

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet
Anyag- és Alakítástechnológiai Szakcsoport



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

ROBBANTÁSSAL ALAKÍTOTT CSÖVEK ÉS VIZSGÁLATUK

Szerző: **Korom Dániel Péter**
mechatronikai mérnöki szak,
III. évfolyam

Konzulens: **Dr. Rácz Pál**
egyetemi docens

Konzulens: **Szalay András**
kutatómérnök

Budapest, 2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3.old
2. Elméleti összefoglalás, képlékeny alakítás	5.old
2.1 Folyási feltétel	5.old
2.1.1 A Tresca-St. Venant folyási feltétel	5.old
2.1.2 A Huber-Mises-Hencky folyási feltétel	5.old
2.2 Alakváltozás mechanizmusa; rugalmas, képlékeny alakváltozás	6.old
2.3 Alakítási szilárdság	7.old
2.4 Az alakváltozás sebessége	8.old
3. A kísérleti munka: a robbantás	10.old
3.1 Robbantásos eljárások	10.old
3.2 Alakítás robbantással	11.old
3.3 A robbantás menete	11.old
4. Alakítás vizsgálata	14.old
4.1 A falvastagság mérése	14.old
4.2 Keménységmérés	16.old
5. További kutatási feladatok	18.old
6. Értékelés, összefoglalás	19.old
7. Köszönetnyilvánítás	20.old
8. Felhasznált irodalom	21.old
9. Mellékletek	22.old

1. fejezet

Bevezetés

Az ember nem tudja élni mindennapjait úgy, hogy ne találkozna naponta többször is olyan tárggyal, használati eszközzel, amit képlékeny alakítással, az anyagtechnológia egyik nagyon fontos területének eljárásával készítettek volna el. Olcsósága és termelékenysége mellett több esetben nem is lehet a kívánt eredményt másként elérni.

TDK dolgozatom során az alakítás egy különleges lehetőségével kapcsolatban vizsgáloztam, amikor a robbantást hívjuk segítségül előgyártmányunk megformázására.

A robbantásos alakítás a nagysebességű anyagalakítások csoportjába tartozik, mellyel igen kedvezően lehet különböző lemezeket, csöveket alakítani, illetve felhasználhatjuk egyéb anyagtechnológiai eljárásokban is.

A technológia az 1940-es években került a kutatók, mérnökök érdeklődésének középpontjába: a Szovjetunióban és az Amerikai Egyesült Államokban a lemezalakításban alkalmazott préseles technológiának igyekeztek alternatívát találni.

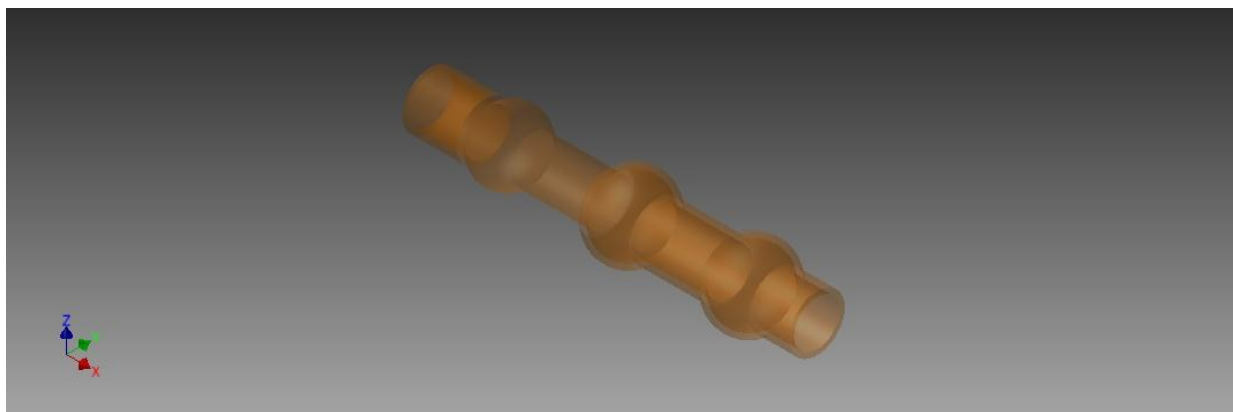
A robbantásos alakítás története azonban ennél több mint fél évszázaddal korábban kezdődött: Angliában 1878-ban Daniel Adamson nagyszilárdságú kazánlemezeket, Claude Johnson nehezen megmunkálható fémeket formázott robbantással.

1889-ben az én kísérletemhez hasonló technikai újdonságból született meg az első szabadalom: fémcsövet tágítottak robbantással [5].

Hazánkban az S-Metalltech 98 Kft. kezdett el foglalkozni a robbantásos csőalakítás lehetőségével: speciális hőcserélőcsövek megtervezésére és kivitelezésére kaptak megbízást a diósgyőri Kohászati Művektől. A cél: egy, a hőátadás hatásfokát megnövelő cső megalkotása volt, speciális formájú dudorok segítségével a lamináris áramlást turbulenssé teszik, így elégtíve ki a jobb hőcsere kívánalmát. (1. kép)

A dudor alakját a Budapesti Műszaki Egyetem Áramlástani Tanszékén végzett különböző szimulációk eredménye segítségével határoztak meg, ezután következhetett a technológia kigondolása, megtervezése, és a szerszám legyártatása.

TDK kutatásom középpontjában egy ilyen körülmények között nyert csövet vizsgáltam, falvastagság- és keménységmérést végeztem rajta.



1. kép

Segítette kutatásomat, hogy bekapcsolódhattam egy, az Óbudai Egyetem és a Nemzeti Közszolgálati Egyetem által közösen elnyert projektbe, mely a nagy energia sebességű alakítás programnévre hallgat. A pályázat során egy különleges szakkönyvtár gondozása is a feladataink közé tartozik:

Dr. Mueller Othmár, az Építéstudományi Egyesület, valamint a Robbantástechnikai szakbizottság alapítója, a robbantások elismert szakértőjének hagyatékáról van szó. Itt a munkán kívül rengeteg hasznos ismerettel gazdagodtam, melyeket dolgozatom készítésénél felhasználhattam. Dolgozatom végén, mellékletként elhelyezem a nagysebességű alakításokkal kapcsolatos, a gyűjteményben megtalálható könyveket.

Dolgozatomat egy elméleti áttekintéssel kezdem, bemutatom az ennél az eljárásnál a figyelem középpontjába kerülő technológiai jellemzőket.

Ezt követően a kísérleti munka: a robbantás ismertetése kerül elő, majd az elvégzett mérések.

Az adatok ismeretében egyre tisztábban tudjuk látni magát a technológiát és ez lehetőséget ad nekünk értékelésre, valamint további kutatási célok kitűzésére.

2. fejezet

Elméleti összefoglalás, a képlékeny alakítás

Fémek képlékeny alakításánál az előgyártmány alakját külső erőrendszerrel változtatjuk meg, miközben a darab térfogata alakítási művelet közben nem változik.

Célunk, hogy a darab a művelet végére egy bizonyos, tervezésnek, üzemeltetésnek, beépítésnek megfelelő alakot vegyen fel, ehhez az alakító erőnek maradó alakváltozásra kell bírnia az előgyártmányt.

Ahhoz, hogy az anyag ezt károsodás, az anyagfolytonosság megszakadása nélkül el tudja viselni képlékeny állapotba kell hozni.

2.1 Folyási feltétel

Folyási (más kifejezéssel, képlékenységi) feltételeknek nevezzük az olyan összefüggéseket, amelyek megadják a feszültségek valamennyi olyan kombinációját, amelyek bekövetkezésekor a képlékeny (maradó) alakváltozás megindul. A folyási feltételek elemzésekor minden esetben két lényeges dolgot kell vizsgálnunk. Az egyik, hogy a különböző feszültségi állapotokat mikor tekintjük egyenértékűnek (jelen esetben a képlékeny alakváltozás megindulása szempontjából). A másik, hogy ténylegesen mikor következik be a képlékeny alakváltozás.

A képlékenységtanban több folyási elmélet ismeretes: a legnagyobb csúsztatófeszültségi elméleten alapuló Tresca és St. Venant által kidolgozott folyási feltétel, illetve a Huber, Mises és Hencky által eltérő alapelvből kiindulva felállított, de azonos eredményre vezető, ún. Huber-Mises-Hencky féle folyási feltétel.

2.1.1 A Tresca-St. Venant folyási feltétel

E folyási feltétel az ún. legnagyobb csúsztatófeszültségi elméleten alapszik. Ugyanis e szerint a folyási feltétel szerint két különböző feszültségi állapot akkor tekinthető egyenértékűnek, ha a legnagyobb csúsztatófeszültségeik megegyeznek és a képlékeny alakváltozás akkor indul meg, amikor a legnagyobb csúsztatófeszültség egy – az adott anyagra jellemző – kritikus értéket elér.

2.1.2 A Huber-Mises-Hencky folyási feltétel

Ezt a folyási feltételt Huber, Mises és Hencky egymástól függetlenül, eltérő alapelvből kiindulva fogalmazták meg, de végeredményét tekintve azonos kifejezésre jutottak. Így ez a folyási feltétel a szakirodalomban e három névvel összefonódva honosodott meg. Az eltérés a kiindulási alapelvben lényegében abban foglalható össze, hogy mit tekintettek különböző feszültségi állapotok egyenértékűségi kritériumaként. Ezek rendre az oktaéderes síkon ébredő csúsztatófeszültségek, a rugalmas torzítási energiák, illetve az ún. nyírási intenzitás azonosságát jelentik. Az oktaéder síkban ébredő csúsztatófeszültségek egyenértékűségi kritériumát elfogadva, tulajdonképpen csak azt a kritikus csúsztatófeszültséget kell meghatároznunk, amelynek elérésekor a képlékeny alakváltozás bekövetkezik [1].

2.2 Alakváltozás mechanizmusa; rugalmas, képlékeny alakváltozás

Az alakváltozás mechanizmusának vizsgálatánál a szilárd testet felépítő elemek alakváltozásának mechanizmusát külön-külön kell vizsgálni. A kristályrács valamely külső erő hatására vagy rugalmasan, vagy képlékenyen változtathatja alakját [4].

Először az anyag a ráható erő következtében rugalmas alakváltozást szenved. Az erőhatás megszűntével visszanyeri eredeti alakját. Az erő a kristályrácsban torzulást okoz: a kristály „elemi sejtje” összenyomódik, ezzel pedig a két sejt közötti távolság csökken. Az atomok egyensúlya (egymásra ható vonó-és taszítóerő) megbomlik, a két szomszédos atomból képzett rendszer energiája megnő. Viszont az egyes atomok azonos atomok környezetében maradnak a műveletek alatt. Megszüntetve az erőhatást az atomok közötti egyensúly helyre áll, a rendszer energiája eredeti szintjére esik vissza, a kristályok alakja az eredeti formát veszi fel.

Növelve az erőhatást az anyag a képlékeny alakváltozás állapotába jut. Ehhez el kell érnie az anyagra jellemző rugalmassági határ. Első jeleként az anyagot alkotó kristályok két része elcsúszik egymáshoz képest, de anélkül, hogy a kristály két része elválna egymástól. Ezt a jelenséget csúszásnak, translációnak nevezzük. Azt a síkot pedig, amely mentén az elmozdulás bekövetkezik csúszási síknak nevezzük. Az a feszültség, amely az első translációt előidézte, a kristály rugalmassági határa. Ha a terhelést tovább fokozzuk egyrészt tovább folytatódik a csúszás az első síkon, de azzal párhuzamos, új csúszási síkok is működésbe lépnek. A transláció feltétele, hogy a működésbe lépő csúszási síkban a kristály anyagára jellemző nagyságú csúsztatófeszültség hasson; ezt a feszültséget kritikus csúsztatófeszültségnek nevezzük [2].

A képlékeny alakváltozásnál bekövetkező csúszások szempontjából azok a kristálytani síkok a legkedvezőbbek, amelyeken a felületi atomsűrűség és a párhuzamos szomszéd síkjuktól

való távolság a legnagyobb. Ugyanez igaz a csúszási irányokra is: képlékeny csúszás olyan irányokban a legkönnyebb, amelyben a lineáris atomsűrűség a legnagyobb.

Csúszás közben az egymáson elcsúszó atomrétegek eltolódása közben végzett munka kis része a relatív mozgásban részt vett atomrendszer energiáját növeli. Ez a réteg keményedését eredményezi.

A kristályok elcsúszásának folyamata során az egyes atomsíkok nem merev testként mozognak, hanem a csúszás a csúszó sík egy vagy több pontján indul meg és terjed végig az egész csúszó síkon. A csúszó síkon így egy határvonal keletkezik, amely elválasztja a megcsúszott területeket azoktól, ahol még a csúszás nem indult meg. Az elcsúszott és el nem csúszott felületeket elválasztó vonalat nevezik diszlokációs vonalnak. A diszlokáció végeredményben egy vonalhiba, melynek közelében az atomok elmozdulnak az ideális kristályban elfoglalt helyükhöz képest. A diszlokációnak köszönhetően legalább 1000-szer kisebb erőre van szükség a képlékeny alakváltozás létrehozásához és fenntartásához a valóságban, mint amik egy rácshiba mentes, teljesen kitöltött rácshelyű kristályszerkezettel rendelkező anyagnál szükséges lenne.

Alakítás közben diszlokációk egymással ütköznek mozgásuk során. E közben kiolthatják, vagy erősíthetik egymást. Ugyanakkor mindig újak és újak keletkeznek és számuk folyamatosan nő az alakítás folyamán [3].

2.3 Alakítási szilárdság

Az alakváltozás hatására a fém mechanikai tulajdonságai, köztük a folyási határ és természetesen a valódi feszültség is változik. Az alakítás sebessége, az alakítandó anyag méretei szintén hatással vannak az alakítási szilárdságra. Az egyfázisú fémek anyagok szilárdságának, keménységének hideg képlékeny alakítás közben való növekedését alakítási keményedésnek nevezzük [2].

Az alakváltozásnak a fémre gyakorolt ezen hatásait meg lehet szüntetni, ha az alakított fémeket kellő ideig megfelelő nagy hőmérsékleten hevítjük. Hevítés után a fémekben sem alakítási feszültség, sem keményedés, sem deformált kristály nincs. Az izzításnak a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását lágyulásnak nevezzük. A lágyulás tehát az alakváltozásnak az alakítási szilárdság növelő hatását szünteti meg. A hőmérséklet növelésével először az alakítási feszültség csökken, ez után következik a lágyulás és az újrakristályosodás.

Melegalakítás során a fém hőmérséklete megegyezik a lágyulás és újrakristályosodás hőmérsékletével. A keményedés, a kristályszerkezet változása, és a velük ellentétes folyamatok a lágyulás és újrakristályosodás melegalakításkor együttesen mehetnek végbe.

2.4 Az alakváltozás sebessége

Az alakítási szilárdság függ az alakítás sebességétől és az alakítás hőmérsékletétől. Általában a sebesség növeli, a hőmérséklet csökkenti mértékét.

Az alakítás sebessége állandó alakítás mellett a következő:

$$\sigma = C \dot{\varepsilon}^m$$

Ahol C egy konstans, m alakváltozási kitevő konstans, az alakváltozás sebessége. A legtöbb fém m értéke szobahőmérsékleten kicsi (0 és 0,03 közötti). A kapcsolat az alakítási szilárdság σ_1 és σ_2 és a két alakváltozási sebesség között a következő:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} \right)^m$$

Vegyük mindkét oldal természetes alapú logaritmusát, ekkor a következő kifejezést kapjuk:

$$\ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = m \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} \right) \quad [1]$$

Alacsony hőmérsékleten, ha a σ_1 értéke sokkal nagyobb, mint σ_2 értéke az egyenlet egyszerűsödik:

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} \cong m \ln \frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} = 2,3 m \log \frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} \quad [2]$$

Például, ha $m=0,01$ növelve az alakváltozási sebességet az alakítási szilárdság csak kicsit változik, körülbelül 2%-ot, emiatt a sebesség hatását itt figyelmen kívül hagyhatjuk. Ezzel együtt a sebesség hatása bizonyos körülmények között fontos lehet, például vékony drót húzásánál, vagy lemez hengerlésekor, ahol az alakváltozási sebesség 10a negyediken/s is lehet.

Az m kifejezésére két módszert használnak. Az egyik folytonos feszültség-alakváltozás görbékből áll, különböző alakítási sebességek mellett és összehasonlítja a feszültség szinteket állandó alakításra a [1] egyenlet szerint.

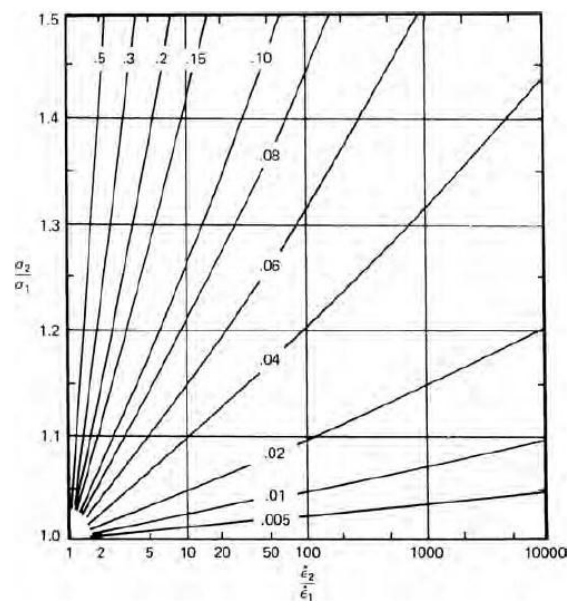
A másiknál hirtelen változtatják az alakítási sebességet a feszültség vizsgálata során, és a megfelelő $\Delta \sigma$ különbséget használják a [2] egyenlethez.

Emelve az alakítási sebességet nagyobb lesz az alakítási keményedés, így alkalmazva a folyamatos feszültség-alakítási görbéket nagyobb m értéket ad, mint a második módszerrel, ami összehasonlítja az alakítási szilárdságot különböző anyagszerkezetekre. A második módszer előnye, hogy különböző alakítási sebesség változásokhoz egyszerű mintát ad. Az anyagalakítási sebesség érzékenysége hőmérsékletfüggő. Melegalakításnál az m érték tipikusan 0,1 és 0,2 közé esik, tehát a sebesség hatása sokkal nagyobb, mint

szobahőmérsékleten. Bizonyos körülmények között m értéke 0,5 és még annál is nagyobb lehet különböző anyagokra.

Az alumínium ötvözetekre és még sok más fémre igaz, hogy van egy minimális m érték szobahőmérséklet közelében és néha negatív értéke is előfordul.

Az alakítási sebességet növelve a diszlokációk gyorsabban mozognak, mint ahogyan az oldott anyagok képesek lennének diffundálni, így a diszlokációk viszonylag oldott anyag-mentesek lesznek [6].



Alakítási sebesség hatása az
alakítási szilárdságra, állandó m értékek mellett

Forrás: [6]

A kísérleti munka: a robbantás

3.1 Robbantásos eljárások

Robbanás során anyagok nagyon rövid idő alatt alakulnak át, amit nagymennyiségű energia felszabadulása kísér. Megkülönböztethetünk fizikai, kémiai és nukleáris robbantást.

Mivel munkám során a kémiai robbantással alakított testet vizsgáltam, ezért a robbantásos eljárások részletesebb ismertetését erre korlátoznám.

Kémiai robbanás során vegyi robbanóanyagok alakulnak át, eközben gázformájú reakciótermék és hő fejlődik.

Az átalakulás három részre osztható: égés, robbanás és detonáció. Égés során az átalakulás lassú, fokozatos, amit helyi hő közlés idéz elő. Robbanás közepes nagyságú, de nem stabil sebességgel megy végbe. A robbanás helyén igen nagy nyomásemelkedés mérhető.

Az alakított darab elkészítéséhez azonban ezek nem megfelelőek, mert nem biztosítanak megfelelő sebességet az alakításhoz. Ezért a leggyorsabb átalakulást, a detonációt használtuk fel célunk megvalósításához. Ez igen nagy és egyenletes sebességgel megy végbe, amely ütés, lökés hatására jön létre. A nyomás a detonációs frontban a 10 GPa értéket is elérheti.

Összehasonlításként az égés illetve a detonáció során felszabaduló energiák aránya körülbelül 1:4, teljesítmények aránya pedig 1:10⁷.

A detonáció eredményeként hő fejlődés közben nagymennyiségű gáz képződik; ez jelentős térfogat-növekedéssel jár, így a nyomás adott térfogatban nagy mértékben megnő.

Robbantás közben szerencsésebb, ha a robbanóanyag nem érintkezik az alakítandó testel. Egyrészt fel kell hívnunk a figyelmet a robbanás nyilvánvaló romboló-roncsoló hatására, illetve jobb minőségű alakítás érhető el, ha a nyomás egy közvetítő közegen keresztül fejt ki hatását. Ilyen közeg az „egyszerű” levegő is, de fontos szerep jut a víznek, illetve a homoknak, száraz és nedves állapotában is. Természetesen a különböző közegek hatása eltérő. Számunkra kedvezőbb, ha vizet alkalmazunk, hiszen ha ideális folyadéknak tekintjük egy kis túlzással élve összenyomhatatlan közegnek tételezhetjük fel. Ezért az általunk elképzelhető legnagyobb hatásfokkal adja át a nyomást a darabnak, elősegítve annak formázódását.

3.2 Alakítás robbantással

A robbantásos fémmegmunkálás elméletével és gyakorlatával a 40-es évek végén kezdtek el foglalkozni 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 – azt az erőt, mely segítséget nyújthat a probléma megoldásában. A robbantásos plattírozás, kerámia- és fémpor 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.

A robbantással, mint anyagformáló erővel a XIX. század utolsó harmadában kezdtek el foglalkozni a mérnökök, de az igazi fejlődés a II. világháborút követően indult el, amikor a technikai fejlődés új kihívások elé állították a szakembereket. A repülőgép- és hajógyártás egyes munkadarabjainak, valamint az egyéb területen jelentkező, pl. nagyméretű tartályok gyors és nagy pontosságú, lehetőleg egy munkafázisban történő előállítására, a korábbi fémmegmunkálási eljárásokkal egyre kevésbé volt sikeresen végrehajtható.

Nem elhanyagolható szempontként kellett figyelembe venni a gyártás gazdaságosságát sem, mely egyre újabb módszerek, lehetőségek keresését követelte meg az üzemektől és a kutatóintézetektől. Ez azt jelentette, hogy minél kevesebb részegységből, minél kevesebb hegesztési munkával és az ezt követő felület megmunkálási feladattal sikerült az adott formát elkészíteni.

A vegyipar egyre nagyobb méretű tartályokat igényelt, melyek kialakítása megint csak nem volt célszerű, pl. a tartály fenekét több cikkből, hegesztéssel előállítani. Megoldást a fémlemez préselése jelentette. Az 50-es években megjelenő nagyszilárdságú, illetve különleges fémek présgéppel történő alakítására a kor berendezései alkalmatlanok voltak, illetve az anyag minőségét, szerkezeti tulajdonságait rontotta volna. A megoldást a robbantás jelentette, mellyel hideg körülmények között képlékeny, nagy pontosságú alakváltozásra lehet kényszeríteni az anyagot. A módszer rendkívül egyszerű volt: beton illetve műgyanta formába robbantották a kiterített lemezt [5].

3.3 A robbantás menete

Egy robbantás végrehajtásánál számtalan biztonsági előírást kell betartanunk, hiszen nagyon nagy energiákkal dolgozunk, amelyek könnyedén balesetet idézhetnek elő. Csak minősített személy végezheti a robbantást. Ő felel a robbantás akadálymentes és biztonságos levezényléséért, ő irányítja a robbantásban segédkező emberek munkáját, ő határozza meg a robbanóanyag típusát és mennyiségét, és ha minden készen áll ő hozza működésbe a detonátort, és ezután bekövetkezik a robbanás.

Robbantani nem lehet akárhol. Fontos, hogy ne zavarja meg az emberek és a természet nyugalmát, illetve ne okozzon felesleges riadalmat. Ezért a Magyar Honvédség egyik gyakorlóterületét használtuk Ócsán. Ez a terület viszonylag távol esik a környező településektől (Ócsa, Alsópakony). Többféle robbantásra is sor került, hiszen a robbantásos csőalakítás csak egy lehetőség a robbantásos fémalakítás technológiája közül. Sort kerítettünk plattírozásra és portömörítésre is robbantással.

A cső alakításához robbanó zsinórt használtunk. Ez tulajdonképpen műanyag zsinórba burkolt nitropenta por, ami 20 g robbanóanyagot tartalmaz folyóméterenként.

A varratmentes alumínium csövet egy szerszámba helyeztük. A szerszám a robbantás során állt, az egyik szerszám fél egy talppal együtt képez egészet, a másik fél pedig eltávolítható.



2. kép



3. kép

A szerszám felekben betét található, ami a létrehozni kívánt geometria negatívja. (2. kép) A két szerszám felet három vaskos gyűrű fogja össze és akadályozza meg szétrepülésüket robbantás során. A szerszám felállítás után összefogtuk a két szerszám felet. Mivel a folyamatos igénybevételek miatt bekövetkezett deformáció miatt a zárás csak egy kis segítséggel sikerült (kalapácsütésekkel). Ez után létrejött üregbe belecsúsztattuk a még alakítatlan csövet. (3. kép) Belehelyeztük a robbanóanyagot, melyet központosítanunk kellett,

hogy a nyomás a henger belső felületét egyenletesen érje. A cső alját már a legelején lezártuk, ugyanis a csövet fel kellett öntenünk vízzel, mert így a legtökéletesebb az energia közvetítés. A robbanózsínór végéhez rögzítettük a detonátort, és ezután már minden készen állt a robbantáshoz.

Az előírt távolságra visszahúzódtunk a robbantás helyétől és figyeltük az eseményeket. A „ROBBANTÁS” vezényszó elhangzása után a robbantómester működésbe hozta a detonátort, amelyet nagy hanghatás és füst követett, jelezve, hogy a robbantás megtörtént és tulajdonképpen ezzel együtt az alakítás is.

Vissza kell utalnom, a szerszám felek deformációjára: ez ugyanis kihat az alakítás eredményességére, minőségére. Emiatt a három gyűrű lecsúszott a szerszám talpához. Ez azonban nem okozott semmi problémát. (4. kép)



4. kép



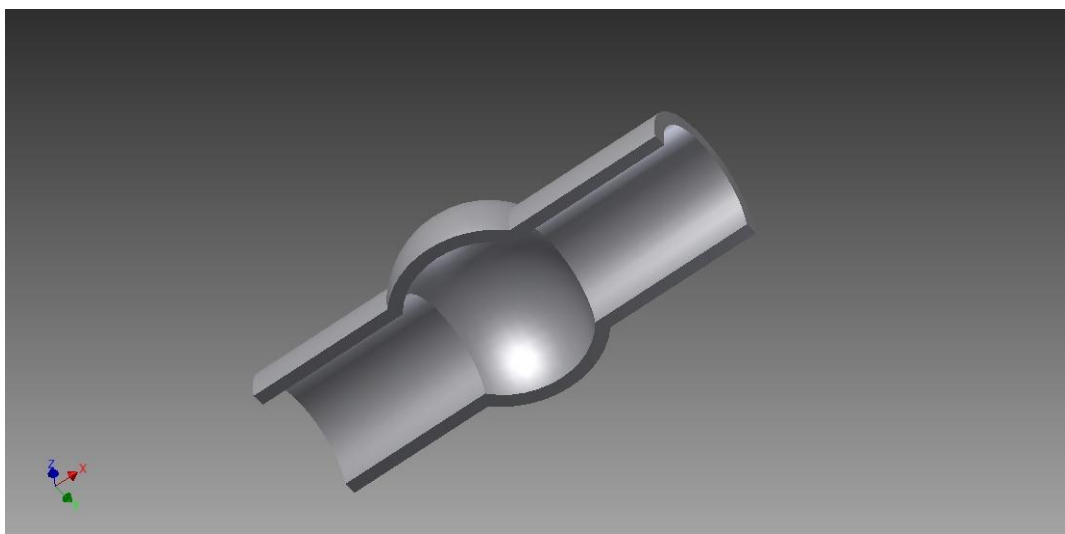
5. kép

Ami viszont probléma lett, hogy a két szerszám fél nem zárt tökéletesen, hézagok voltak bizonyos helyeken. Emiatt azokon a helyeken, ahol a darabnak nagyot kellett alakváltoznia (a golyváknál) a két szerszám találkozásánál az anyag szétvált. (5. kép) Ez azonban csak a felhasználás szempontjából jelenti a kísérlet eredménytelenségét, az én TDK kutatásom folytatható a meglévő, „hibás” darabbal.

4. fejezet

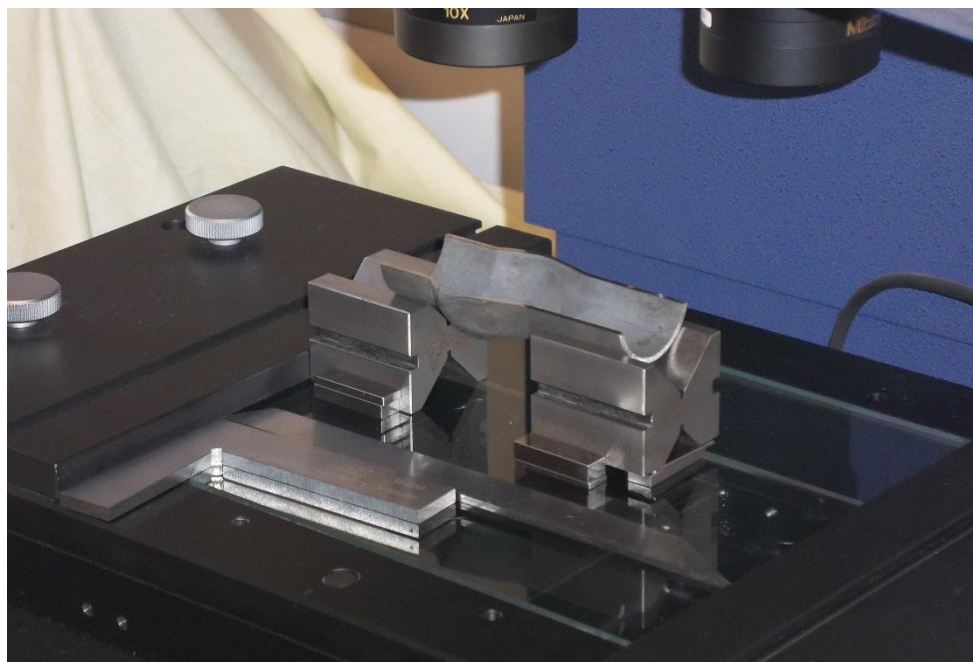
Alakítás vizsgálata

Két vizsgálatot végeztünk el a csöveken a robbantás hatásait vizsgálva. Az egyik a falvastagság mérése volt, a másik pedig keménységmérés. A vizsgálatokat az általunk nyár elején alakított alumínium cső mellett egy régebben robbantott acélcsövön is elvégeztük. A körülbelül 80 cm hosszú csöveket több darabba vágták és elfelezték, így jutottunk a vizsgálatra szánt anyagokhoz. Az acélcső körülbelül 100 mm, az alumíniumcső 125 mm hosszú volt, mindegyik darabon egy-egy golyvával, amik a legnagyobb alakváltozás eredményeképpen jöttek létre, így számunkra ezek vizsgálata volt a legérdekesebb.



4.1 A falvastagság mérése

Ezt a mérést a Bányai Kar Gépgyártástechnológiai Szakcsoportjának mérés technikai laboratóriumában végeztük. A mérőberendezés egy Mitutoyo PJ-H3000-es profil projektor volt. (6. kép) A mérés hitelességéhez és értékelhetőségéhez fontos a darab precíz beállítása a mérés előtt. Az első pont, hogy a projektor nagyító lencséje és a mérendő felület párhuzamosak legyenek egymással. Ezt köszörült prizma segítségével oldottuk meg: ezekben a darab hengeres felülete szépen felfekszik és pontos marad a vizsgálat ideje alatt.



6. kép

Mivel a golyva előtti és utáni csőszakasz a deformáció következtében nem ugyanolyan magas, ezért az alacsonyabb szakasz alatti prizmát meg kellett emelni. A következő igazítás, hogy a darab pontosan merőlegesen álljon a tárgyasztalon a képzeletbeli y-tengelyhez képest. Ezt derékszögek segítségével teljesítettük. Mérés során az eredményeket a projektor szálkeresztjének az adott ponthoz történő állítása után, digitális kijelzőről olvastuk le.

A mérés tulajdonképpen két részből állt: a külső kontúr megméréséből, illetve konkrét pontokon a falvastagság megmérése.

A kontúr mérését egy bázispont felvételével kezdtük. Ez a pont lett az $x=0$; $y=0$ pont. A mérés során az x tengely mentén figyeltük y változását $y=0$ értékéhez képest. A csövek egyenes szakaszain értelem szerűen nem, vagy csak alig volt változás, ezért itt nagyobb lépésekben haladtunk. A golyvákhoz érve az eredményeket 0,5 mm-enként jegyeztük.

Az alumínium cső mindkét, az acélcső egyik oldalát mértük le, az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

A másik része a vizsgálatnak a konkrét falvastagság megmérése volt a csövek kitüntetett pontjain.

Az acél cső esetében az egyenes részen 1,98 mm-t mértünk falvastagságnak, a golyva csúcsában pedig 1,63 mm-t, a cső $x=0$ felőli végétől számított $x=44,32$ -es pontban (ami szintén a golyván található) 1,73 mm-re adódott.

Az alumínium cső egyenes részein a falvastagság 4,93 mm értékű, a golyván mért értékek a következők:

Pont	Falvastagság
A csúcstól -8 mm	3,98 mm
A csúcstól -4 mm	3,895 mm
A golyva csúcsában	3,74 mm
A csúcstól +4 mm	3,975 mm
A csúcstól +8 mm	4,2 mm

Látható, hogy azon a részen, ahol a legnagyobb alakváltozás következett be, a falvastagság körülbelül 1 mm-rel csökkent.

4.2 Keménységmérés

Kísérleti munkám vizsgálatának másik pontja volt a cső vágási felületen az anyag keménységének mérése. Mikrokeménység-mérést végeztünk szintén a Bánki Karon, az Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet Anyag- és Alakítástechnológiai Szakcsoportjának P20-as laborjában.

Szintén mind a két fajtájú csövön elvégeztem a vizsgálatokat. A mérés elkezdése előtt, azonban a csöveket egy alumínium keretbe műanyaggal beöntöttük, (6.kép) ezzel biztosítva a darab tárgyasztalra való felfekvését és a mérés alatti mozdulatlanságát. Sajnos a csövek deformációja miatt itt is meg kellett egy kis igazítással szüntetni a darab billegését.

Az acélcsővön 1,2 kg-os (11,768 N) terhelést alkalmaztunk. A keménységmérő műszerbehatolása, majd lenyomat képzése után azt felemelve és elfordítva egy 20x-os nagyítású mérőmikroszkóp segítségével lemértem a lenyomat átlóját (d). Táblázatból kikereshető, hogy ehhez a terhelés alapján ehhez az átmérő értékhez mekkora mikrokeménység érték tartozik Vickersben.

Egy referencia pontot választottam ki a fal azon részén, ahol a legkisebb alakváltozást szenvedte el az anyag, feltételezve ezzel, hogy itt áll a keménység legközelebb a még alakítatlan anyag keménységéhez. Itt a keménység 154 MHV-re ($d=120\text{ }\mu\text{m}$) adódott.

A méréseket a dudor mentén ezután milliméterenként végeztem. A legérdekesebb pont a dudor csúcsában található, ez szenvedte el a legnagyobb vastagságcsökkenést, azaz a legnagyobb alakváltozást. Az itt mért keménység 183 MHV ($d=109\text{ }\mu\text{m}$), ami várakozásunknak megfelelő.

Az alumínium csövön hasonló módon végeztem a vizsgálatokat. A referencia pontban: 62 MHV-t ($d=76\text{ }\mu\text{m}$), a dudor csúcsában 124 MHV-t ($d=54\text{ }\mu\text{m}$) mértem.

Az egyéb pontokban mért értékeket a Mellékletek című fejezet 2. táblázatban ismertetem.



7. kép

5. fejezet

További kutatási feladatok

Világunkban a kutatók és mérnökök minden nap azért fáradoznak, hogy a holnap egyszerűbb, jobb legyen, mint a ma: a technológiák, eszközök folyamatos fejlesztése, újak kigondolása ad megoldást ezekre a kívánalmakra.

Egy új, esetleg eddig nem a lehetőségeinek megfelelően kihasznált alakítástechnológiának meg kell felelnie a vele szemben támasztott elvárásoknak: gyorsabb, pontosabb és olcsóbb legyen, mint amiket az adott pillanatban alkalmazunk egy feladat megoldására.

Ezekre a válaszokat vizsgálati módszerekkel, tesztekkel találhatjuk meg.

Nem adtam teljes képet erről a technológiáról: egy TDK dolgozat mindig valaminek a kezdete, kerete nem elég nagy, hogy alkalmas legyen egy adott probléma teljes megoldására: erre egy szakdolgozat, doktori disszertáció ad lehetőséget.

Fontos lenne még vizsgálni az anyagszerkezetének metallográfiai változását, hogyan módosult a szövetszerkezet.

Repedés vizsgálat kimutathatja, hogy a darabon az alakítás során gyarapodott-e a számuk, méretük növekedett-e. A cső a benne uralkodó nyomásváltozás hatására ismétlődő igénybevételnek lehet kitéve, elfáradhat: ezért fontos vizsgálatuk. Ennek módszere lehet valamilyen hibakereső vizsgálat: mágneses repedésvizsgálat (alumíniumnál nem alkalmazható), penetráló folyadékvizsgálat, esetleg ultrahangvizsgálat.

A technológia tényleges sorozatgyártásba állításához, ipari felhasználásához nem csak műszaki, de gazdasági kérdésekre is választ kell adni, mely már egy más jellegű dolgozat témája lehet.

6. fejezet

Értékelés, összefoglalás

Tudományos Diákköri Dolgozatom középpontjában egy különleges alakítástechnológia áll: a robbantással végzett anyagalakítás, valamint egy ezzel a technológiával készített cső vizsgálata.

A robbantásos alakítás nagysebességű anyagalakító technológiák közé tartozik, mellyel intenzíven a II. világháború után kezdtek el foglalkozni, mind a Szovjetunióban, mind az Amerikai Egyesült Államokban.

Ez a technológia megadta a megoldást nagy szilárdságú lemezek alakítására, ami elegendően nagy energia hiányában nem volt addig kivitelezhető. Az ipar azóta befogadta ezt a technológiát: repülőgép sárkány-darabok, tartányelemek, űrsikló fűvóka harangok készültek segítségével. Ám mi a helyzet az egyéb megmunkálásokkal: segítségével eredményesen lehet csöveket is alakítani, ráadásul varratmentesen. Mindez anyag és energia megtakarítást jelent, és mivel egy lépésben az alakítás elvégezhető idő is nyerhető.

Tudnunk kell azonban, hogy milyen hatással jár ez az anyagra nézve: nem lesz-e baja, bírja-e a használat során jelentkező hatásokat, igénybevételeket.

Ezekre kerestem a választ dolgozatomban egy rövid anyagtudományi összefoglalás után.

Megállapíthatjuk, hogy a darab alakváltozása nagymértékű: a falvastagság mindkét anyagnál 20%-al csökkent a golyváknál. Ezzel szinkronban a darab keménysége nagymértékben növekedett: acél esetében 19%-ot, alumínium esetében, ez az érték 100%. Ezt a durva eltérést betudhatjuk az alumínium nagyobb keményedőképességének.

A robbanás maga a víz feltöltésnek köszönhetően nem okozott szövetszerkezeti károsodásokat, melyeket szemmel észlelhettünk volna. További vizsgálatokra a dolgozat 5. fejezete tesz javaslatot.

7. fejezet

Köszönetnyilvánítás

Itt szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek: Dr. Rácz Pálnak és Szalay Andrásnak, akik energiájukat és idejüket nem kímélve vezették kutatásomat.

Köszönettel tartozok továbbá Tamás Andrásnak szakszerű munkájáért, mellyel előkészítette a vizsgálatához csöveimet.

A mérésekben nyújtott segítségéért hálás vagyok Kis Ferencnek és Nagyné Halász Erzsébetnek.

A cikk a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások című projekt keretében készült. 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.

8. fejezet

Felhasznált irodalom

- [1] Tisza Miklós: Képlékeny alakítás
- [2] Dr. Gillemot László: Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat;
Tankönyvkiadó, Budapest, 1972
- [3] Verő József: Fémtan; Tankönyvkiadó, Budapest, 1969
- [4] Dr. Zorkóczy Béla: Metallográfia és anyagvizsgálat; Tankönyvkiadó, Budapest, 1975
- [5] Dr. Lukács László- Szalay András- Dr. Zádor István: Robbantásos fémalakítás és a repüléstechnika
- [6] William Hosford- Robert Caddel : Metal forming, mechanics and metallurgy,
Cambridge, 2007

9.fejezet

Mellékletek

1. táblázat

Al törés ellentett oldala					
x	y	x	y	x	y
0	0	37,5	2,18	56,5	2,01
12	0	38	2,33	57	1,89
17	0,034	38,5	2,46	57,5	1,75
17,5	0,06	39	2,575	58	1,625
18	0,072	39,5	2,68	58,5	1,505
18,5	0,08	40	2,8	59	1,375
19	0,08	40,5	2,9	59,5	1,265
19,5	0,08	41	3	60	1,15
20	0,09	41,5	3,09	60,5	1,03
20,5	0,095	42	3,2	61	0,92
21	0,1	42,5	3,3	61,5	0,82
21,5	0,1	43	3,34	62	0,705
22	0,1	43,5	3,41	62,5	0,59
22,5	0,115	41	3	63	0,49
23	0,115	41,5	3,09	63,5	0,39
23,5	0,115	42	3,2	64	0,295
24	0,115	42,5	3,3	64,5	0,205
24,5	0,115	43	3,34	65	0,12
25	0,115	43,5	3,41	65,5	0,03
25,5	-0,095	44	3,465	66	-0,035
26	-0,08	44,5	3,5		
26,5	-0,07	45	3,54		
27	-0,06	45,5	3,56		
27,5	-0,04	46	3,56		
28	-0,01	46,5	3,57		
28,5	0,04	47	3,57		
29	0,1	47,5	3,56		
29,5	0,16	48	3,55		
30	0,25	48,5	3,53		
30,5	0,355	49	3,48		
31	0,465	49,5	3,45		
31,5	0,57	50	3,39		
32	0,69	50,5	3,305		
32,5	0,8	51	3,236		
33	0,92	51,5	3,16		
33,5	1,055	52	3,05		
34	1,2	52,5	2,95		
34,5	1,32	53	2,855		
35	1,47	53,5	2,74		
35,5	1,61	54	2,5		
36	1,755	55	2,38		
36,5	1,9	55,5	2,25		
37	2,04	56	2,12		

Al törés oldala		Acél cső	
x	y	x	y
0	0	20	0
9	0,025	34	0,02
15	-0,027	35	0,03
28	-0,027	36	0,07
28,5	0,015	37,5	0,1
29	0,083	38	0,13
29,5	0,235	38,5	0,155
30	0,477	39	0,19
30,5	0,845	39,5	0,255
31	1,24	40	0,355
31,5	1,565	40,5	0,45
32	1,76	41	0,57
32,5	2,075	43	1,09
33	2,08	45	1,61
33,5	2,23	47	2,18
34	2,375	49	2,695
34,5	2,52	51	3,22
35	2,66	53	3,75
35,5	2,8	54	3,99
36	2,96	55	4,2
36,5	3,12	56	4,4
37	3,235	57	4,56
37,5	3,375	58	4,7
38	3,5	59	4,76
38,5	3,63	60	4,82
39	3,745	61	4,76
39,5	3,87	62	4,76
40	3,965	63	4,65
40,5	4,09	64	4,5
41	4,19	65	4,32
41,5	4,335	66	4,1
42	4,455	67	3,88
42,5	4,58	68	3,64
43	4,72	69	3,39
43,1	4,74	70	3,095
43,2	4,785	71	2,8
43,3	4,825	72	2,45
43,5	4,86	73	2,1
44	4,975	74	1,71
44,5	5,07	75	1,228
45	5,16	75,5	1,28
45,5	5,22	76	0,66
46	5,28	76,2	0,53
46,5	5,32	76,5	0,375
47	5,32	77	0,2
47,5	5,26	77,5	0,095
48	5,15	78	0,065
48,5	5,02	79	0,025
		80	0

2.táblázat

2.a. Alumínium cső keménységértékei

X	d[μm]	MHV 0,2	X	d[μm]	MHV 0,2
REF	76	62,95543	41	67	81,00481
1	74	66,40442	42	64	88,777
2	87	48,04209	43	59	104,4615
3	65	86,06641	44	61	97,72389
4	59	104,4615	45	67	81,00481
5	73	68,23618	46	64	88,777
6	70	74,21032	47	61	97,72389
7	69	76,37693	48	67	81,00481
8	65	86,06641	49	65	86,06641
9	58	108,0947	50	60	101,0085
10	65	86,06641	51	64	88,777
11	60	101,0085	52	62	94,59693
12	61	97,72389	53	61	97,72389
13	58	108,0947	54	65	86,06641
14	57	111,9208	55	62	94,59693
15	56	115,9536	56	66	83,4781
16	56	115,9536	57	64	88,777
17	57	111,9208	58	66	83,4781
18	64	88,777	59	64	88,777
19	61	97,72389	60	66	83,4781
20	64	88,777			
21	59	104,4615			
22	64	88,777			
23	66	83,4781			
24	59	104,4615			
25	64	88,777			
26	64	88,777			
27	54	124,7018			
28	58	108,0947			
29	57	111,9208			
30	64	88,777			
31	59	104,4615			
32	59	104,4615			
33	62	94,59693			
34	61	97,72389			
35	57	111,9208			
36	66	83,4781			
37	66	83,4781			
38	64	88,777			
39	64	88,777			
40	63	91,61768			

2.b. Az acélcső értékei

X	d[μm]	MHV 1,2	X	d[μm]	MHV 1,2
1	104	201,7151	41	112	173,9278
2	112	173,9278	42	112	173,9278
3	115	164,9717	43	109	183,6335
4	114	167,8786	44	111	177,0757
5	109	183,6335	45	112	173,9278
6	111	177,0757	46	114	167,8786
7	120	151,5104	47	116	162,1396
8	117	159,3798	48	116	162,1396
9	112	173,9278	49	110	180,3099
10	111	177,0757	50	119	154,0675
11	114	167,8786	51	118	156,6899
12	114	167,8786	52	117	159,3798
13	111	177,0757	53	113	170,863
14	115	164,9717	54	113	170,863
15	112	173,9278	55	113	170,863
16	113	170,863	56	113	170,863
17	110	180,3099			
18	113	170,863			
19	112	173,9278			
20	117	159,3798			
21	118	156,6899			
22	113	170,863			
23	109	183,6335			
24	114	167,8786			
25	113	170,863			
26	116	162,1396			
27	112	173,9278			
28	111	177,0757			
29	112	173,9278			
30	109	183,6335			
31	109	183,6335			
32	111	177,0757			
33	116	162,1396			
34	113	170,863			
35	113	170,863			
36	115	164,9717			
37	111	177,0757			
38	109	183,6335			
39	113	170,863			
40	113	170,863			

3. A Mueller Othmár gyűjtemény témával kapcsolatos könyvlistája

Kiadás éve	Kiadás helye	Magyar cím
1967	Lyngby, Denmark	Fémek robbantásos alakítása
1971	Frederiksborg	Robbantásos fémlemezhegesztés
1971	Frederiksborg	Robbantásos hegesztés
1972	Lyngby, Denmark	Robbantásos alakítás az iparban
1980	Warszawa	Robbantásos fémalakítás
1964	Lower Hutt	Robbantásos alakítás
1982	Leningrad	Robbantásos felületek a gépgyártásban
1977	USA, Gold Bulletin	Robbantásos aranyplattírozás
1964	Praha	Robbantásos alakítás
1969	London	Légréshatás a robbantásos fémlemezalakításnál
1969	Oxford	Csőprofilok robbantásokkal való alakítása
1972	London	Robbantásos hegesztési költségek jellege
1973	Leeds	A nagyenergiájú alakítás, hegesztés, zömítés
1962	Delft	Robbantásos hegesztés
1970	Delft	Robbantásos fémalakítás
1959	Moszkva	Vashulladékok robbanás mentességének vizsgálata
1979	Praha	Acélok robbantásos hegesztése és kapcsolódó folyamatok
1972	Zürich	Vastagfalu lemezek kontakt robbantásos alakítása
1956	London	A robbantásos hegesztés helyzete
1970	Budapest	Martin- és elektroacél gyárrészleg (Robbantás biztonságu előírásai)
1969	Koppenhagen	A dán kohászati egyesület ülése
1972	Novoszibirszk	A robbantásos erősítés és hegesztés fizikája
1980	Novoszibirszk	A robbantásos hegesztés fizikája
1978	Würzburg	Robbanással plattírozott lemezek megmunkálásának sajátosságai
1972	Moszkva	Fémhulladékok előkészítése és feldolgozása (21. fej. Hulladékfémek robbantásos aprítása)
1970	Lingby	Robbantásos alakítás
1965	Zürich	Fémek lövés okozta deformációja
1980	Moszkva	Fémkészítés robbantásos formázással
1981	Louisville	Robbantásos plattírozás
1978	Louisville	A robbantásos plattározás és ? Plattírozott lemezek számítása
1983	Halle	Robbantásos hegesztés és alakítás
1968	Tokio	Robbantásos fémmegmunkálás
1968	Coventry	Robbantástechnika a fémiparban, Bibliográfia
1968	London	Robbantásos hegesztés
1973		Alumínium és rézföldelők robbantásos hegesztése
1976	Abington	Robbantásos hegesztés
1973	London	A robbantásos fémalakítás elvei és gyakorlata
1975	Berlin	Robbantásos plattírozás
1976	Berlin	Határhúzóviszony vizsgálata töltethatotta préseknél
1966	?	Vízalatti férobbantások
1978	Moszkva	Fémfelület edzése robbantással. Két fém struktúrája és tulajdonságai
1962	Düsseldorf	Nagyteljesítményű fémalakítások
1979	Düsseldorf	Robbantásos hegesztés és plattírozás
1971	New York	A hegesztési hullámmóda a robbantással plattírozott fémekben
1966	Mexico	Robbantásos fémalakítás
1975	?	Robbantásos kazáncső-kazánfal hegesztés
1977	Ludwigsfelde	Gépkocsi hátsóhidak robbantásos alakítása
1975	Warszawa	Nagy energiájú fémmegmunkálás robbanóanyagokkal
1961	Washington	Robbantásos fémalakítás bibliográfiája 1957-1960.
1974	Schaffhausen	Alumínium robbantásos vezetékkötések
1965	New York	Fémek robbantásos kötése
1978	Osaka	A robbantásos hegesztés fedőlemeze, alakítási sebessége, mérése
1968	Stuttgart	Robbantásos plattírozás
1963	Dortmund	A fémalakítás újabb fejlődése
1970	Clausthal	A kontaktfelületi folyásfolyamatok fémek robbantásos hegesztésénél
1967	Denver	A nagyenergiájú alakítás központjának első nemzetközi konferenciája
1969	Denver	A nagyenergiájú alakítás központjának második nemzetközi konferenciája
1971	Denver	A nagyenergiájú alakítás központjának harmadik nemzetközi konferenciája
1971	Zwickau	Robbantásos plattírozási kollokvium összefoglaló
1973	Budapest	Haditechnika fiataloknak, kumulatív töltetek
1978	Moszkva	Robbantásos hegesztés
1974	Tokio	A robbantásos hegesztés alkalmazási kísérletei
1961	Washington	A robbanóanyagágazatok elemzésének és észlelésének módszerei összehasonlítása
1974	Warszawa	Kumulatív töltetek a háborúban, a bányászatban, az iparban
1969	Denver	Nagy energiájú a fémek végső jellemzőire
1964	Moszkva	Fémlemez sajtolása robbantással
1964	USA	Robbantásos plattírozás
1965	USA	Korróziógtól lemez robbantásos készítése

1981	Wilmington	Robbantásos plattírozás
1973	NSZK, Deutschland	Kerámia és fém porok, illetve keverékük robbantásos tömörítése
1974	Würzburg	Magas olvadáspontú fémporok robbantásos tömörítése
1977	?	Ólom robbantásos plattírozás
1977	USA	Alumínium porok robbantásos tömörítése
1977	NSZK, Deutschland	Robbantásos hegesztés a vegyi gépgyártásban
1970	Troisdorf	Fémlemezek hajóépítésben való robbantásos alakítása
1963	London-Oxford	Fémek robbantásos megmunkálása
1966	Düsseldorf	Vizsgálatok hosszú profilok illesztésére robbanóanyagok révén
1966	Düsseldorf	Fémek robbantásos hegesztése
1974	Düsseldorf	Hegesztés kinetikus energiával
1980	Düsseldorf	Fémek robbantásos hegesztése. A fedőlemezmozgások nem helyi folyamatainak vizsgálata
1964	Praha	Fémlemezek és csövek robbantásos alakítása
1961	Wien	Betonacél ütészállóság robbantási kísérletei
1972	Schaffhausen	Robbantásos hegesztési és préselési kötések
1971	Pardubice-Semtin	Robbantásos plattírozási szimpózium
1974	Pardubice-Semtin	2. robbantási fémalakítási szimpózium
1974	Pardubice-Semtin	2. robbantási fémalakítási szimpózium
1979	Pardubice	4. szimpózium: Robbantásos fémmegmunkálás
1982	Pardabice	Fémek robbantásos megmunkálása. Az 5. szimpózium előadásai
1969	Tokio	Robbantásos fémalakítás
1981	Göteborg	Fémcsövek belső alakítására alkalmas elektrodinamikus és robbantási módszerek
1960	Leningrad	Hajószerkezetek robbantásos alakítása
1980	Düsseldorf	Hegesztés kinetikus energiával. Folyékony hajtóanyagok gyújtásával való kifelületű plattírozás
1965	Warszawa	Robbantásos fémalakítás
1963	New York	A robbantásos fémalakítás problémái
1964	Stuttgart	Fémlemezrobbantásnál a lemez viselkedése
1963	Delft	A robbantásos fémalakítás hatása az anyag tulajdonságaira
1970	Delft	Fémlemezalakító robbantás anyagtulajdonság módosulás nélkül
1974	Berlin	Robbantásos plattírozás. A határsebességek és a hegesztési zóna kiképzésének vizsgálata
1967	Delft	Robbantásos fémalakítás
1969	Warszawa	Nagyszilárdságú acélok szilárdítása robbantással
1978	Bratislava	Stroje a technológie pre tvárnenie vysokymi parametrami
1984	Budapest	Ni-tartalmú Ag érintkezőanyagok előállítása robbantásos portömörítéssel