátortelep, a nagyfeszültségű tápegység, az energiaszint beállítását és kisütését végző automatika, a biztonsági- és kezelő elemek. A szerszámelrendezés kialakítása a technológiai művelettől függ, az előzőekben említettek szerint.

A szerszámelrendezés és az impulzusgenerátor munkaáramköre egy soros R-L-C kört alkot. Az elektrodinamikus fémalakítás módjától függően e rezgőkör paraméterei az alakítási művelet folyamán is változnak, így a kialakuló áramimpulzus időfüggvényének felírásakor ezt is figyelembe kell venni. Ennek alapján egy adott alakítási műveletre felírhatók azok a villamos és képlékenységtani differenciálegyenletek, amelyek számítógépes megoldása a folyamatra jellemző paraméterek időfüggvényeit eredményezi.

Az elektromágneses képlékenyalakítás tervezésénél az alakított munkadarab méretének, az alakítás mértékének, és az anyag alakulási szilárdságának függvényében kell meghatározni az alakítási energiát. Az eljárás paramétereit három fő csoportba lehet besorolni:

- gép paraméterek; kapacitás, belső ellenállás, belső induktivitás, rezgési frekvencia, töltési energia;
- tekercs, szerszám paraméterek; alak, méret, induktivitás, tekercs anyaga, az alakító szerszám anyaga, alakja;
- munkadarab paraméterek; alak, elektromos vezetőképesség, szilárdsági és képlékenységi tulajdonságok.

Az alakítási energia meghatározása érdekében ismerni kell az alakítandó darab, alakítás előtti és utáni geometriai méretet, az anyagra jellemző alakítási szilárdságot és a berendezés villamos adatait. Az alakítandó alkatrész, a számítás egyszerűsítése érdekében, elemi részekre bontható és ezekre az elemi részekre egyenként lehet az alakítási energiát, vagyis az alakítás ideális munkáját meghatározni:

$$E_{alx} = V_x \cdot k_{fx} \cdot \lambda_x \quad (1)$$

ahol

- E_{alx} a x -edik elem alakítási energiája;
- V_x az elemi rész alakítandó térfogata;
- k_{fx} az alakítandó elemek anyagára jellemző alakítási szilárdság;
- λ_x az elemi rész alakításának mértéke.

A több elemre bontott alkatrész esetén az alakítási műveletre fordítandó teljes energia a rész energiák összege lesz, azaz

$$E_{al} = \sum_1^n E_{alx} \quad (2)$$

Az így kiszámított energiának azonban a többszörösét kell a berendezés kondenzátor telepében felhalmozni, mert a villamos energiának mechanikai munkává alakítása, a berendezés felépítésétől és a szerszám szerkezetétől és így a hatásfoktól függően veszteségekkel jár.

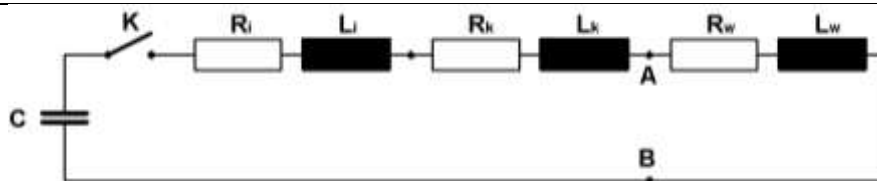
A gyakorlati tapasztalatok alapján az energia átalakításának hatásfoka 5-10%-os, ha a tekercs és a munkadarab közé térformálót iktatnak be, akkor csak 2-5%. Az említett értékeknél nagyobb, 15%-ot is elérő, hatásfok általában a közvetlen alakító-hatású, úgynevezett egyszer-használatos vagy egy-lövéses, tekercsel valósítható meg. Az elektromágneses alakítási technológia tervezőjének tehát a hatásfokot tapasztalati alapon kell feltételeznie, majd ennek figyelembevételével számíthatja ki a berendezés kondenzátor-telepében tárolandó villamos energia értékét.

A villamos energia ismeretében kiválasztható vagy megtervezhető az adott alakítási feladat megoldására alkalmas elektromágneses alakítóberendezés és ezen belül az alakítószerszám típusa, illetve annak szerkezeti elrendezése. Fentiek azt is mutatják, hogy a töltési energia önmagában nem elegendő az eljárás jellemzésére, a munkadarabra ható erők meghatározására. Számos publikáció foglalkozik a felsorolt eljárás módozatoknál fellépő jelenségek elméleti megközelítésével és határozza meg a fellépő nyomást, erőt, alakváltozást az eljárás paraméterei alapján.

Az alakítóberendezés kiválasztása, megtervezése során az elektromágneses félalakító szerszámok villamos helyettesítő kapcsolásának egységes számítási módszere ad lehetőséget arra, hogy az adott szerszám-elrendezésben létrehozható áramimpulzust, illetve mágneses nyomást jó közelítéssel meghatározzák a „nagyáramú impulzusgenerátor–alakítótekercs–munkadarab” rendszer modellezésével. Az elektromágneses félalakító berendezés két fő részből áll; nagyáramú impulzusgenerátorból és a munkadarabot is tartalmazó szerszámból. Az impulzusgenerátor technológiai szempontból legfontosabb egységei; az energiatároló kondenzátortelep és a tárolt energiának az alakítótekercsen keresztüli kisütésére szolgáló nagyáramú kapcsoló.

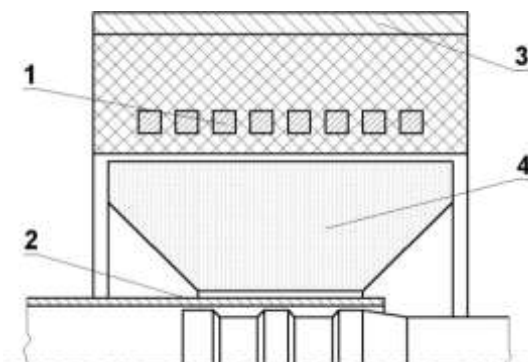
Az elektromágneses alakítóberendezés, azaz az impulzusgenerátor–tekercs–munkadarab rendszer, villamos szempontból egy R-L-C elemekből álló áramkörrel helyettesíthető, amely eredő áramkör a gyakorlatban különböző rész elemekből tevődik össze (3. ábra).

A 3. ábrán a C az energiatároló kondenzátor, a K a nagyáramú kapcsoló, Ri és Li a tároló és kapcsoló elemek belső ellenállása és belső induktivitása, Rk és Lk az energiatároló és a tekercs közötti villamos összekötés ellenállása és induktivitása. Az Rw és Lw a szerszám elrendezésre jellemző ellenállás és induktivitás. Az A és B pontok az alakítótekercs csatlakozási pontjai a berendezésen.



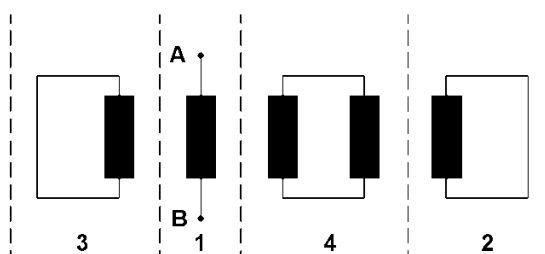
3. ábra Az alakítóberendezést helyettesítő R-L-C áramkör részletesebb változata

A tekercs és a munkadarab áramkörileg R-L elemekből áll, amely egy adott alakítási feladat esetében szintén számos részelemből tevődik össze (3. ábra).

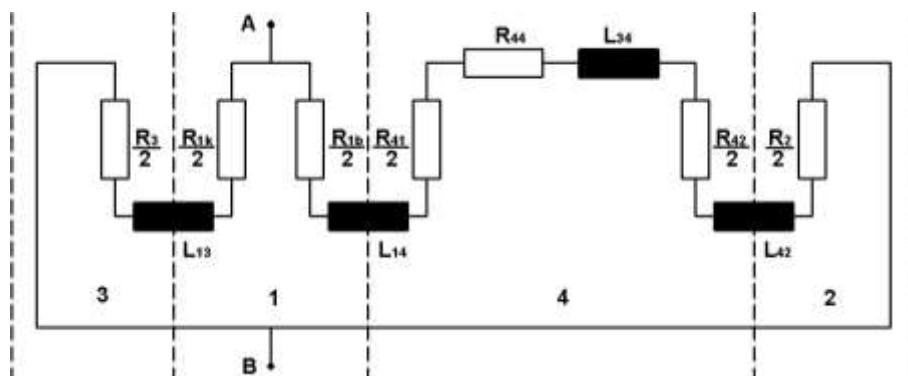


4. ábra Térformálóval ellátott, kompressziós hatású hengeres szerszám-elrendezés vázlata
(1-tekercs, 2-alakítandó munkadarab, 3-külső fémburkolat, 4-térformáló)

A 4. ábrán látható alakítási feladat szerszám-elrendezésének villamos helyettesítő kapcsolása az 5. ábra szerinti transzformátoros kapcsolások alapján a 6. ábrán bemutatott részleteket tartalmazza.



5. ábra A 4. ábrán bemutatott szerszám-elrendezés transzformátoros kapcsolatainak vázlata



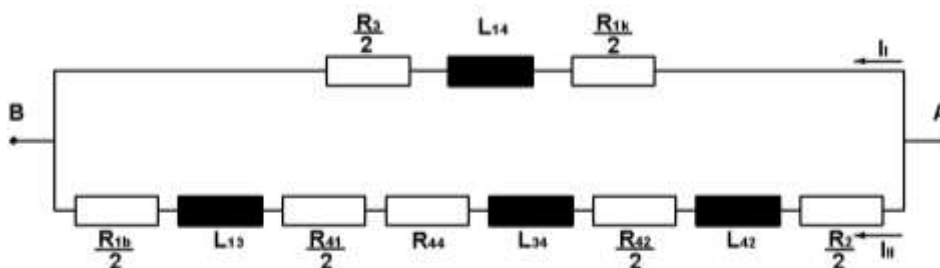
6. ábra A 4. ábrán bemutatott szerszám-elrendezés transzformátoros kapcsolatainak áramköre

A fenti áramkörben az egyes tagok értelmezése a következő:

- R_{1b} : az alakítótekercs belső, a térformáló irányában levő felületének ohmos ellenállása;

- L_{14} : az alakítótekercs belső felülete és a térformáló közötti légrés induktivitása;
- R_{41} : a térformáló külső, a tekercs irányában levő felületének ohmos ellenállása;
- L_{44} : a térformáló-rés induktivitása;
- R_{42} : a térformáló belső, a munkadarab irányában lévő felületének ohmos ellenállása;
- L_{42} : a térformáló belső felülete és a munkadarab külső felülete közötti úgynevezett munka légrés induktivitása;
- R_2 : az alakítandó munkadarab külső, a térformáló irányában levő felületének ohmos ellenállása;
- R_{1k} : az alakítótekercs külső, a fémburkolat irányában levő felületének ohmos ellenállása;
- L_{13} : az alakítótekercs külső felülete és a fémburkolat belső felülete közötti légrés induktivitása;
- R_3 : a fémburkolat belső, az alakítótekercs irányában levő felületének ohmos ellenállása.

Látható, hogy a részletes áramkör két párhuzamosan kapcsolt ágból tevődik össze, amelyek közül jelen példában a belső áramkörben van az alakítási feladat megoldására jellemző L_{42} induktivitás (7. ábra).



7. ábra A 6. ábrán látható kapcsolás módosított változata

A berendezésben az U feszültségre feltöltött kondenzátor-telep C kapacitásának kisütésekor kialakuló legnagyobb I áram a helyettesítő kapcsolás (5. ábra) értelmében az ág-impedanciáktól függően két részre oszlik el. A külső ágban folyik az I_I áram és a belsőben az I_{II} áram. Az I_{II} ág-áram és az L_{42} induktivitás, valamint az ehhez tartozó tér-rész geometriai adatainak ismeretében meghatározható a szerszám munkalégrésében létrejövő mágneses nyomás. Természetesen a számítások elvégezhetők az alakítási feladat megoldásához szükséges mágneses nyomás értékéből kiindulva is. Ez a tervezési változat alkalmazható egy új szerszám-elrendezést tartalmazó berendezés tervezésének esetében.

AZ ELEKTRODINAMIKUS ALAKÍTÁSI ELJÁRÁSOK TECHNOLÓGIAI TERVEZÉSI KÉRDÉSEI

Az adott gyártmányhoz a legmegfelelőbb gyártás technológiai folyamatnak a kiválasztását műszaki és gazdasági szempontok határozzák meg. A hagyományos képlékenyalakítási eljárások kiválasztását és gyakorlati megvalósítását sok évtized műszaki és gazdasági tapasztalata könnyíti meg. A nagysebességű képlékenyalakítások területén nem ez a helyzet, mert ipari alkalmazásuk még csak néhány évtizedes múltra tekint vissza.

A következőkben síklemezek vagy lemezből készült csőszerű előgyártmányok megmunkálására alkalmas módszerek gyártás technológiai sajátosságairól, a technológiai feladat szerinti szerszám kiválasztásról, kialakításról lesz szó.

Lemez-méretű előgyártmányok esetén szóba jövő alakítási eljárások egyrészt az alakítószerszám és a munkadarab közötti kapcsolat és az energiaátadás folyamata alapján, másrészt a munkadarab geometriai méreteinek és technológiai jellemzőinek ismeretében tárgyalhatók.

Az 1. táblázatban az elektromágneses és az elektrohidraulikus alakító eljárások jellemző paramétereinek tájékoztató értékei szerepelnek.

Jellemző paraméter		Alakítási eljárás	
		Elektromágneses	Elektrohidraulikus
Energiahordozó		mágneses tér	villamos ív
Energia-átadás módja		villamos energiával impulzusszerű mágneses tér létrehozása	villamos energiával szikrakisülés vagy huzalrob-bantás előidézése
Közvetítő közeg		légnemű (légüres tér)	folyadék, légnemű, egyéb
Energiatartomány	kWs	0,2-240	0,1-150
Impulzus homlok teljesítmény	kW	10^6	10^7
Elérhető fajlagos nyomás	$\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$	35	100
Lökéshullám kezdősebesség Lökéshullám munkasebesség	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	3.000-6.000	~6.000 400-800
Alakítási sebesség	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	15-150	20-200
Alakváltozási sebesség	s^{-1}	10^{-4}	10^{-5}
Impulzus időtartama	μs	10-100	5-50
Alakítási idő	s	10^{-3}	$10^{-3} - 10^{-2}$
Ciklusidő	min	0,005-1	0,2-4
Alakítási műveletek		szűkítés, tágítás, dombor-nyomás, kivágás, peremezés, sajtolás, szerelés	tágítás, kivágás, bordázás, domborítás, sajtolás, szerelés

1. táblázat Az elektromágneses és az elektrohidraulikus alakító eljárások jellemző paramétereit

A 2. táblázat az elektromágneses és az elektrohidraulikus alakítási eljárásokkal megmunkálható előgyártmányok jellemző paramétereinek tájékoztató értékeit tartalmazza. A táblázatban felsorolt adatok a megmunkálendő előgyártmány geometriai méretarányai és a szóban forgó két nagysebességű eljárással megvalósítható alakítási műveletek közötti összefüggéseket adják meg.

Mindkét táblázat tájékoztató jellegű, ezért egy adott munkadarab esetében a megfelelő alakítási eljárás kiválasztása nem végezhető el csak a méretek és a technológiai jellemzők gépies

figyelembevételével. Az adott gyártmány és a választott megmunkálás további konstrukciós és gazdasági megfontolásokat kíván a tervezőtől és a technológustól.

A megmunkálandó előgyártmány jellemzői			Alakítási eljárás		
			Elektromágneses	Elektrohidraulikus	
Anyag			$\rho \leq 15 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ fajlagos ellenállású fémek, ötvözetek	fémek, fémötvezetek, egyéb anyagok	
Lemezserű előgyártmány	megmunkálandó felületek átmérője		mm	20-400	10-500
	vastagsága		mm	0,2-3,5	0,1-6
	mélyhúzása, domborítása esetén		$\frac{H}{D} \leq$	0,003-0,1	0,005-0,3
	kivágása, lyukasztása esetén		$\frac{d}{s} \geq$	5-9	4-8
	szerelési művelete			peremezés, besajtolás	besajtolás
Csőszerű előgyártmány	bővítése	külső átmérő	mm	30-300	5-500
		falvastagság	mm	0,2-4	0,1-5
		átmérő növekedés mértéke	$\frac{D_1}{D}$	1,05-1,20	1,05-1,35
		palást-lyukasztás esetén	$\frac{d}{s} \geq$	6-10	4-8
	szűkítése	külső átmérő	mm	5-300	
		falvastagság	mm	0,2-10	
		átmérő csökkentése	$\frac{D_2}{D}$	0,95-0,55	
		palást-lyukasztás esetén	$\frac{d}{s} \geq$	4-8	
	szerelési művelete			szűkítés, bővítés, peremezés	bővítés

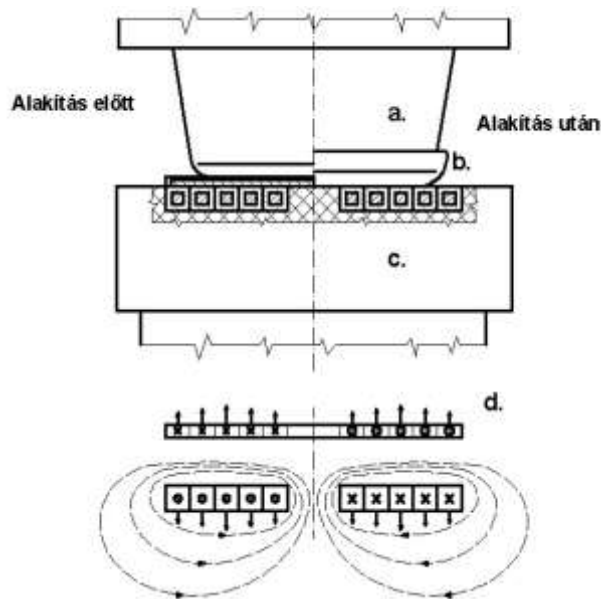
2. táblázat Az elektromágneses és az elektrohidraulikus alakítási eljárásokkal megmunkálható előgyártmányok jellemző paraméterei

ELEKTRODINAMIKUS ALAKÍTÓ SZERSZÁMOK KIALAKÍTÁSA

Az elektromágneses eljárásnál a megfelelően kialakított tekercsel ellátott szerszám végzi az energiaátalakítást és a munkadarab alakítását. A tekercs és a munkadarab egymáshoz viszonyított helyzete határozza meg a szerszámelrendezés típusát. A három alapvető szerszámelrendezés a következő:

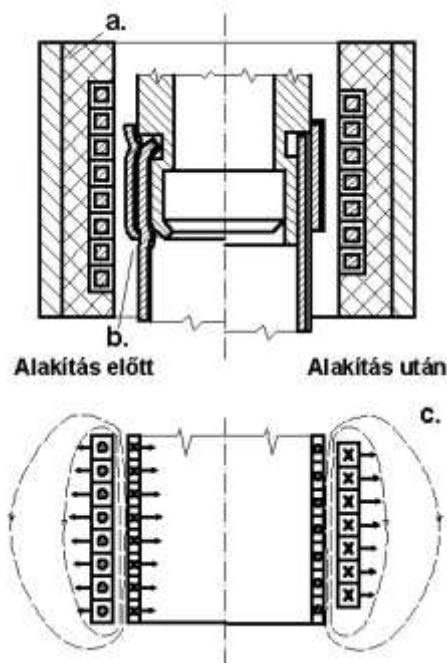
1. A lemezalakú munkadarabbal párhuzamos síkban elhelyezett spirálalakú tekercselés jellemezi síktekercses szerszámot, amelynek vázlatát a 8. ábra mutatja be, ahol
 - a - ellendarab;
 - b - munkadarab;

- c - az alakító tekercset tartalmazó szerszámrész;
d - a síktekercses szerszámelrendezés munkatekercsének jellemző erővonal képe.



8. ábra Síktekercses szerszámelrendezés váza

2. A hengeres kivitelű tekercselés belsejében elhelyezett munkadarab összenyomó hatású alakítását a kompressziós szerszámelrendezés teszi lehetővé, amelynek vázlatát a 9. ábra mutatja be, ahol
- a - az alakító tekercset tartalmazó szerszámrész;
 - b - az alakított munkadarab egy szerelési műveletben;
 - c - a kompressziós tekercsű szerszámelrendezés munkatekercsének jellemző erővonal képe.

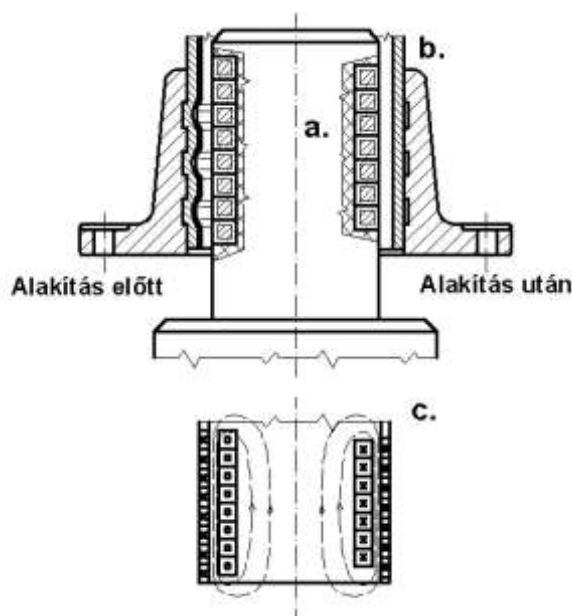


9. ábra Hengeres kivitelű kompressziós tekercsű szerszámelrendezés vázlata

3. A hengeres kivitelű tekercselést körülvevő munkadarab tágító jellegű alakítását az ex-

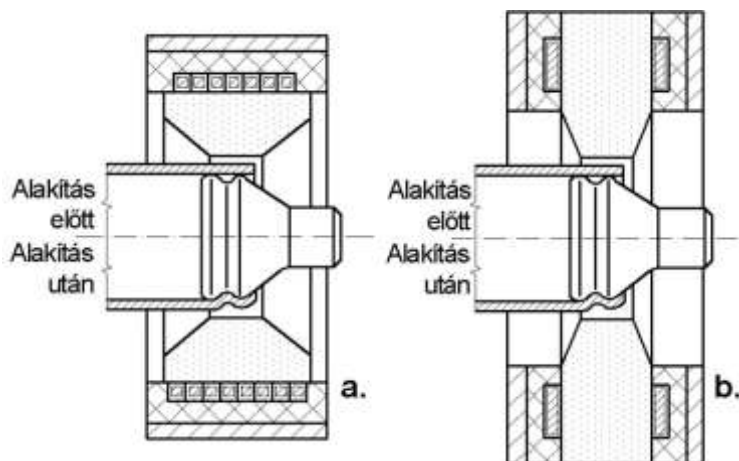
panziós szerszámelrendezés teszi lehetővé, amelynek vázlatát a 10. ábra mutatja be, ahol

- a - az alakító tekercset tartalmazó szerszámrész;
- b - az alakított munkadarab egy szerelési műveletben;
- c - a kompressziós tekercsű szerszámelrendezés munkatekercsének jellemző erő-vonal képe.



10. ábra Hengeres kivitelű expanziós tekercsű szerszámelrendezés vázlata

A megmunkálandó előgyártmány egy meghatározott felületére adott mértékű energiakonzentráció lehetősége is fennáll a különböző kialakítású térformáló elemek alkalmazásával. A hengeres kivitelű, kompressziós tekercseléssel ellátott, szerszámban helyezhető térformálót mutat be a 11. a. ábra. Ennek a kialakításnak a segítségével, egy alaptekercssel a térformáló elemek belső geometriájának változtatásával, több egymástól eltérő méretű munkadarab kompressziós alakítása válik lehetővé. A nagyobb, 30 kW-s feletti energiaigényű kompressziós alakításokra alkalmas szerszámokat általában kettős síkspirál tekercselésű siktérformálóval ellátott, szendvicsszerkezetű tekercsel készíthetik. Ennek a szerszámelrendezésnek a kialakítást a 11. b. ábra mutatja.



11. ábra Térformálóval ellátott kompressziós tekercsek

A különböző szerszámelrendezések gyakorlati kialakítását az elektromágneses fémalakítás alkalmazási területe határozza meg. Az előzőekben bemutatott ábrákból is kitűnik, hogy az elektromágneses eljárás az alábbi felhasználási területeken indokolt:

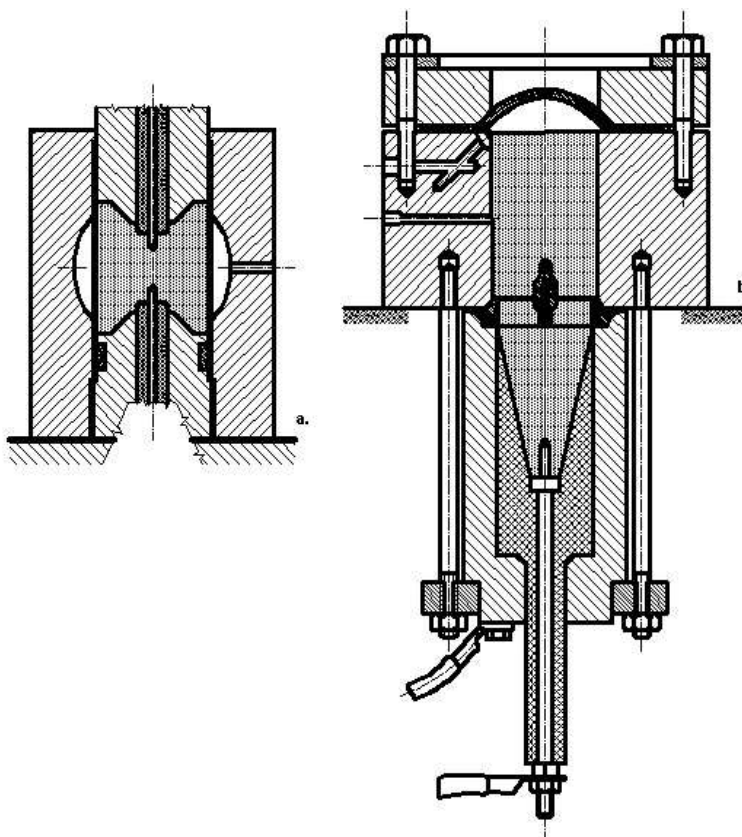
1. csőalakú előgyártmány expanziós vagy kompressziós alakítása, kivágása, lyukasztása, peremezése;
2. lemezalakú előgyártmányok viszonylag kis alakítási mélységű alakítása;
3. csőalakú előgyártmány felhasználásával expanziós vagy kompressziós jellegű szerelési műveletek elvégzése;
4. lemezalakú előgyártmányok felhasználásával szerelési műveletek elvégzése.

Az elektrohidraulikus alakítás esetén a tárolt energia impulzusszerű átalakításával létrehozott nagy hőmérsékletű villamos ív által keltett lökéshullámok hatásmechanizmusát használják fel a technológiai műveletek elvégzéséhez. Az elektrohidraulikus szerszámok elrendezésének típusát a szerszám nagynyomású terébe vezető elektródák és az alakítandó munkadarab egymáshoz viszonyított helyzete határozza meg. A két alapvető szerszámelrendezés a következő:

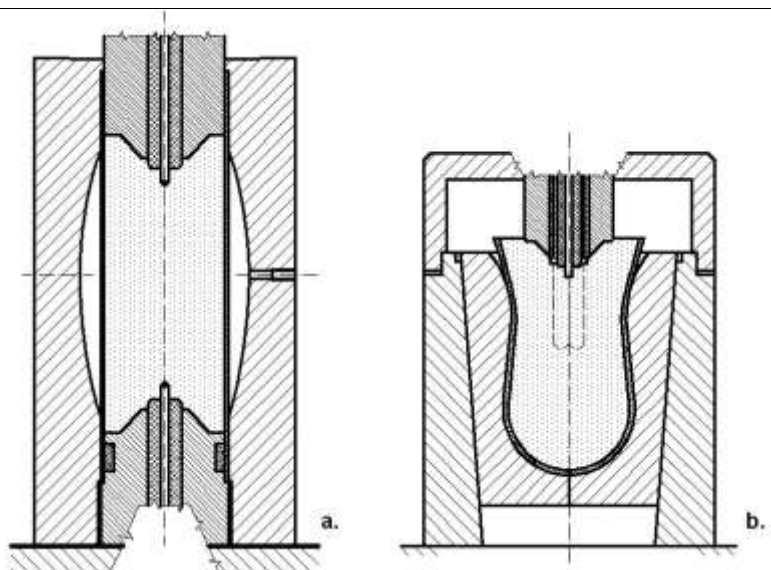
1. egymással szemben elhelyezett elektródákkal ellátott munkaterű szerszám;
2. koaxiális elrendezésű elektródákkal ellátott munkaterű szerszám.

Mindkét alapvető szerszámtípus alkalmas sík vagy görbült felületű lemezmeretű előgyártmányok alakítására. A fenti szerszámelrendezések vázlatát a 12. és 13. ábrák mutatják be. A 12. ábra a közvetlen szikrakisütéses elektrohidraulikus szerszámelrendezéseket szemlélteti, ahol

- a. hengeres-elrendezés, csőalakú munkadarab szakaszos bővítésére;
- b. sík-elrendezés, lemezalakú munkadarab domborítására.



12. ábra Közvetlen szikrakisütéses elektrohidraulikus szerszámelrendezések

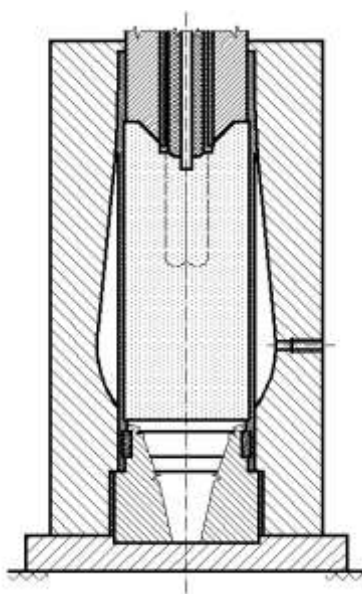


13. ábra Huzalos-elrobbantásos elektrohidraulikus szerszámelrendezések

- A 13. ábra az elrobbanó-huzalos elektrohidraulikus szerszámelrendezéseket mutatja be, ahol
- hengeres-elrendezés, csőalakú munkadarab bővítésére;
 - serleg alakú munkadarab dombormintázatának kialakítása, koaxiális elektróda-elrendezésű szerszámmal.

A bemutatott szerszámelrendezéseken kívül a gyakorlatban előforduló technológiai feladatok számos esetben bonyolultabb kivitelű szerszámkamrákat és elektródákat, valamint elrobbanó huzal geometriákat kívánnak meg a szerszámtervezőtől. Ilyen esetekben a lökeshullámok terjedése, illetve reflexiója csak közelítőleg határozható meg szerkesztéssel vagy számítással.

Az elektrohidraulikus eljárás esetében is lehetséges a megmunkálandó előgyártmány egy meghatározott felületére adott mértékű energiakoncentráció, a különböző kialakítású lökésterelő elemek alkalmazásával. A koaxiális elrendezésű elektródákkal ellátott szerszámban elhelyezett reflektort mutatja be a 14. ábra.



14. ábra Elektrohidraulikus szerszám koaxiális elrendezésű elektródákkal és elrobbanó huzallal

A különböző szerszámelrendezések gyakorlati kialakítását az elektrohidraulikus fémalakítás alkalmazási területe határozza meg. Az előzőekben bemutatott ábrákból is kitűnik, hogy az elektrohidraulikus eljárás gyakorlati felhasználásának jellegzetes alkalmazási területe:

1. a csőszerű előgyártmányok expanziós alakítása, lyukasztása, kivágása;
2. a lemezalakú előgyártmányok mélyhúzása;
3. csőszerű előgyártmányok felhasználásával expanziós-jellegű szerelési műveletek elvégzése;
4. lemezalakú előgyártmány felhasználásával szerelési műveletek elvégzése.

AZ ELEKTRODINAMIKUS ALAKÍTÁSI ELJÁRÁSOK KONSTRUKCIÓS TERVEZÉSI KÉRDÉSEI

Az elektromágneses alakítás konstrukciós szempontjainál alapvető, hogy az alkalmazott fém mechanikai tulajdonságain kívül az anyag villamos vezetőképességét is figyelembe kell venni. (Azok az anyagok még alakíthatók, melyeknek a vezetőképessége a réz vezetőképességének 10%-ánál nem kisebb.) Amennyiben a rossz vezetőképességű fémből készült alkatrészt az alakítótekerces felőli felületén valamilyen jó vezetőképességű bevonattal látják el, akkor alakítható. Ez a bevonat lehet, rendeltetésszerűen előírt, vagy az alakítás megkönnyítésére galvanikus, vagy vegyi úton felvitt bevonat, esetleg fémfóliából feltekereselt réteg. Az alakítás megkönnyítésére készített bevonatok alkalmazását gazdaságossági szempontok korlátozzák.

Geometriai alak szempontjából lényeges az eljárás ismertett hatásmechanizmusa alapján, hogy csak zárt alakzatok alakíthatók. A rövid idejű impulzus és a darab többi részének tehetetlensége megkönnyíti a kivágást és a lyukasztást.

Lényeges szempont, hogy az elektromágneses alakításnál az alakító erőt mechanikus érintkezés nélkül adják át a munkadarabra. Ez azt jelenti, hogy az anyag felülete nem sérül meg, tehát kikészített (pl. polírozott), vagy valamilyen bevonattal ellátott darabok is alakíthatók, amennyiben a bevonat, pl. festék vagy galvánbevonat jól kibírja az alakítást. Tekintettel arra, hogy kenőanyagra nincs szükség, a darabok szennyeződésével, illetve utólagos tisztításával sem kell számolni.

Az elektromágneses alakításnál lazább mérettűrések engedhetők meg. A csatlakozó darabok illeszkedő méreteinek szórása a megfelelő energiaszint beállításával áthidalható. Tulajdonképpen a nagyobb alakítási hatásfok érdekében célszerű az alakítótekerces mérete és az ehhez csatlakozó munkadarab mérete közötti eltérést minél kisebbre választani. A kevésbé szigorú mérettűrések különösen szerelési műveleteknél nyújtanak számottevő előnyöket.

Elektrohidraulikus alakításnál az alakított anyag villamos vezetőképessége nem játszik szerepet, ezért kifejezetten rossz vezetőképességű anyagok, pl. rozsdamentes acél is jól alakíthatók. Az alakítandó darab geometriailag ennél az alakítási módnál is zárt, megszakítatlan felületű kell, hogy legyen. Az alakítónyomást közvetítő folyadék terét általában maga a darab zárja le. Különleges esetekben megoldható, hogy a folyadéktér lezárását rugalmas membrán, vagy egyszer használható tartály, pl. műanyag zsák, biztosítsa.

Az elérhető alakváltozási mérték általában jóval nagyobb, mint az elektromágneses alakításnál, és gyakorlatilag a fém alakíthatósági határig terjed.

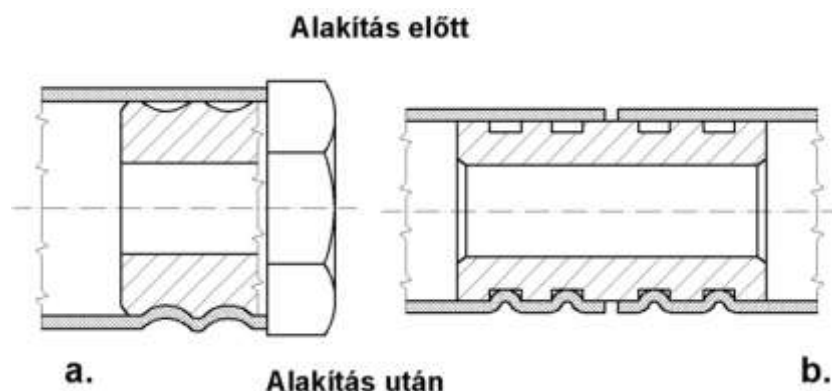
Az alakított darab geometriai kialakításánál az éles sarkokat és merőleges vállakat lehetőleg itt is kerülni kell. Tekintettel arra, hogy az elektrohidraulikus alakításnál mind az alakított darab mérete, mind az alakváltozás mértéke általában nagyobb, mint az elektromágneses alakításnál, ezért a kiinduló darab és a szerszám közötti teret az esetek többségében vákuumozni kell.

A kiinduló darabok mérettűréseivel kapcsolatban itt sincs fokozott követelmény, azonban gondolni kell arra, hogy az alakítandó alkatrész zárja le a folyadékteret, ezért a darab méretszórásának és a tömítő rendszernek összhangban kell lennie.

ELEKTROMÁGNESES ALAKÍTÁSI PÉLDÁK

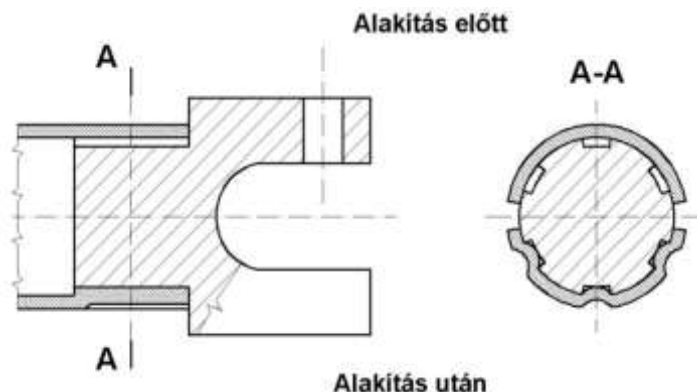
A kifejezetten alakítási műveletekhez képest nagyobb jelentőségű az elektromágneses eljárás a képlékenyalakítással létesített mechanikus kötések, vagyis a szerelés területén. A szerelési műveletek azonban nemcsak a hagyományos értelemben vett szerelések helyettesítésére szolgálnak, hanem bizonyos esetekben új, egyszerűbb, olcsóbb konstrukciós lehetőségeket is nyújtanak.

A csatlakozó elemeken olyan hornyok, beszúrások, vállak kiképzése szükséges, amelyek az összeszerelt alkatrészek megfelelő mechanikus kötését biztosítják. (15. ábra.) Az ábra baloldalon csővégződés rögzítése látható, míg a jobboldalon csőcsatlakozás kialakítás közbetét darabbal.



15. ábra Alakzáró kötések

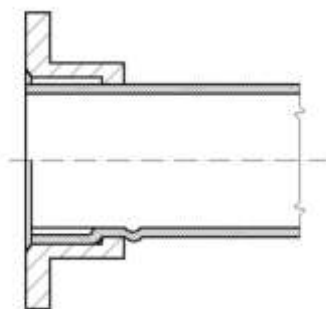
Torziós igénybevétel átvitelére (pl. tengelyeknél) hosszanti bordázattal célszerű ellátni a csatlakozó darabot, és az alakított darabot a bordák közé sajtoljuk be. (16. ábra).



16. ábra Hosszanti bordázattal ellátott tengelyvégződés

Szűkítés helyett tágitással is rögzíthetők csőkarimák csövek végein (17. ábra).

Alakítás előtt

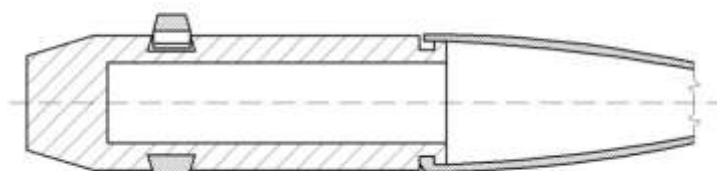


Alakítás után

17. ábra Csőkarima szerelése

Elfordulás ellen megfelelő biztonságot nyújtó kötést lehet létrehozni lövedékek vezetőgyűrűinek felsajtolásakor. Hasonló módon rögzíthetők különböző színesfém csapágyperselyek is. A 18. ábrán bemutatott példán a lövedék orrkúpját is elektromágneses alakítással rögzítették.

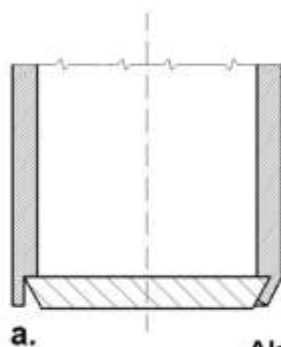
Alakítás előtt



Alakítás után

18. ábra Lövedék vezetőgyűrűjének és orrkúpjának felsajtolása

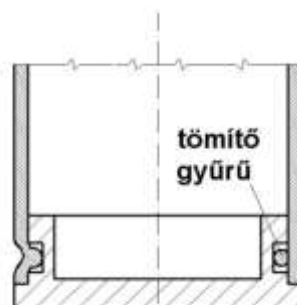
Alakítás előtt



a.

Alakítás után

Alakítás előtt



b.

19. ábra Különböző kialakítású csőelzárások

Különböző edények, hengerek, csőelzárások alakíthatók ki viszonylag egyszerű módon, megfelelően kiképzett végdarabokkal. A 19. a. ábrán tömítőanyag nélküli, a 19. b. ábrán pedig O-gyűrű alkalmazásával kialakított csőelzárások láthatók.

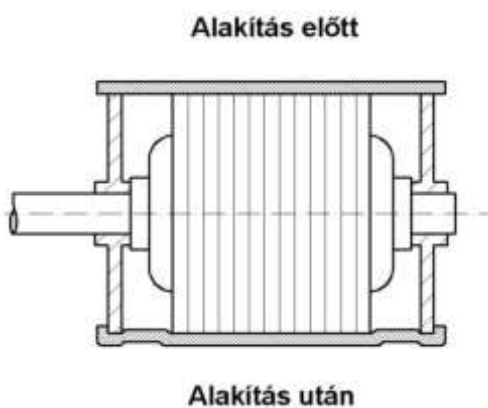
Kisebb méretű villamos motorok szttátor lemezeinek összefogása végezhető el úgy, hogy a lemezköteget a külső átmérőhöz illeszkedő csődarabba helyezik és a csövet a lemezköteg széleinél besajtoljuk (20. ábra).

Villamos motor szerelésére mutat példát a 21. ábra is, azonban ebben az esetben a csődarab,

amely egyben a motor háza is, nemcsak az állórész összefogását végzi, hanem elektromágneses alakítással a homloklapokat is rögzíti, melyek csapágyaiba az előszerelt forgórész is be van már helyezve. Ily módon egy művelettel a teljes motor összeszerelése elvégezhető.

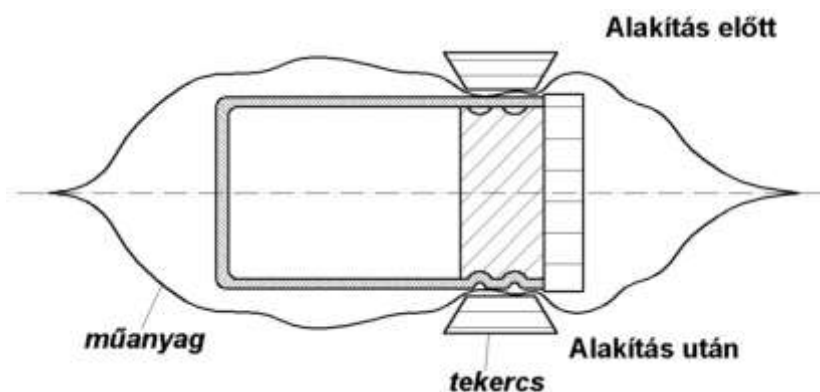


20. ábra Villamosmotor állórész lemezeinek összefogása



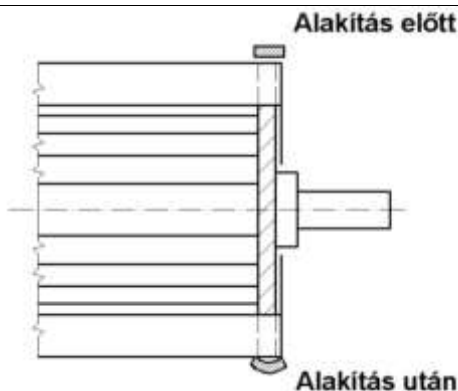
21. ábra Villamos motor házának szerelése

Különleges zárási, szerelési feladatok elvégzésére nyújt lehetőséget az a tény, hogy a mágneses tér a szigetelőanyagon áthatol (22. ábra).



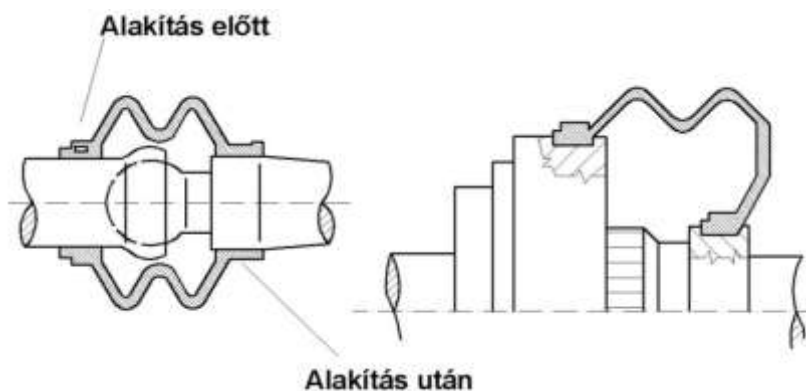
22. ábra. Légmentes térben végzett alakítás

Számos olyan eset fordul elő viszont, amikor a kívánt szerelési műveletet egy újabb elem felhasználásával lehet létrehozni. Ilyen esetekben általában gyűrű-alakú darabot, egy rövid csődarabot használnak, mellyel körülveszik az összeszerelendő alkatrészeket és a gyűrű, alakítás után, mint bilincs rögzíti azokat (23. ábra).



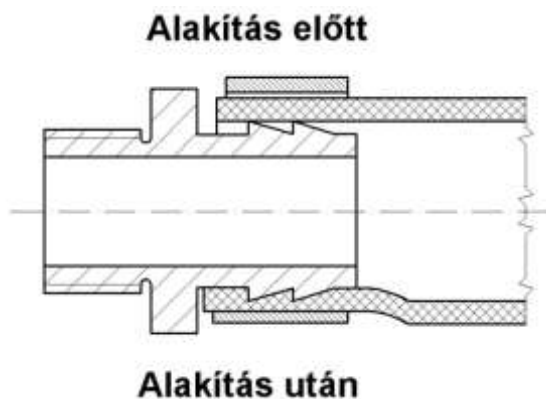
23. ábra Ventillátor járókerék szerelése

A gépjárműiparban használatos porvédő gumi hüvelyek szerelésekor is alkalmazható ez a megoldás (24. ábra).



24. ábra Gömbcsukló és féltengely gumiharangjának szerelése

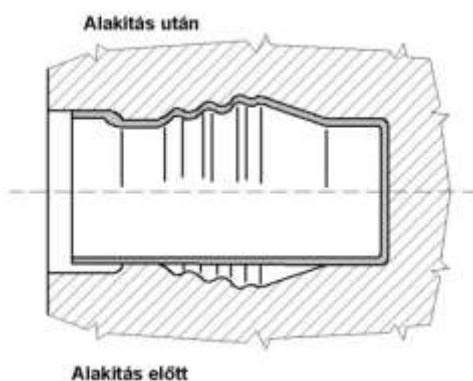
Hasonlóan az előző példához, gumitömlők, nagynyomású hidraulikus vezetékek csatlakozó elemei szerelhetők lemezbilincs helyett csőgyűrűkkel. A gyűrű a tömlőben fellépő nyomás igénybevétel szerint méretezhető, ily módon biztos kötést lehet létesíteni. Vizsgálati adatok szerint vászonbetétes, acélfonattal páncélozott, nagynyomású gumitömlők próbanyomásoknál mindig előbb széthasadtak, semmint a csőgyűrűvel, elektromágneses alakítással rögzített végződés szivárgott volna (25. ábra).



25. ábra Gumitömlő csatlakozó elemének szerelése

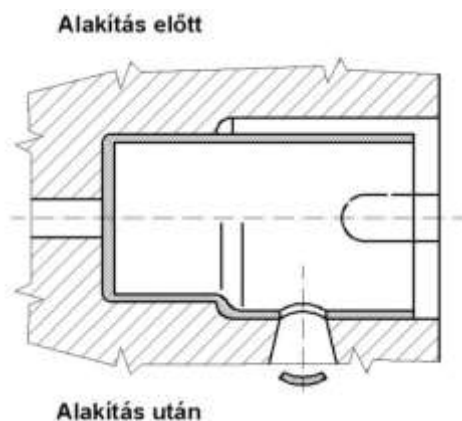
Szerszámban való alakításkor a munkadarab alakját az alakító matrica vagy betét határozza meg

oly módon, hogy az alakítandó profilt a szerszámba bemunkálják. Kisebb igénybevételek és kisebb darabszámok esetén a szerszám lehet műanyag, vagy esetleg fából is készülhet, nagyobb sorozatoknál és nagyobb igénybevételeknél általában fém, főleg acél szerszám használható. Hőkezelt acél edzett betétek alkalmazása lyukasztó és kivágó műveleteknél célszerű. A 26. ábrán látható matrica osztott, így alakítás után a két felet szétnyitva, a darab eltávolítható.



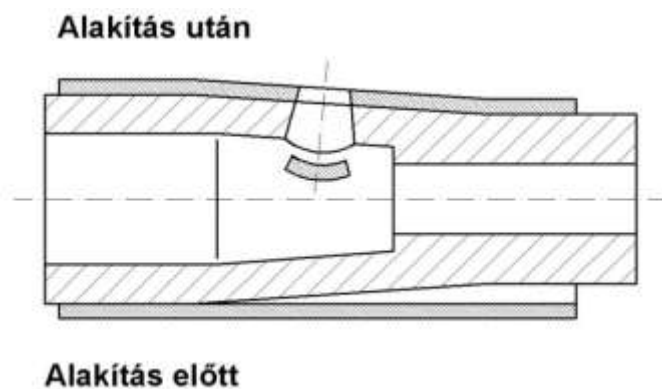
26. ábra Palástmintázással alakított darab

Ha a matrica felülete nem zárt, hanem azon kivágás vagy lyukasztás céljára kiképzett furat van, akkor ilyen jellegű műveleteket végezhető igen jó vágási felületminőséggel (27. ábra).



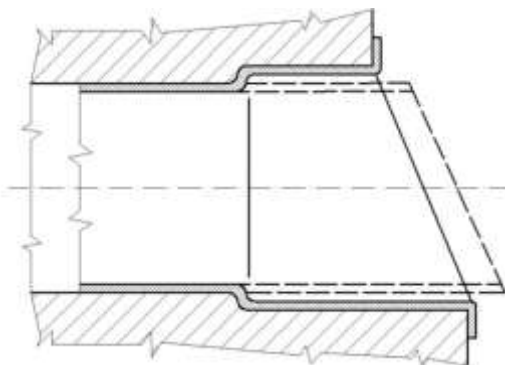
27. ábra Alakítással kombinált kivágás és lyukasztás

A 28. ábrán látható egy csődarab szűkítő alakításával kombinált lyukasztás. A szűkítő alakítás a csődarabot kúpos átmenetűre képezi ki.



28. ábra Kúpos szűkítéssel kombinált lyukasztás

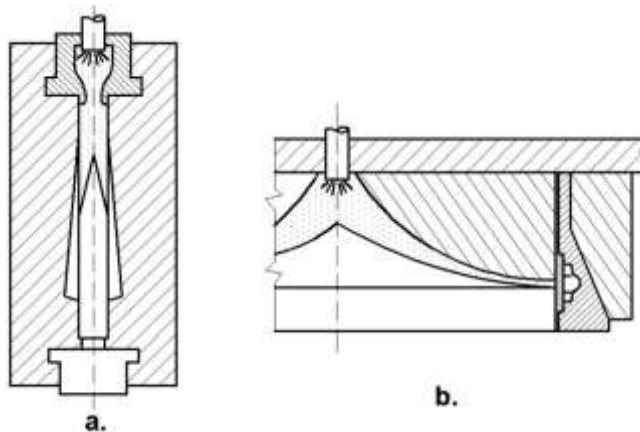
Csőek végződéseinek, csatlakozó elemek kialakításánál gyakran fordul elő feltágítás és kiperemezés. A 29. ábrán egy ferde síkban csatlakozó cső végződésének alakítása látható tágítással és perem kialakítással.



29. ábra Ferde síkban végződő csődarab tágítása és peremezése

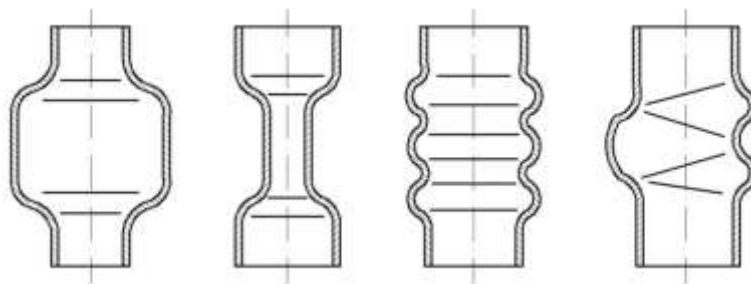
ELEKTROHIDRAULIKUS ALAKÍTÁSI PÉLDÁK

Az elektrohidraulikus alakítás jellegzetes műveletei: üreges darabok tágítása, kalibrálása, vágása, lyukasztása, továbbá mélyhúzás jellegű műveletek és esetenként különleges kötések, szerelések megvalósítása. Miként az előzőek említették, a nyomásátadó közeg folyadék, legtöbbször víz, és a víztartály zárt. Ez azt eredményezi, hogy a nyomáshullám jól hasznosítható és megfelelően irányítható. Huzal-elgőzölögtetési módszerrel a lökeshullám nyomásintenzitását is az alakítandó munkadarab alakja szerint lehet változtatni. A zárt folyadéktérben elhelyezett reflektorfelületek extrém alakítási műveleteket is lehetővé tesznek. A 30.a. ábrán olyan csődarab alakításának vázlata látható, ahol a cső átmérőjének és hosszának viszonya 0,1-nél kisebb, a 30.b. ábrán pedig 7 az arány. Mindkét esetben a reflektorbetét tereli a lökeshullámokat.

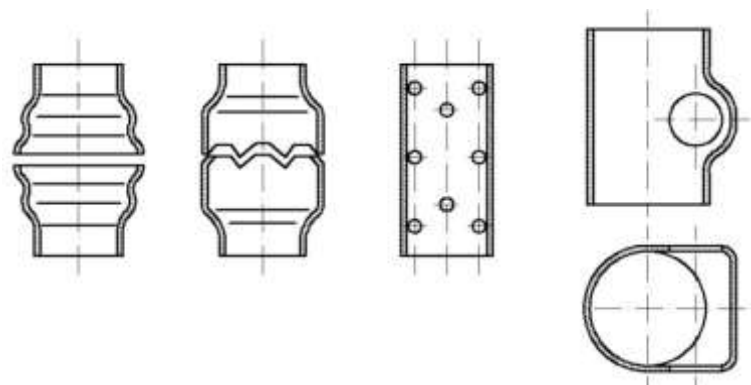


30 ábra. Reflektoros alakítású szerszámok

Az elektrohidraulikus alakítás sokoldalú alkalmazási lehetőségeinek jellemzésére a következő ábrák olyan jellegzetes alkatrész típusokat mutatnak be, melyek alapján megítélhető, milyen geometriai alakzatok alakíthatók. A 31. ábrán különböző tágítási műveletek szerepelnek. A 32. ábrán ugyancsak tágítási műveletek láthatók vágással és lyukasztással kombinálva. A vágást vagy szétválasztást azon a szakaszon célszerű végezni, ahol az alakítási művelet folyamán a munkadarab anyaga nagy sebességet ér el.

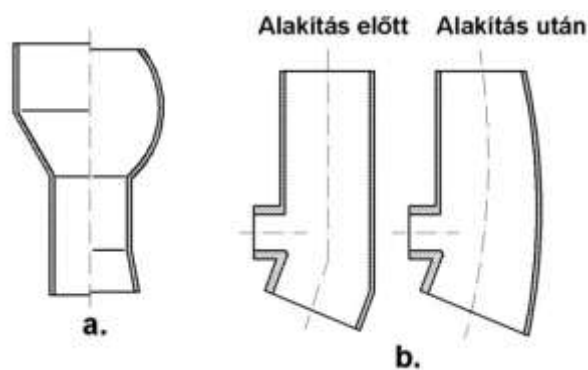


31. ábra Tágítással alakított alkatrésztípusok



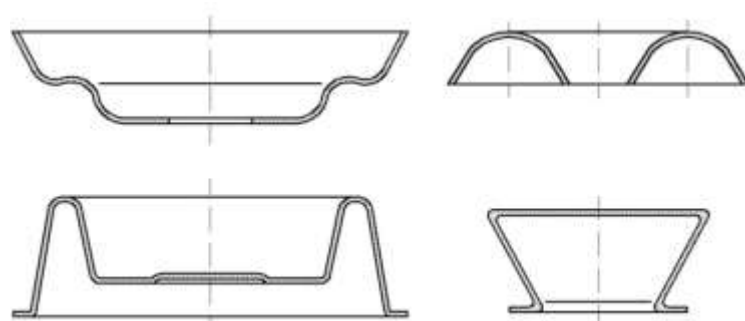
32. ábra Tágítással alakított és vágással, ill. lyukasztással kombinált alkatrészek

Csőszerű darabok alakításánál szabályos geometriai idomokból hegesztéssel összeállított előgyártmányt is használható (33. ábra).



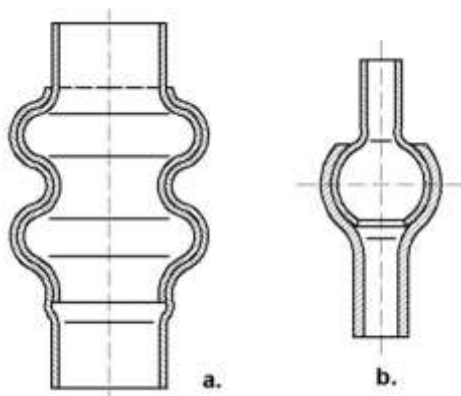
33. ábra Hegesztett kiinduló darabokból alakított alkatrészek

Sík lemeztárcsából mélyhúzás jelleggel alakított alkatrészek láthatók a 34. ábrán.



34. ábra Sík lemeztárcsából alkatrészek alakítása

Bizonyos esetekben speciális szerelési műveletek is végezhetők elektrohidraulikus alakítással. A 35. ábrán két alkatrész összeszerelése látható szilárd (a) és mozgó (b) kötéssel.



35. ábra Két alkatrész szerelése szilárd és mozgó kötéssel



36. ábra Elektrodinamikus alakítással készített alkatrészek

Az elektrohidraulikus alakításra bemutatott eddigi példák főleg nagyobb alakítási mértékkel formált darabokra vonatkoznak. Sok esetben célszerű az eljárás alkalmazása akkor is, ha viszonylag kis alakítási mértékkel kell speciális formákat kialakítani vagy kalibrálni. Üreges darabok, például dísz tárgyak palástmintázása is jó eredménnyel végezhető, erre különösen olyan esetekben van lehetőség, amikor a kiinduló darab olyan alakú, hogy az elektromágneses alakítótekercs kontúrjával nem követhető. Például serlegek és más hasonló, felületükön cizellálással díszített alkatrészek mintázását lehet kézi megmunkálás helyett gépesíteni. Ilyen esetekben a mintázatot a matricába kell bemunkálni. Acél matrica esetén a minta begravírozása eléggé költséges vésnöki munka, kisebb sorozatok esetén azonban műanyagból vagy esetleg gipszből készült matrica is használható, melyet egy előzőleg kézzel mintázott darab felhasználásával könnyen el lehet készíteni.

Megemlítendő még az elektrohidraulikus módszer két különleges felhasználási lehetősége: a fémporok aprítása és az öntvénytisztítás. Egyik sem alakító eljárás, hanem az elektromos ív eróziós hatását használja ki. A zárt folyadékterű kamrába helyezett anyag rögök (pl. fémkarbidok) és a folyadékba benyúló elektródák között ív képződik, sőt ív jön létre az egyes anyag

darabok között is. A folyamatosan ismételt ívkisülések az egyes darabokat aprítják, és a felaprított darabok a berendezésbe helyezett rostán lehullnak.

Hasonló elven alapul az öntvénytisztítás is. Az öntvényekre tapadó oxidréteg és formázó anyag maradék az ív által keltett detonációs hullámok hatására leválnak. További hatásként még kihasználható az a jelenség, hogy az öntvényeken lévő esetleges felületi egyenetlenségek, kiálló csúcsok, az ív hatására leégnek, a felület simábbá válik.

A cikk a **TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások** című projekt keretében készült, amely az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] RÁCZ Pál, GÖBL Nándor, HORVÁTH Dániel: Rúd-cső kötések készítése elektromágneses alakítással. XIV. Képlékenyalakító Konferencia, Miskolc, 2012. 02. 16-17., Miskolci Egyetem, 2012, pp. 75-81. o. ISBN 978-963-661-985-5
- [2] WOODWARD S. T., WEDDELING Ch., DAEH G., PSYK V., CARSON B., TEKKAYA A. E.: Production of low-volume aviation components using disposable electromagnetic actuators. *Journal of Materials Processing Technology*, 211. (2011) 886–895. o.
- [3] WEDDELING Ch., WOODWARD S. T., MARRÉ M., NELLESEN J., PSYK V., TEKKAYA A. E., TILLMANN W.: Influence of groove characteristics on strength of form-fit joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 211. (2011) 925–935. o.
- [4] PSYK V., RISCH D., KINSEY B. L., TEKKAYA A. E., KLEINER M.: Electromagnetic forming - A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 211. (2011) 787-829. o.
- [5] BARREIRO P., SCHULZE V., LÖHE D., MARRÉ M., BEERWALD C., HOMBERG W., KLEINER M.: Strength of Tubular Joints Made by Electromagnetic Compression at Quasi-static and Cyclic Loading. 2nd International Conference on High Speed Forming, Universität Dortmund, 2006. 107-116. o.
- [6] ERDŐSI József, GÖBL Nándor: Coil design of electromagnetic forming. *International Symposium on Dynamic Loading and its Effects*, Beijing, 1986.
- [7] GÖBL Nándor: Elektromágneses fémalakító szerszámok villamos helyettesítő kapcsolásának egységes számítási módszere. /Disszertáció/ BME – Villamosmérnöki Kar – (1977)
- [8] CZEGLÉDI Istvánné, GÖBL Nándor: Nagysebességű lemezalakító eljárások, *Gépgyártástechnológia*, 12. (1972) 7-8. 329-335. o.
- [9] GÖBL Nándor: Alumínium alkatrészek elektromágneses alakítása. Alumínium Konferencia előadásai, Székesfehérvár, 1972. okt. 5. A-II. 701-714. o.
- [10] ERDŐSI József: Elektromágneses alakítás technológiai tervezése. *Gépgyártástechnológia*, 11. (1971) 1. sz. 23-25. o.
- [11] BÜHLER H., FINCKENSTEIN E.: Beitrag zur Herstellung von Ummantelungen und Sicken Verbindungen rohrförmiger Teile durch Magnetumformung. *Bänder Bleche Rohre*, 10. (1969) 7. sz. 413-418. o.
- [12] DIETZ H., LIPPMANN H. J., SCHENK H.: Metallumformung mit hohen gepulsten Magnetfeldern. *Schweizerisch. Techn. Zeitung*, 1969. jún. 19. 25. sz. 500-510. o.
- [13] BÜHLER H., FINCKENSTEIN E.: Fügen durch Magnetumformung. *Werkstatt und Betrieb*, 101. (1968) 4. sz. 209-215. o.
- [14] BAUER D.: Erwärmung der Werkstücke bei Magnetumformung. *Bänder Bleche Rohre*, 9. (1968) 11. sz. 673-676. o.
- [15] ERDŐSI József, GÖBL Nándor: Elektromágneses alakítás. *Finommechanika*, 7. (1968) 4. sz. 97-105. o.
- [16] BROWER D. F., AYERS R. A.: Instrumentation for Magnetic Pulse Metal Forming. *S.A.E. Transactions*, 75. (1967) Okt. 282-287. o.