

Prof. Dr. Lukács László¹ – Szalay András – Dr. Zádor István PhD²

ROBBANTÁSOS FÉMALAKÍTÁS ÉS A REPÜLÉSTECHNIKA³

A robbantásos fémalakítás történeti fejlődése. A nagysebességű fém megmunkálás alapjai, módszerei. Előnyei és hátrányai a hagyományos fémalakításos, elsősorban préselési technológiákhoz képest. Fémről készült lemezek és csövek robbantásos alakításának, formázásának lehetőségei. Robbantásos fém megmunkálással kapcsolatos szakirodalmak Magyarországon, a korábbi Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, dr. Mueller Othmár Robbantástechnikai Különgyűjteménye. Robbantásos fémalakítással készült alkatrészek az űr- és repüléstechnikában.

EXPLOSIVE FORMING AND THE AEROSPACE

Historical note, of explosive forming. Technology overview is the high velocity metal deformation. Explosive forming methods metal sheets and tubes. Specialized explosive forming bibliography in Hungary – Othmar Mueller's Specialized Library by blasting technique and technology at the earlier Miklós Zrínyi National Defense University. Explosive forming manufacturing. Explosive forming parts in the aerospace.

A robbantásos fém megmunkálás elméletével és gyakorlatával a 40-es évek végén kezdtek el foglalkozni a kutatók a Szovjetunióban és az Amerikai Egyesült Államokban. A kutatások kiváltó oka, az ebben az időben megjelenő nagyszilárdságú fémek, és a belőlük készítendő egyre nagyobb méretű munkadarabok igénye volt. A robbanási lökéshullám energiájában próbálták – ma már mondhatjuk, hogy sikerrel – megtalálni azt az erőt, mely segítséget nyújthat a probléma megoldásában. A robbantásos plattírozás, kerámia- és fém por tömörítés, valamint a fémalakítás, jelen világunk egyre szélesebb körben alkalmazott technológiái, melyek egyrészt új tulajdonságokkal rendelkező, többféle komponensből álló anyagok létrehozását, másrészt egyszerű, olcsó módszerek alkalmazásával nagyméretű, speciális munkadarabok kialakítását tették, teszik lehetővé. Jelen dolgozatunkban, a fémalakító robbantások fejlődést mutatjuk be, különös tekintettel a repülőiparban és az űrtechnológiában történő alkalmazás lehetőségeire.

FÉMLEMEZEK ROBBANTÁSOS ALAKÍTÁSÁNAK TÖRTÉNETI FEJLŐDÉSE

A fémlamezek robbantásos alakítása a kor technológiai vívmányának tűnik, de egyes források arról tudósítanak, hogy több mint egy évszázaddal ezelőtt már ismerték és alkalmazták fémek megmunkálására, a robbanás erejét. Állítólag 1878-ban, Manchesterben, bizonyos Daniel Adamson robbanással formált nagyszilárdságú kazánlemezeket. Később Kentben, Claude Johnson formázott robbantással, nehezen megmunkálható fémeket. Ugyanezen forrás szerint, ennek eredményeként jegyezték be Angliában az első robbantásos fémalakítási szabadalmat

¹ ny. mk. alezredes, CSc., egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, lukacs.laszlo@uni-nke.hu

² S-Metalltech 98 Anyagtechnológiai Kutató-fejlesztő Kft.

³ Lektorálta: Dr. Kovács Zoltán okl. mk. őrnagy, egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, kovacs.zoltan@uni-nke.hu

1889. szeptember 23-án, fémcső robbantásos tágitása kerékpár váz gyártásakor témában (British Patent no. 21840). 1909. november 9-én, az USA-ban jegyeztettek be szabadalmat, sík-lemezek robbantásos alakításával kapcsolatban (US Patent no. 939,702). Johnson találmányát az 1950-es évek elején adaptálta a Moore Company of America, és nagyméretű ventilátor tárcsákat kezdett robbantással előállítani, ezzel 15 %-os költségcsökkentést érve el, a hagyományos, mechanikus gyártáshoz képest. [43]

Az igazi fellendülést azonban a II. világháborút követően figyelhetjük meg a robbantásos fémalakítás terén, amikor a technikai fejlődés új igényeket állított a szakemberek elé. A repülőgép- és hajógyártás egyes munkadarabjainak, valamint az egyéb területeken jelentkező, pl. nagyméretű tartályok gyors és nagy pontosságú, lehetőleg egy munkafázisban történő előállítása, a korábbi fémmegmunkálási eljárásokkal egyre kevésbé volt sikeren végrehajtható.

Nem elhanyagolható szempontként kellett figyelembe venni a gyártás gazdaságosságát sem, mely egyre újabb lehetőségek, módszerek keresését követelte meg az üzemektől és a kutatóintézetektől. Ez azt jelentette, hogy minél kevesebb részegységből, minél kevesebb hegesztési munkával és az ezt követő, elengedhetetlenül szükséges felület megmunkálási feladattal sikerült egy adott formát elkészíteni, az annál kevesebb időt és élő munkát követelt, az által pedig annál olcsóbban volt előállítható.

A repülő és járműiparban előtérbe került az ideális felület és forma kialakítás igénye is, mely révén csökkenthető a légellenállás, így gazdaságosabba üzemeltethető a jármű. Könnyen belátható, hogy ehhez is a lehető legkevesebb részegységből célszerű kialakítani a munkadarabot.

A vegyipar egyre nagyobb méretű, több méter átmérőjű tartályokat igényelt, melyek kialakításánál megint csak nem volt célszerű, pl. a tartály fenekek több cikkből, hegesztéssel történő előállítása, a fent jelölt hosszú és gazdaságtalan utómunkálatokkal.

A megoldást természetesen a fémlemezek préssel történő kialakítása jelentette volna (mélyhúzási technológia), csak hogy ilyen méretek és az alapanyagként a piacon megjelenő nagyszilárdságú fémek tulajdonságai miatt, a kor rendelkezésre álló berendezései, erre a feladatra alkalmatlannak bizonyultak. Az 50-es években megjelenő új 150-200 kg/mm² szilárdságú rozsdamentes acélok, nem is beszélve a krómácélokról és a titán ötvözetekről, rendelkeztek azon kellemetlen tulajdonsággal is, hogy a korábban alkalmazott módszerekkel nem, vagy csak nehezen voltak megmunkálhatóak. Az új ötvözetek egy részénél a hagyományos, meleg megmunkálás során káros, az anyagminőséget rontó változások következtek be az anyag szerkezetében, így csak a normál hőmérsékleten történő megmunkálás jöhetett szóba. De hogy lehet hideg körülmények között plasztikus, nagy pontosságú alakváltoztatásra kényszeríteni, egy egyébként is nagy szilárdsági mutatókkal rendelkező fém?

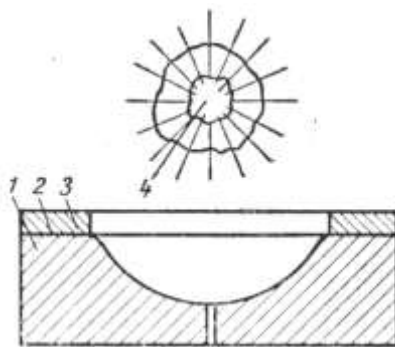
Az orosz Pihtovnyikov és Zavjalova, már 1964-ben megjelent könyvükben szembesítenek azzal a problémával, melyet a nagyszilárdságú fémlemez, prés gépben történő képlékeny alakítása jelent⁴. Azt írják, hogy nincs olyan berendezés, mely lehetővé tenné olyan hatalmas nyomás létrehozását, mely a lemez teljes vastagságában biztosítaná a plasztikus zóna létrehozását. Példájukban írják, hogy akár csak néhány milliméter vastagságú, nagyszilárdságú le-

⁴ ПИХТОВНИКОВ, Р. В. – ЗАВЯЛОВА, В. И.: Stampovka lictovova Metala vzrivom, Masinoszroenyie, Moszkva, 1964. p. 7.

mez, fenti követelmények szerinti préseléses megmunkálásához is, hatalmas méretű gyártó berendezésre lenne szükség: egy 2,5*2,5 m-es, 120 kg/mm² szilárdságú acéllemezt, 50 000 t-ás nyomóerővel rendelkező présgéppel lehetne megmunkálni, mely csekély 15 000 t-ás önsúllyal rendelkezne. Egy ilyen hatalmas berendezés előállítása, üzemeltetése és üzemben tartása hatalmas anyagi és munkaerő ráfordítást igényelne.

A jelzett problémák megoldására érdekében folytatott vizsgálatok során megállapítást nyert, hogy az ipari igényeknek vannak olyan sajátos területei, pl. a repülőgép- vagy a hajógyártás [39], ahol viszonylag kis darabszámú, viszont nagyméretű, egy darabból préselt alkatrész elkészítésére van igény. Ezekhez nem lehet gazdaságos présgépes technológiát rendelni, így más utat kell találni.

1948-1949-ben a Harkovi Repüléstudományi Intézet kísérleteket hajtott végre ilyen jellegű alkatrészek, robbantással történő kialakítására⁵. Kezdetben a présgépeknél alkalmazott formákat használták fel arra, hogy a lemezeket a kívánt formára alakítsák brizáns robbanóanyagok alkalmazásával. Közvetítő közegként először a levegőt, majd később vizet alkalmaztak (lásd 1. ábra). A módszer nagy előnyének tűnt a présgépes alakításhoz képest annak olcsósága és rugalmassága (akár beton, vagy műgyanta formába robbantva, különösebb technikai feltételek nélkül, kis szériában is gazdaságosan gyárthatók nagy pontosságú, megfelelő felületi simaságú, viszonylag bonyolult alkatrészek).



1. ábra Robbantásos lemezalakítás elvi vázlata

1 – forma; 2 – rögzítő (ráncfogó) keret; 3 – az alakítandó lemez; 4 –robbanóanyag töltet

Ugyanakkor a kutatók vizsgálták azt is, hogy a nagyszilárdságú, hideg fémlemezre ható extrém rövid időtartamú, nagyon magas robbanási nyomás hogyan hat a fémre? Nem csökkennek-e ennek hatására a fém plasztikus tulajdonságai, egyáltalán nem megy-e tönkre maga a robbantandó lemez, nem változik-e meg a fém kristályszerkezete, nem keletkeznek-e benne káros mikro-repedések?

A nemzetközi ipari és tudományos intézetek, széleskörű kutatásokat végeztek e kérdések tisztázására. Az Amerikai Egyesült Államokban 1956-tól kezdődő kutatások végkövetkeztetése szerint, a robbanási energia különösen hatékonynak bizonyult a nagyszilárdságú, de még a kis plaszticitással rendelkező fémek alakítására is (Holtzman A. H., Cowan G. R., és mások) [15] [16]. A robbanási nyomás hatására, a fémlemez egyenletesen deformálódva, a présgépes alakításkor a sarkoknál időnként előforduló törések nélkül felvette a forma alakját, felületi minősége (simasága) pedig a forma felületi minőségét.

A robbantásos fémalakítással kapcsolatos fejlesztésekbe sorban kapcsolódtak be más államok

⁵ Uo. p. 9.

kutatói is, pl. Lengyelországban [2][18][20], Csehszlovákiában [3][34], Angliában [4][5][6], Franciaországban [30], Dániában [1][11], Svédországban [12][13], a Német Szövetségi Köztársaságban [29][33], a Német Demokratikus Köztársaságban [14][22] és Japánban [38]. Magyarországon a Gépipari Technológiai Intézetben (Czeplédi Istvánné) [7][8][9][10] és a Villamos Ipari Kutatóintézetben (Szalay András, Bérczes Imre, Puskás József) [31], továbbá a Budapesti Műszaki Egyetemen (dr. Susánszky Zoltán) [35][36][37] folytak kutatások, fejlesztések.

A ROBBANÁS MINT ANYAGFORMÁLÓ ERŐ

A robbanóanyagok jellemzői

A kémiai robbanás eredményeként, egy nagysebességű reakció során, hirtelen (százezred másodperc alatt), nagy hőfejlődés mellett, nagymennyiségű gáz képződik. A magas hőmérsékleten a gázok kitágulnak, a levegőben egy lökéshullámot generálva. Ennek energiáját használják fel – többek között – a fémalakító –megmunkáló robbantások során is.

A folyamat nagyságrendjét érzékeltetik orosz szerzők művükben⁶: egy kilogramm TNT⁷ (melynek a térfogata $6,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$) robbanása során, mely 10^{-6} másodperc alatt megy végbe, mintegy 3000°C hőmérsékletű gáz képződik. Ez a gáz mely normál, 0°C hőmérsékleten $8,4 \text{ m}^3$ térfogatú lenne, a jelzett magas hőmérséklet hatására, hirtelen kitágul. Az ideális gázokról szóló Boyle-Mariott törvény alapján, a robbanási termékek nyomása ilyen paraméterek mellett egyenlő $1,3 \text{ GN/m}^2$.

Mynors és Zhang ennél is magasabb értékeket közöl, mikor a magas és közepes hatóerejű brizáns robbanóanyagok alkalmazásának előnyeit mutatják be a robbantásos fémalakítási technológiákban: a dinamit, nitropenta, trotil és hexogén robbanóanyagokat említve, $13,8\text{--}27,6 \text{ GN/m}^2$ nyomás értékről írnak [43]. Ez a nyomás érték a másodperc milliomod része alatt keletkezik, és hatalmas erejű lökéshullámként hatva a környezetében, az útjába kerülő akadályokat szétzúzza, vagy deformálja. A robbanóanyag jellemzői, a töltet alakja, a céltárgy távolsága és annak anyag-jellemzői fogják meghatározni, hogy ez a lökéshullám pusztítani, vagy csak számunkra ideális módon formálni fog?

Az 1. táblázatban néhány robbanóanyag, robbantásos fémmegmunkálás szempontjából fontos adatát mutatjuk be.

Robbanóanyag	Töltet típusa	Deformációs sebesség [m/s]	Energia [J/g]	Nyomás [GPa]
Trotil	öntött	7010	780	16
Hexogén	préselt	8382	1265	23
Nitropenta	préselt	8290	1300	22
Pentolit (50/50)	öntött	7620	945	20

1. táblázat Robbanóanyagok és jellemzőik⁸

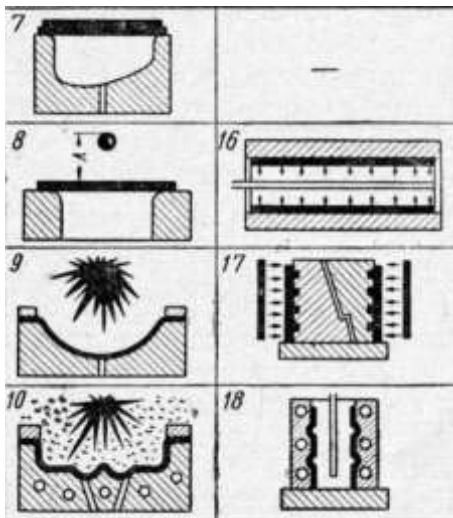
⁶ KRUPIN, A. V. – SZOLOVJOV, V. J. – SEFTEL, N. I. – KOBELJOV, A. G.: Deformácija metalov vzrivom, Metalurgia, Moszkva, 1975. p. 9.

⁷ trotil – közepes hatóerejű, brizáns robbanóanyag

⁸ Daehn, G. S.: High Velocity Metal Forming, ASM Handbook, Volume 14B, Metalworking: Sheet Forming, ASM International, 2006. p. 410. I. táblázat alapján

A fémalakító robbantási technológia alapjai

A brizáns robbanóanyagok segítségével végrehajtott fémalakítást lehetőségeit mutatja be a 2. ábra.



2. ábra Robbantásos fémmegmunkálási eljárások⁹

Az ábra baloldalán a sík lemezek, jobboldalon pedig fémből készült térbeli alakzatok robbantásos formázási lehetőségei láthatók.

A 7. számmal jelzett kis ábra a fémlemezen elhelyezett kontakt (szabadon felfektetett) töltet hatását szemlélteti. Ebben az esetben, a céltárgyra, mintegy $147,1 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ nyomás hat. A deformálódás mértékét, a robbanóanyag-réteg vastagságának változtatásával érhetjük el. A módszer hátránya (nem számolva a nagymennyiségű robbanóanyag szükségletet), hogy már minimális robbanóanyag többlet is, a munkadarab sérülést, rongálódását eredményezheti. A kontakt (ráhelyezett) töltetekkel, a fémlemezek robbantásos plattírozásában érhetünk el kiváló eredményeket, a fémalakításban kevésbé hatékonyak.

A további alkalmazásoknál, a töltet nem érintkezik a céltárggyal, attól pontosan meghatározott távolságban helyezkedik el. A kutatók vizsgálták, hogy a robbanási lökeshullám mely közegek alkalmazásával végzi a legtokéletebb alakítást.

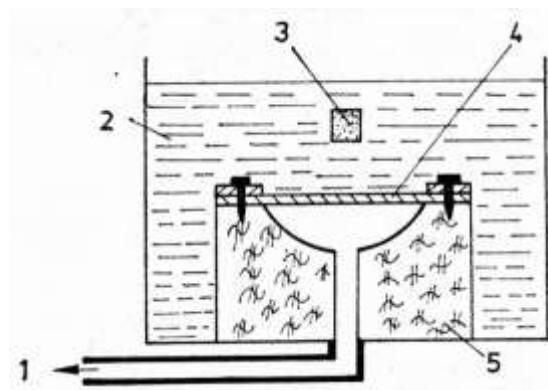
A 8. és a 16. kis ábrákon, a töltet és a céltárgy között csak levegő van. A kísérletek azt igazolták, hogy a gáztermékek alakító képessége ebben az esetben sem éri el, a 9. és 17. kis ábrákon szemléltetett módszerét, mikor a robbanási nyomást, folyadékok segítségével közvetítették a lemezre.

A folyadékokban végrehajtott robbantásos fémalakítás technológiája, bár az előkészítő munkákat tekintve hosszadalmasabb, mint egy présgéppel végzett megmunkálás, az alkalmazott anyagokat tekintve viszonylag egyszerű. A hagyományos sajtolóiparban alkalmazott többrészes, bonyolult és költséges szerszámok helyett, az alakító forma (matrica), csak egy aktív elemből áll, és tulajdonképpen, a késztermék negatív formája. Ennek alapanyaga, a kis darabszámú gyártás esetén lehet akár műanyag, vagy beton is (a munkadarab jellegétől függően).

Síklemezek robbantásos alakításakor, a matrica felső síkjára, hermetikus tömítés segítségével

⁹ ПИХТОВНИКОВ, Р. В. – ЗАВЯЛОВА, В. И.: Stampovka lictovova Metala vzrivom, Masinoszroenyie, Moszkva, 1964. p. 19. 5. sz. ábra alapján

illeszkedik a kiinduló lemez, melyet a végtermék formájának megfelelő, úgynevezett rántartó rögzít a formához. A rántartó akadályozza meg, hogy a lemez a robbantási folyamat során károsan deformálódhasson. A munkavégző robbanóanyagot, a kalkulált mennyiségben és meghatározott formában, a lemez fölé helyezik, majd az egész berendezést egy vízzel teli medencébe süllyeszti (lásd a 3. ábrát). A folyamat kiegészülhet, a lemez és a matrica közötti térből, a levegő kiszivattyúzásával.



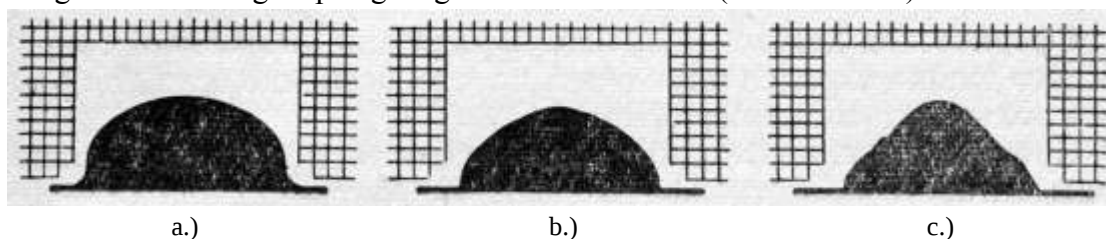
3. sz. ábra: Robbantásos lemezalakítás folyadék közegben¹⁰

1 – vákuumszivattyú; 2 – víz; 3 – robbanóanyag; 4 – alakítandó lemez; 5 – forma (matrica)

A robbantás következtében, a keletkező gáztermékek a környező víztömegben, egy nagy sebességgel haladó, 100-3000 atmoszféra csúcsnyomású hullámfrontot hoznak létre, mely a lemezt több száz m/s sebességre gyorsítja fel, és mintegy „belelövi” a szerszám alakító terébe. Ilyen sebesség mellett a lemez, beleütközve a matricába, annak legkisebb részletét is teljesen kitölti. [35]

A kutatók vizsgálták a robbanóanyag-céltárgy optimális távolságát, és a robbanási energiát közvetítő folyadékok terén is próbálták a legideálisabbat megtalálni.

A robbanóanyag-céltárgy közötti távolság meghatározásánál, az egyik kísérlet során alumínium öntvény céltárgytól robbantottak gömb alakú, plasztikus robbanóanyagból készült töltetet, 13-25-38 milliméter távolságban. A 25 mm távolságban elhelyezett töltet tökéletesen kialakította a lemezből a matrica által kínált formát. 38 mm távolságból az alakítás nem volt tökéletes, a legkisebb távolságnál pedig megsérült a munkadarab (lásd a 4. ábrát).



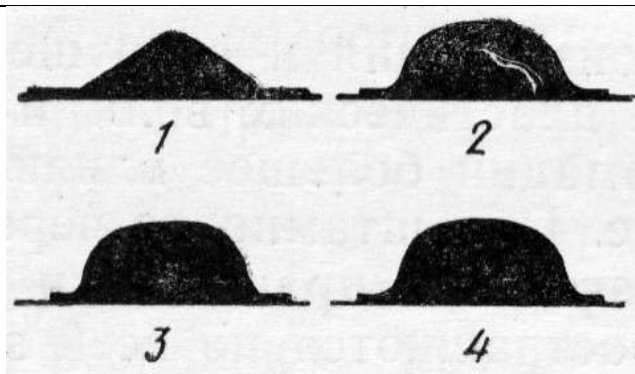
4. ábra Alakítás a robbanóanyag-céltárgy távolság függvényében¹¹

a.) 25 mm távolság; b.) 38 mm távolság; c.) 13 mm távolság

A közvetítő közeget vizsgálva, azonos céltárgy, robbanóanyag és töltet-céltárgy távolságot alkalmazva, levegő, víz, kerozin és glicerín alkalmazásával hajtották végre a robbantást (lásd az 5. ábrát).

¹⁰ Dr. Bohus-Horváth-Papp: Ipari robbantástechnika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983. p. 57., 2.30. ábra

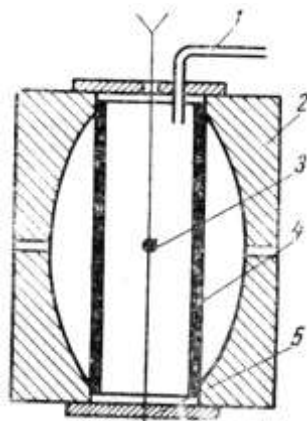
¹¹ ПИХТОВНИКОВ, Р. В. – ЗАВЯЛОВА, В. И.: Stampovka lictovova Metala vzrivom, Masinoszroenye, Moszkva, 1964. p. 133. 67. sz. ábra alapján



5. ábra: Kísérlet a robbanási hatást közvetítő közegre¹²
1 – levegő; 2 – víz; 3 – kerozin; 4 – glicerín

A kísérlet egyértelműen alátámasztja korábbi megállapításunkat, mely a levegő, mint robbanási nyomást közvetítő közeg nem optimális voltát jelezte.

Térbeli kiinduló alakzat robbantásos formázása során, a síklemezeknél alkalmazott medence szerepét, maga a formázandó tárgy veszi át (lásd a 6. ábrát).



6. ábra: Térbeli alakzat robbantásos formázása¹³
1 – vízcső; 2 – matrica; 3 – robbanóanyag töltet; a formázandó cső (céltárgy); 5 – alátét (záró) lemez;

A robbanóanyag által keltett lökeshullám, mint fémalakító „szerszám” hatásmechanizmusáról, dr. Susánszky Zoltán az alábbiakat írja egy 1984-es tanulmányában:

„A robbantótechnológia területén végzett kutatások ma elsősorban az energiaátvitel mechanizmusának a mélyebb feltárására irányulnak. Az eddigi eredmények alapján ugyanis joggal feltételezhető, hogy az eljárás számos nyitott kérdése és nehezen irányítható részfolyamata az alakító-impulzus sajátosságainak megismerésével megválaszolható, illetőleg irányítható lesz.

A kutatóknak e téren fel kell adniuk a szokásos technikai szemléletet és nagyságrendeket, mert ezekben a folyamatokban a nagy nyomások és igen rövid időtartamok fizikájának a törvényei érvényesek. Az alakításnál használatos ún. brizáns robbanóanyagokban ugyanis a detonáció során 100 000-300 000 atmoszférás nyomások uralkodnak, melyek még a környező

¹² KRUPIN, A. V. – SZOLOVJOV, V. J. – SEFTEL, N. I. – KOBELJOV, A. G.: Deformácija metalov vzrivom, Metalurgia, Moszkva, 1975. p. 353., 176. ábra alapján

¹³ PIHTOVNYIKOV, R. V. – ZAVJALOVA, V. I.: Stampovka lictovova Metala vzrivom, Masinoszroenyie, Moszkva, 1964. p. 122. 62. sz. ábra alapján

közegben is 200-4000 atmoszférás lökéshullámot indukálnak. Ilyen nyomásintervallumban nem érvényes pl. a folyadékok összenyomhatatlanságának a törvénye sem; a hullámok sűrűsödési frontok formájában jelennek meg. Az epicentrum környezetében a lökéshullámok a vízre jellemző hangsebesség (1500 m/s) többszörösével futnak szét, így érthető, hogy az alakítandó lemezt a földi gravitáció ($9,81 \text{ m/s}^2$) több tízezerszeresével gyorsítják fel.

Ilyen gyorsulások és tömegezők esetén elképzelhetők olyan rendkívül gyorsan lejátszódó reverzibilis fémfizikai folyamatok, amelyek megmagyaráznák a legellenállóbb fémek csak robbantásnál meglévő kedvező alakítási sajátosságait.”¹⁴

Robbantásos fémmegmunkálással kapcsolatos szakirodalom Magyarországon

A robbantásos fémalakítás súlypontja ma már a kutatóhelyek falai közül, az iparszerű gyártás területére került át. Ennek megfelelően átalakultak az ismeretszerzés és –közlés lehetőségei és formái is. Az 1960-as és 1970-es években megjelent szakkönyvek, tanulmányok részletes számítási eljárásokat és technológiai módszereket mutattak be (lásd pl. [17][28]). Ma, mikor a robbantással formázott fém alkatrész kísérleti mintadarabból, egyfajta technikai kuriózumból termékké vált, akkor elsősorban piackeresési, piacszerzési ismertetőkkel találkozunk az irodalomkutatást végző.

Hazánkban egyedülként az S-Metalltech 98 Anyagtechnológiai Kutató-fejlesztő Kft-ben dolgozó szakemberek folyatták tovább a korábban, a Villamos Ipari Kutató Intézetben megkezdett ez irányú munkát. Az ő elméleti felkészültségüket és gyakorlati tapasztalataikat kivéve, a kérdés iránt érdeklődők, csak szakirodalom kutatással juthatnak információkhoz.

Az Internet korában az információszerzés lehetőségei, korábban elképzelhetetlen szintre emelkedtek – a fent jelzett korlátokkal. Vagyis az érdeklődés felkeltésére, alapfokú ismeretek szerzésére megfelelnek a világhálón megtalálható és letölthető anyagok, de aki szakmailag mélyebb információra vágyik, az innen kevés segítséget kap. De akkor hol kutasson a robbantásos fémmegmunkálás iránt érdeklődő?

A választ keresve, meglepődve tapasztaltuk, hogy a leginkább kézenfekvőnek tűnő Országos Műszaki Könyvtárban csalódás fog érni bennünket. Egy 1973-ban kiadott Robbantástechnika ajánló bibliográfia [32] az, egyébként összességében is szegényesnek tekinthető 437 tételből, szakkönyvek között egyetlen, ezzel a témával foglalkozó alkotást sem említ. A konferencia kiadványok között bukkanunk az egyedülként fellelhető kiadványra, az 1970-ben, Máriánské Láz né-ben tartott, Robbantásos plattírozás témájú szimpózium anyagára. Pedig lett volna mit beszerezni, a kutatni vágyók elé tárni ebben az időszakban is. Erre példa, a ma Nemzeti Közszerológati Egyetem (korábban Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem), Tudományos Könyvtára, Mueller Othmár Robbantástechnikai Külön-gyűjteménye.

Dr. Mueller Othmár (1932-2002), mint az Építéstudományi Egyesület, Robbantástechnikai szakbizottságának alapítója, és haláláig vezetője, továbbá az Igazságügyi Műszaki Szakértői Intézet igazgatója, a polgári esetek robbantásos szakértésén kívül, a bűnös célú és terrorista

¹⁴ Dr. Susánszky Zoltán: Robbanóanyagok alakítják a fémeket, a 18. hazai építőipari (bányászaton kívüli) robbantástechnikai konferencia (Nagykanizsa, 1984. október 10.) előadásainak és ismertetőinek összefoglalói, Az Igazságügyi Műszaki Szakértői Intézet (IMSZI) 1984/17. közleménye, egyben az ÉTE Robbantástechnikai Szakbizottsága 285. sz. közleménye, Budapest, 1984. p. 8.

robbantások területét kutatta¹⁵. 1969-től kezdődően, minden anyagi támogatás nélkül, levelezés, sok munkával kiépített kapcsolatok révén létrehozta, az Európában egyedülálló Robbantástechnikai szakkönyvtárat. A mintegy 26 ezer kötet, az 1800-as évek közepétől felöleli a világ számos országában megjelent, robbanóanyagokkal, robbantástechnikával foglalkozó könyveket és tanulmányokat, kiegészítve a mintegy 30 ezres cikkgyűjteménnyel, sok ezer prospektussal és több mint 100 videokazettán lévő szakfilmmel.

A katonai felsőoktatásban oktatóként, továbbá a Nemzetvédelmi Egyetem Doktori Iskoláján tudományos értekezések műhelyvitáin, majd a Katonai Műszaki Doktori Iskolán tantárgyfelelősként közreműködött. Nyugdíjas éveiben kezdett foglalkozni a könyvtár további sorsával, és végül is végakarataiban a Magyarországon, szervezett oktatás formájában jelenleg legmagasabb szinten robbantástechnikával foglalkozó tanintézetnek ajánlotta fel a szakkönyvtárát, a Nemzetvédelmi Egyetemnek. Egyetlen kikötése az volt, hogy a Központi Könyvtár részeként, de önálló gyűjteményként maradjon meg. [19]

Mueller Othmár nem csak gyűjtötte, hanem katalogizálta is gyűjteményét, bibliográfiai gyűjteményeket [25][26][27], a robbantástechnika különböző területeiről szakcikk jegyzékeket állított össze, ezzel is segítve a könyvtárában kutatók munkáját. Nyugodtan állíthatjuk, hogy ma Magyarországon ebben a könyvtári (ma már) külön-gyűjteményben található a legnagyobb, robbantásos fémmegmunkálással foglalkozó könyv és szakcikk kollekció. Az Igazságügyi Műszaki Szakértői Intézet 1984/8. sz. közleményeként megjelent, a Robbanásos fémmegmunkálásra vonatkozó szakcikk jegyzék 100 könyvet, 189 szakcikket és 33 egyéb a témába vágó prospektust, egyéb ismertető anyagot sorol fel [24]. A gyűjtemény természetesen tovább bővült Mueller Othmár 2002-ben bekövetkezett haláláig.

Eredeti helyén, könyvtári rendszerben feldolgozva, csoportosítva voltak elhelyezve a könyvek és egyéb írásművek. A költözést követően, a Nemzetvédelmi Egyetem Központi Könyvtára hozzákezdett az anyag elektronikus formában való katalogizálásához, egy 2003-ban elnyert pályázat segítségével. Sajnos az anyagi források kimerülésével ez a munka félbe maradt, így a téma iránt érdeklődő kutatók feladata, hogy a hatalmas gyűjteményből előkeressék, újból rendszerezzék ezeket a műveket. A Nemzetvédelmi Egyetem és az Óbudai Egyetem által 2011 őszén közösen elnyert TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 pályázat, Nagy energia sebességű alakítások alprogram, Robbantásos fémmegmunkálás kiemelt kutatási terület keretében dolgozó kollégák, többek között ezt a munkát is elvégezni tervezik a program kétéves időtartama alatt.

Robbantásos félalakítás, gyártás üzemi körülmények között

A tanulmány elején említettük, hogy többek között a robbanásos félalakítás egyik nagy előnye a préseléses formálással szemben, a nagyméretű berendezések elhagyása, a gyártás viszonylag csekély anyagi költsége.

¹⁵ Kandidátusi disszertációját is ebből a témából védte meg sikeresen 1995-ben, a Zrínyi Miklós Katonai Akadémián

A fémalakítás technológiáit, azok jellemzőit foglalja össze a 2. táblázat¹⁶

Alakító eljárás	Korlátok	Az anyag alakulása
Robbantásos alakítás	Nem korlátozott: a robbanóanyagok tömege és alakja tetszőleges lehet	A fém pontosan felveszi a szerszám alakját. A kiindulási lemezalak optimalizálható
Sajtolás/mélyhúzás	A lemez vastagsága és mérete a prés méretétől és kapacitásától függ. Maximum 3x2 m, nagy prések esetén. 10 mm-nél vastagabb acélok esetén kis mélységű üreges alakok. Sajtolás előtti hevítés segíti a méret- és vastagságnövelést	A fémanyag két szerszám-fél között van sajtolva. A fém a mozgó szerszám-fél nyomja meg.
Nyújtó alakítás	Nagy, sekély mélységű üreges formák vékony lemezből (< 5 mm)	A fémlemez két ellentétes oldalán rögzítve van, az alakadó szerszám felett. Az anyag a végleges alak eléréséhez helyenként erősen nyúlik.
Szuper képlékeny alakítás	Nagy mélységű üreges formák, éles részletekkel	A szuper képlékeny fém a hevítik és nagyon lassan sajtolják a végső alakra, folyadék vagy gáznyomással. Az anyag csak ott folyik, ahol nem érintkezik a szerszámmal, következésképpen erősen elvékonyodik.
Domborítás (tányérnyomás)	Nagyméretű sekély üreges alakok vastag lemezekből. Nem szimmetrikus alakok is létrehozhatók, de nehezen	A fémlemez különböző pontjait többször egymás után megnyomják, míg a végső görbületet eléri

2. táblázat Fémalakító technológiák jellemzői

A 3. táblázatban a különböző fémalakítási eljárások költség vonzatait és a termék jellemzőit mutatjuk be¹⁷

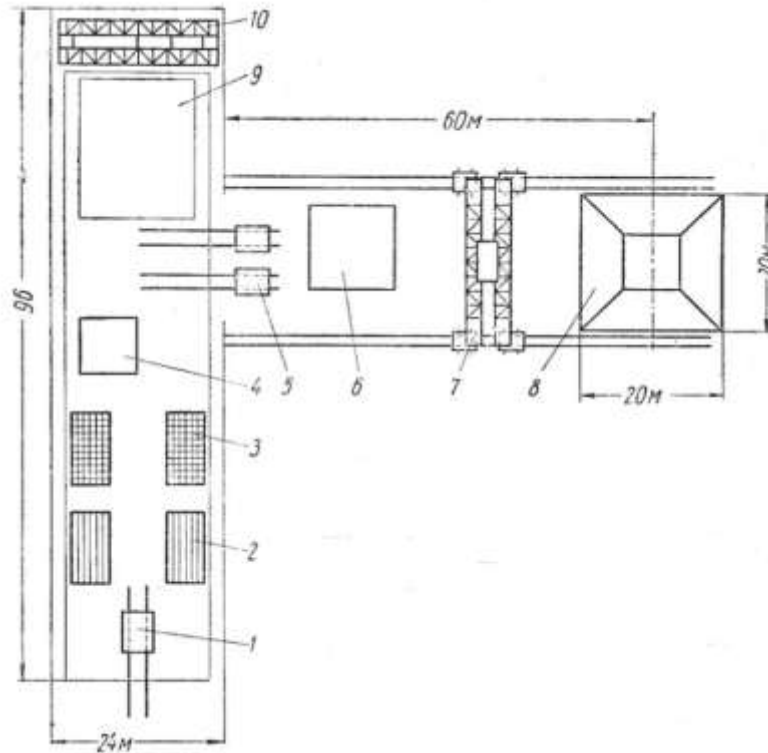
Technológia	Költségek		Gyártmány tulajdonságok		
	beruházás	gyártási költségek	pontosság	vékonyodás	nyúlás
Alaknyomás	+	+	-	--	-
Gumi sajtolás	+	+	o	o	+
Hidraulikus alakítás	+	+	o	+	+
Robbantásos alakítás	+	-	+	+	+
Sajtolás/mélyhúzás	--	++	o	-	o
Nyújtó alakítás	o	-	++	-	o
Szuper képlékeny alakítás	-	--	+	--	o
Domborítás (tányérnyomás)	++	o	--	o	o

3. táblázat Fémalakítási eljárások a költségek és a gyártmány tulajdonságai tükrében + = jó; - = rossz

Végezetül a gyakorlati megvalósíthatóságra mutatjuk be az irodalomjegyzék [28] számú anyagában található, robbantásos fémalakító „üzem” vázlatát, a 7. ábrán. A munkaterületen egy vegyipari gépgyártó vállalat részére készítettek nagyméretű tartályfenekeket, robbantással (a maximális átmérő 3,5 m, a formázandó fémlemez vastagsága 10 mm és e fölött). Robbanóanyagként robbanózsinórt alkalmaztak, megfelelő formában elhelyezve a munkalemezen.

¹⁶ Az irodalomjegyzék [45] sz. anyaga alapján

¹⁷ Az irodalomjegyzék [45] sz. anyaga alapján



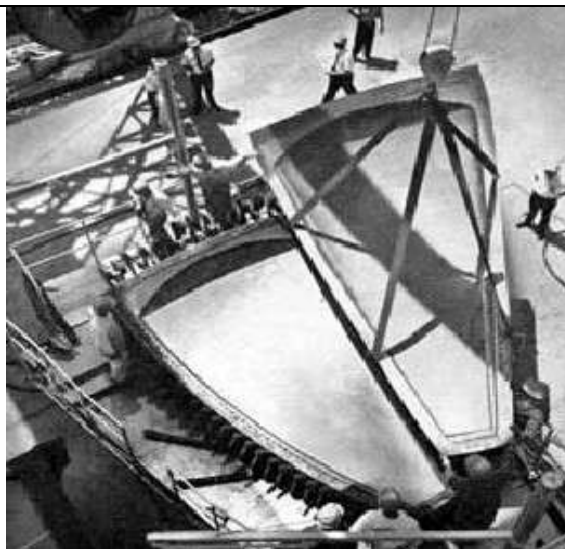
7. ábra Robbantásos fémalakító munkahely vázlata¹⁸

1 és 5 – villamos targoncák; 2 és 3 – anyag előkészítő munkaállomások (hegesztés, szabás); 4 – előkészített munkadarab tisztítás; 6 – matrica előkészítés; 7 és 10 – hídaru; 8 – robbantó medence; 9 – a munkadarab matricába helyezése.

ROBBANTÁSOS FÉMMEGMUNKÁLÁS ÉS A REPÜLÉS

Az 1950-es és 1960-as években, a robbantásos fémmegmunkálás fejlesztésének motorja a repülőipar volt. Az 1960-as években csak az USA kormánya több mint 80 fejlesztési programot futtatott párhuzamosan ebben a témában. A North American Aviation fejlesztésében, robbantással készült alkatrészeket használtak fel a Mercury, a Gemini és az Apolló űrrakéták gyártásakor. Ugyancsak robbantással alakították ki a Saturn indítórakéta első fokozatához a 10 m átmérőjű hajtómű fűvócső egységeket (lásd a 8. ábrát). Ezt a technológiát alkalmazta a cég az USA ballisztikus rakéta programjaiban is.

¹⁸ ПИТОВНИКОВ, Р. В. – ЗАВЯЛОВА, В. И.: Stampovka lictovova Metala vzrivom, Masinoszroenyie, Moszkva, 1964. p. 165. 81. sz. ábra alapján



8. ábra Saturn V indítórakéta 10 m átmérőjű alkatrésze¹⁹

A NASA megrendelésére repülőgépek és rakéták üzemanyag ellátó rendszereinek csatlakozó elemeit alakították ki robbantással ötvözött acélcsövekből, a repülőgép ipar számára pedig hangtompító csőidomok készültek ezzel a technológiával austenites acélcsövekből.

Az Aerojet Corporation 1,37 m átmérőjű rakéta hajtómű fűvócsövet robbantott 3,175 mm vastagságú nagyszilárdságú acélból (lásd a 9. ábrát), alumínium ötvözetből pedig 3,05 és 1,52 m átmérőjű fűvócsövet robbantottak, a US Air Force rakétafejlesztési programjához. [42][43]



9. ábra Rakétahajtómű robbantással kialakított harangja²⁰

¹⁹ Ghizdavu, V. – Marin, N.: Explosive forming – economical technology for aerospace structures, INCAS BULLETIN, Volume 2, Number 4./2010., p. 108. Fig. 1. alapján

A US Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) is nagyarányú kutatásokat hajtott végre az 1960-as években, a robbantásos fémmegmunkálási technológiai terén. Az eredmények a költségtakarékos fém és fémötvözet alakítás terén jelentkeztek, melyek azonnal gyakorlati alkalmazásra is kerültek, a Védelmi Minisztérium különböző programjaiban. Robbantásos fémalakítási technológiával készült az SR-71 „Blackbird” után-égető gyűrűje és így formázták a gép titánból készült törzs-lemezének bizonyos részeit is (10. ábra). Ugyancsak e technológia eredményei voltak a P-3 Orion repülő borítása, harcászati rakéták hajtómű fűvőcsövei, vagy a turbina motorok hővédő pajzsai. A DARPA a 20. század utolsó éveiben is aktívan dolgozott a robbantásos fémmegmunkálási technológiák fejlesztésén. Az USA Védelmi Minisztérium igényei alapján 19 kutatásuk folyt ezzel kapcsolatban. [41][42][43]



10. ábra SR-71 „Blackbird”²¹

A kutatás-fejlesztésekbe az 1970-es években egyre több európai ország kapcsolódott be (a volt Szovjetuniót nem is említve – a tanulmány elején utaltunk rá, hogy kezdetektől az USA és ez az ország járt élen az ez irányú fejlesztésekben, csak a szovjet rakéta és katonai repülőgép gyártás eredményei kevésbé voltak publikusak).

Például a holland TNO Prins Maurits Laboratorium, alumínium ötvözetből 2,7*1,5 m-es panelt robbantott a Saturn V rakétához, és 1,8*0,5 m-es hullám-alakban formázott panelt sugárhajtású repülőgépekhez (11. ábra). De készítettek titán ötvözetből helikopterhez csővéget, vagy sugárhajtású repülőgéphez ajtó-panelt is. [42][43]

²⁰ uo. Fig. 2 alapján

²¹ Foto Lukács László, Imperial War Museum, Duxford, Nagy-Britannia



11. ábra Alumínium ötvözet, hullám-alakzatra robbantott repülőgép panel²²

A fejlesztések ma is folynak, melyet – befejezésként – egy példával igazolunk. Az ugyancsak holland 3D-Metal Forming cég, az R&D által folyó Airbus programban, robbantással kialakította a repülőgép pilótafülkéjének tetejét (lásd a 12. ábrát). A cég vezetője a fejlődést érzékelte elmondta, hogy amíg 2005-ben, maximum 15 mm vastagságú fémeket voltak képesek robbantással formálni, addig ma már a 0,3 mm-es alumíniumtól, a 6 cm-es vastagságú acéllemezig terjed a skála. Mindezt 10*2 m-es méretig képesek előállítani. [44]



12. ábra Airbus robbantással formált pilótafülke-része [44]

TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

The project was realised through the assistance of the European Union, with the co-financing of the European Social Fund.

²² Uo. Figure 7. alapján

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ALTING, L.: Hojeffektform giving at metaller (Fémek robbantásos alakítása), Lyngby, Denmarks Tekn. Hojskloe, AMT, 1967. 16 p.
- [2] BABUL, W.: Odkosztalcanie metali wybuchem (Robbantásos fémalakítás), Warszawa, WNT, 1980. 378 p.
- [3] BERANEK, J.: Tváreni vybuchem (Robbantásos alakítás), Praha, Práce, 1964. 48 p.
- [4] BLAZYNSKI, T. Z. – SEWAILEM, M. R.: Air cushion effect int he explosive forming of metal sheet – L., E. F. Southend., 1969. 8 p. (Repr. The Engineer, Jan. 10. and 17. 1969.)
- [5] BLAZYNSKI, T. Z.: Scaling problems int he development of the free implosive forming of rootes blower impellers – Oxford, Pergamon Press, 1970. 15 p. (Repr. 10th Intern. Machine Toll Design and Res. Conf. Proceedings, 1969.)
- [6] BLAZYNSKI, T. Z. (ed.): The use of high-energy rate methods for forming, welding and compaction – Leeds, The University of Leeds, 1973. rep. p. (Papers presented at a confernce, 27-29. March, 1973.)
- [7] CZEGLÉDI, G.: A robbantásos lemezalakítás fejlesztésének újabb eredményei, Budapest, GTI, Gyártástechnológia, 1976. XVI. évf. 8. sz., pp. 369-371.
- [8] CZEGLÉDI, G. – GÖBL N.: Nagysebességű lemezalakító eljárások,- Budapest, GTI, Gyártástechnológia, 1972. XII. évf. 7-8. sz., pp. 329-335.
- [9] CZEGLÉDI, G.: Robbantásos illesztések, sajtolások, Budapest, 15. hazai építőipari robbantástechnikai konferencia előadásai, 1981. 3 o.
- [10] CZEGLÉDI, G.: Robbantásos fémalakítás minőségi értékelésének szakértői kérdései, Budapest, 3. Építőipari robbantástechnikai kollokvium, ÉTE, 1983. 2 o.
- [11] EGLY, N. S.: Explosions formgiving – Lingby, Danmarks Tekniske Hojskole, Afdelingen for Mekaniks Teknologi, 1970. 40 p.
- [12] ENHAMRE, E.: Effects of underwater explosions on elastic structures in water – S., AB. H. Lindstahls, 1954. 79 p. (Kungl. Tekniska Högskolans Handlingar serie No. 82.)
- [13] GRANSTRÖM, S. A.: Loading characteristics of air blasts from detonating charges – S. AB. H. Lindstahls, 1956, 93 p. (Kungl. Tekniska Högskolans Handlingar serie No. 100.)
- [14] Herstellung von Blechachstragkörpern getriebener Achsen für Kraftfahrzeuge unter Anwendung der Explosivumformung (Gépkocsi hátsó hidak robbantásos alakítása), Ludwigsfeld, VEB IFA. Automobilwerke, 1977. 10 o.
- [15] HOLTZMAN, A. H. – COWAN, G. R.: Bonding of metals with explosives – NY. Welding Res. Council, 1965. 21 p. (WRC Bulletin 104-Apr. 1965.)
- [16] HOLTZMAN, A. H. – COWAN, G. R.: Response of metals to high velocity deformation, Interscience Publ. New York, 1961. No. 4. pp. 447-456.
- [17] KRUPIN, A. V. – SZOLOVJOV, V. J. – SEFTEL, N. I. – KOBELJOV, A . G.: Deformácija metalov vzrivom, Metallurgia, Moszkva, 1975.
- [18] KUSZCZAK, A.: Wybrane zagadnienia tloczenia wybuchowego. Proba okreslenia współczynnika stateczności obrzeza (A robbantásos sajtolás különleges problémái. A szegélyállóság együtthatója meghatározásának kísérlete), Warszawa, Biul. IMP., 1965. ápr. szám, pp. 69-74.
- [19] DR. LUKÁCS László: A ZMNE Központi Könyvtár, Dr. Mueller Othmár Robbantástechnikai Különgyűjteménye, Műszaki Katonai Közlöny 2006/1-4. összevont szám, Budapest, pp. 135-142.
- [20] MALENTOVITZ, R.: Zastosowanie Metody tlaczenia wybuchowego (A robbantásos sajtolási módszer alkalmazása), Biul. IMP, Warsawa, 1963. 4. sz. pp. 18-21.
- [21] MEYERS, Marc A. – MURR, Lawrence E.: Shock Waves anf High-Strain-Rate Phenomena is Metals, Plenum Press, New York and London, 1981. (szerkesztette EPSTEIN, G. N.: Udarnoe volni i javlenyija viszokoprocnoj deformácii metalov, Metalurg, Moszkva, 1984.)
- [22] MEYER, G. – SCHWALBE, M.: Anwendungsmöglichkeiten der Explosivum-formung (A robbantásos alakítás alkalmazási területei), NDK, Fertigungstechnik und Betrieb, 1970. 20 k., 3. sz. pp. 156-158.
- [23] MICO, A.: Une technique détonante de travail des métaux (Robbantásos fémalakítási módszerek), Paris, Industries et Techniques, 1973. 233. k. pp. 11-12.
- [24] DR. MUELLER, O. – MATYE Béláné: A robbantásos fémmegmunkálásra vonatkozó, az igazságügyi műszaki szakértői gyakorlatban felhasználható szakcikkek jegyzéke, Igazságügyi Műszaki Szakértői Intézet közleményei, 1984/8. szám, Budapest, 24 p.
- [25] DR. MUELLER Othmár.: A világ robbantástechnikai és ipari robbantóanyagokkal foglalkozó könyveinek és

- egyedi kiadványainak bibliográfiája 1850-1983. I. kötet, 5. átdolgozott kiadás, az Igazságügyi Műszaki Szakértői Intézet 1983/1. sz. közleménye, pp 1-95.
- [26] DR. MUELLER Othmár.: A világ robbantástechnikai és ipari robbantóanyagokkal foglalkozó könyveinek és egyedi kiadványainak bibliográfiája 1850-1983. II. kötet, 5. átdolgozott kiadás, az Igazságügyi Műszaki Szakértői Intézet 1984/2. sz. közleménye, pp. 96-209.
- [27] DR. MUELLER Othmár.: A világ robbantástechnikai és ipari robbantóanyagokkal foglalkozó könyveinek és egyedi kiadványainak bibliográfiája 1850-1983. III. kötet, 5. átdolgozott kiadás, az Igazságügyi Műszaki Szakértői Intézet 1984/10. sz. közleménye, pp. 210-335.
- [28] PIHTOVNIYKOV, R. V. – ZAVJALOVA, V. I.: Stampovka lictovova Metala vzrivom, Masinoszroenyie, Moszkva, 1964.
- [29] PRÜMMER, E.: Explosivbearbeitung von Werkstoffen (Fémek robbantásos megmunkálása), NSZK, Z. f. Werkstofftechnik, 1973. 4. k. 5. sz. pp. 236-243.
- [30] PEGOUD, J.: Mise en oeuvre des matériaux par explosion (Fémalakítás robbantással), Paris, Machine Moderne, 1973. okt. pp. 15-18.
- [31] PUSKÁS, J. – SZALAY, A.: Robbantásos csőalakítás és plattírozás a Villamosipari Kutató Intézetben, Budapest, 15. hazai építőipari robbantástechnikai konferencia előadásai, 1981. 1 o.
- [32] SÁRVÁRI Györgyné (ed.): Robbantástechnika ajánló bibliográfia, Országos Műszaki Könyvtár és Dokumentációs Központ, Könyvtári Igazgatóság, Budapest, 1973. 80 p.
- [33] SCHINNERLING, J.: Die Explosivformung – eine neue Verfahrenstechnik der Umformung (A robbantásos alakítás – új fémalakítási technika), NSZK, Werkstatt und Betrieb, 1971. 104. k. 3. sz., pp. 183-186.
- [34] SMRCKA, J. – VACLAVEK, M.: Explozivni tváreni plechi a trub (Fémlemezek és csövek robbantásos alakítása) Praha, SNTL, 1964. 84 p. (Kinznice stroy. vyroby 100. k.)
- [35] SUSÁNSZKY Zoltán: Robbanóanyagok alakítják a fémeket, Budapest, Természet Világa, 1971. 10. sz. pp. 449-451.
- [36] SUSÁNSZKY Zoltán: Az energiairányítás a fémek robbantó alakításakor, Haditechnikai Szemle, Budapest, 1969. 3. sz. pp. 98-103.
- [37] SUSÁNSZKY, Z.: A robbantó mélyhúzás energiaközlési folyamatának műszeres vizsgálata – Budapest, BME, 1973. 135 p. (doktori értekezés)
- [38] SZAKURAI, T.: Baku-hacu kako (Robbantásos fémalakítás), Tokio, Nikkan Kogio Sinbunza, 1969. 143 p.
- [39] SZTEPANOV, V. G. – SZIPILIN, P. M. dr.: Gidrovzrivnaja stampirovka elementov szudovih konsztrukcij (Hajószerkezetek robbantásos alakítása), Leningrád, Szudosztrojenie, 1960. p. 290.
- [40] DR. BOHUS, G. – HORVÁTH, L. – PAPP, J: Ipari robbantástechnika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.
- [41] DAEHN, G. S.: High Velocity Metal Forming, ASM Handbook, Volume 14B, Metalworking: Sheet Forming, ASM International, 2006. pp. 405-418.
- [42] GHIZDAVU, V. – MARIN, N.: Explosive forming – economical technology for aerospace structures, INCAS BULLETIN, Volume 2, Number 4./2010., pp. 107-117.
- [43] MYNORS, D. J. – ZHANG, B.: Applications and capabilities of explosive forming, Journal os Material Processing Technology 125-126, 2002. pp. 1-25.
- [44] www.3dmetalforming.com (2012. 02.28.)
- [45] GROENEVELD, Hugo: New frontiers with explosive forming
http://www.aluminiumcentrum.nl/aluminiumcentrum.nl/files/Doc/Congres%202006/module%20d/3-Mr._Hugo_Groeneveld.pdf (2012.03.10.)