

A projekt keretében elvégzett munkát – a szerződés szerinti munkatervvel való egyszerű összehasonlíthatóság érdekében – a szerződés mellékletét képező *Részletes kutatási terv* szerinti bontásban, technológiai feladatcsoportonként ismertetjük.

A technológiai feladatcsoportok szerinti ismertetés előtt röviden összefoglaljuk azt a nagy jelentőségű fejlesztő munkát, amely a későbbiekben ismertetendő technológiai kutatásokhoz alapfeltételül is szolgált. Mint felsőoktatási kutatóhely mindig nagy hangsúlyt fektettünk arra is, hogy a kutatási eredmények az oktatásban is hasznosuljanak, illetve a kutatásba később bekapcsolódók számára olyan összefoglaló tanulmányokat biztosítsunk, amely egyrészt az előzmények, másrészt a kutatás során alkalmazott módszerek, programrendszerek megismerését, gyors elsajátítását teszik lehetővé. Ezért a projekt megvalósítása során kiemelt figyelmet fordítottunk arra, hogy a kutatási feladatok megoldásánál alkalmazott programrendszerekről, valamint a kutatási feladatok elméleti háttéréről olyan összefoglaló tanulmányok is készüljenek, amelyek a graduális és posztgraduális képzésben a programrendszereket használók munkáját megkönnyítik, illetve diplomatervek és doktori értekezések készítésekor is értékes referencia anyagként felhasználhatók. Ennek megfelelően az alábbi részletes elméleti összefoglaló tanulmányokat, felhasználói leírásokat készítettük el a kutatási feladatok megoldása során (zárójelben a publikációs jegyzék hivatkozott sorszáma található):

- *Hőfizikai folyamatok végeeselemes modellezése* tanulmány [1]: Mind a hegesztési, mind a hőkezelési folyamatoknál a hőfizikai folyamatok modellezése alapvető jelentőségű. Ezért is tartottuk elsődleges fontosságúnak e témakör elméleti, hőtani, hőfizikai folyamatainak, a folyamatokat vezérlő alapegyenleteknek átfogó elméleti elemzését.
- *Unigraphics Felhasználói leírás* [15]: minden modellezési folyamatnál valamely modellezendő objektum, test geometriai modelljét is meg kell alkotni. Erre a célra általában a végeeselemes programoktól független külső CAD rendszert alkalmazunk. A CAD rendszerek megválasztásánál alapvető szempont, hogy a végeeselemes rendszerek által fogadni képes file formátumot biztosítsanak. A Unigraphics a Miskolci Egyetemen – és az iparban is – általánosan alkalmazott 3D-s CAD/CAM rendszer, amely a legtöbb végeeselemes rendszer által feldolgozható file formátumokban képes a geometriai modell eredményét exportálni.
- *MARC Felhasználói leírás* [20]: a MARC általános rendeltetésű végeeselemes programrendszer, amely azonban – éppen általános jellege miatt – a különböző végeeselemes modellezések igen széles köréhez alkalmazható. Bár a MARC alkalmazása a későbbiekben ismertetendő technológiai célrendszereknél lényegesen összetettebb feladat, ugyanakkor a technológiai célrendszerekhez képest nagy előnye, hogy olyan feladatok megoldására is alkalmas, amelyek kezelése az adott technológiai területre orientált célrendszerekben esetenként nem lehetséges.
- *AutoFORM Felhasználói leírás* [40]: a lemezalakító eljárások – különösen az autóiipari alkalmazások – terén világszerte széles körben alkalmazott végeeselemes célrendszer. Különösen jól használható az összetett geometriájú autó karosszéria elemek alakításának modellezésére.
- *PAM-STAMP Felhasználói leírás* [35]: a lemezalakító eljárások terén ugyancsak világszerte széles körben alkalmazott végeeselemes célrendszer, amelynek alkalmazását hangsúlyozottan indokolja az a körülmény, hogy olyan programrendszerről van szó, amely közvetlen interface lehetőséggel rendelkezik a hegesztési, hőkezelési technológiák, fázisátalakulások modellezésében világviszonylatban vezető szerepet játszó SysWeld végeeselemes programrendszerhez.
- *QFORM Felhasználói leírás* [14]: a különféle térfogatalakító eljárások terén alkalmazható, viszonylag egyszerűen kezelhető, felhasználó-barát végeeselemes célrendszer. Különösen hatékony támogatást nyújt zömítési, folytatási, különféle

melegalakítási feladatok gyors, ipari környezetben is hatékonyan végezhető modellezésében.

- *SysWeld Felhasználói leírás* [34]: a programrendszer különféle hegesztési-, hőkezelési folyamatok, illetve az ezek termikus folyamataival összefüggő fázisátalakulások modellezésére világszerte széles körben alkalmazott végeselemes célrendszer. Külön értékeként tekintjük, hogy a PAM-STAMP lemezalakító végeselemes célrendszerhez olyan speciális interface lehetőséggel rendelkezik, amely az alakítási folyamatok közben számos esetben szükséges hőkezelési folyamatok modellezését is integrált modellezési környezetben lehetővé teszi.

### ***Hőkezelés, felülettechnológiák***

A hőkezelés és felülettechnológiák témakörben az egyik fő kutatási területet a lézeres felületedzés és a lézeres felületátolvasztás folyamatának numerikus modellezése képezte. A Johnson-Mel-Avrami, valamint a Koistinen-Marburger modellből kiindulva, matematikai modellt dolgoztunk ki egyedi és átlapolódó nyomvonalak alkalmazásával a hőeloszlás modellezésére lézeres felületedzés és felületátolvasztás esetére, a hőhatás okozta anyagszerkezeti változások, fázisátalakulások, valamint a felhasználói tulajdonságokat meghatározó szövetszerkezet és a felületkezelés eredményeként létrejött keménység- és feszültség-eloszlás meghatározására. E vizsgálatokat a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítvány Anyagtudományi Kutatóintézetével közösen végeztük. A numerikus modellezéshez a SysWeld végeselemes programrendszert alkalmaztuk. A kutatások eredményeit az *Acélműanyagok lézeres felületkezelése* című tanulmány összegzi [61]. E vizsgálatok során, gyümölcsöző együttműködés alakult ki a programrendszert kidolgozó ESI Group Kelet-Európai képviselőjével. Az együttműködés keretében 1 fiatal kutató 1 hónapos tanulmányúton vett részt a MECAS-ESI Plzeni központjában, ahol egyrészt e kutatómunka feladatainak megoldásán dolgozott, másrészt a Sysweld egyéb ipari alkalmazási lehetőségeivel ismerkedett meg. A vizsgálatok eredményeit magyar és idegen nyelvű szakfolyóiratokban [62, 63], hazai és nemzetközi konferenciákon ismertettük [31, 32, 64]. Ebből a témakörből PhD doktori értekezés elkészítése van folyamatban, amely a lézeres felületedzés matematikai modellezésének egészen újszerű megközelítését tartalmazza [91]. Az értekezés benyújtására várhatóan 2006-ban sor kerül.

A hőkezelés a korszerű gépgyártásban is kiemelkedően fontos szerepet betöltő, ugyanakkor igen energiaigényes technológia. Emiatt a gyártmány versenyképessége megköveteli, hogy a hőkezelési technológia a felhasznált energia minimumára legyen optimalizálva. Másfelől a hőkezelés – mint előírt anyagtulajdonságokat biztosító művelet – fontos szerepet tölt be az egyre fokozódó minőségi követelmények teljesítésében. Mindez szükségessé teszi a technológia részletes és megbízható tervezését.

A hőkezelés technológiai modellezésére egy moduláris felépítésű számítógépes technológiai tervező-elemző programrendszert dolgoztunk ki, amely tartalmazza az *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle* c. gyűjtemény 20 anyagra vonatkozó folyamatos hűtésű C-görbéjét, minden dokumentált adat feltüntetésével. A hőkezelés-technológiai elemzések és adatok meghatározásához szükséges hőtechnikai számító programmodul algoritmusának kidolgozásával teljes mértékben megvalósult a projektben tervezett feladat. A program alkalmazásával lehetőség van a hűlésgörbe meghatározására a test valamely kiválasztott pontjában, vagy együttesen a sugár, illetve a félvastagság 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 és 1 relatív helyzetű (r/R, illetve x/S) pontjaiban. A programmal elvégezhető különféle szerkezeti acélok edzési, megeresztési, normalizálási és lágylítási technológiáinak elemzése, műveleti utasítások készítése, továbbá különféle termokémiai eljárások (cementálás, nitridálás), illetve a

betétedzés technológiájának tervezése. A kidolgozott programrendszerrel részletes felhasználói leírás [18], mérnök továbbképző tanfolyami jegyzet is készült [84], valamint több ipari kutatómunkában is sikerrel alkalmaztuk [5], [8], [10].

### ***Hegesztés***

A kutatás fő célkitűzéseként a hegesztés területén, az empirikus úton szerzett ismeretek matematikai, mechanikai és fizikai modellezését, technológiai tanácsadó szoftverek kidolgozását fogalmazzuk meg. A komplex jelenségek megfelelő pontosságú modellezésére és hasznosítható következtetések levonására a FEM technikák adta lehetőségek kiválóan alkalmasak. A projekt keretében elvégeztük a hegesztésnél lejátszódó hőfizikai folyamatokra alkalmazható matematikai modellek elemzését, illetve a különféle hegesztési eljárások paramétereinek meghatározására alkalmas algoritmusok kidolgozását. E feladatpont keretében átfogó tanulmány készült a hőfizikai folyamatok véges elemes modellezésének összefoglalására [1], a különböző hegesztési folyamatok modellezésénél alkalmazható Rykalin és Rosenthal egyenletek összehasonlítására [46].

Hegesztési témakörben az egyik fő kutatási területként a sajtolóhegesztések témakörét választottuk. A hegesztési eljárások mintegy kétharmada, sajtolóhegesztési eljárás, ez kb. 66 hegesztési eljárást, illetve eljárás változatot jelent. Ezen eljárások közös jellemzője, hogy a kötés készítéséhez erőt alkalmazunk. Ezt az erőt az eljárások többségénél képlékenyalakításra használjuk. Leegyszerűsítve, a képlékenyalakítás ahhoz szükséges, hogy a kötés készítéséhez szükséges gerjesztett állapotot elérjük és a kötés kialakulásának feltételei kialakuljanak. A gyakorlati tapasztalat azt mutatja, hogy van egy minimálisan szükséges alakváltozás, amely a mechanikai szempontból megfelelő hegesztett kötés kialakulásának feltétele. Ezt a szükséges alakváltozást a különböző szakirodalmak egymástól eltérően és viszonylag nagy tartományban adják meg. A szakirodalmi adatok empiriára épülnek, és nagyban függenek a kísérleti feltételektől. A kutatómunka keretében ezt a szükséges alakváltozást sikerült pontosabban meghatározni mind analitikus úton, mind végelelemes modellezés segítségével. A hidegsajtoló hegesztést képlékenyalakításként közelítve, abból kiindulva, hogy a szakítóvizsgálat során az elszakításhoz adott nagyságú energiát (fajlagos törési munkát) kell befektetni, azt feltételezhetjük, hogy ezt az energiát képlékenyalakítás során visszatáplálva, a daraboknak össze kell hegedniük. Elméleti alapot erre az ad, hogy a húzófeszültségi állapotban a darabok kisebb alakváltozás után törnek el, mint nyomó feszültségi állapotban. Alumínium ötvözetek hidegsajtoló tompahegesztésére elkészített analitikus modell elemzése és számos mérés elvégzése után arra a következtetésre jutottunk, hogy a feltételezésünk helyes volt. A kritikus alakváltozás – amely a darabok összehegesztéséhez szükséges – ezen az elven sokkal pontosabban határozható meg, és a szükséges hegesztési paraméterek pontosan meghatározhatók [3, 4, 58, 60].

A sajtolóhegesztések másik nagy csoportját a meleg-sajtolóhegesztési eljárások képezik. E feladatpont keretében átfogó tanulmány készült a szilárd- és a folyadékfázisú sajtolóhegesztési eljárások technológiai sajátosságainak elemzésére, a modellezés szempontjából meghatározó jellemzők és algoritmusok összefoglalására [12], valamint folyóiratcikkek és konferencia előadások készültek a témakörből [16, 28, 43, 59].

Átfogó kutatásokat végeztünk az ellenállás hegesztések modellezése terén. Az ellenállás ponthegesztés kezdeti szakaszának modellezésére megalkotott matematikai-termomechanikai modellezés eredményeit idegen nyelvű szakcikkekben is közzétettük [77]. Vizsgálatokat végeztünk az elektromos ív viselkedésének tanulmányozására. Különböző körülmények között elvégzett modellezések eredményeként kimutattuk, hogy extra keskeny résben, az ív lineáris hőforrásnak tekinthető. Az ezen az elven működő lemezelektrodás ívhegesztés, mint

új hegesztési eljárás, számos területen alkalmazható már ma is. E vizsgálatok keretében, a BME MTAT, mint közreműködő kutatóhely „*Járműszerkezetek ellenállás ponthegesztésének tervezésére szolgáló szakértői rendszert*” dolgozott ki [16], míg az ME Mechanikai Technológiai Tanszékén „*Vékonylemezek ellenállás ponthegesztésének optimalizálása*” témakörben végzett kutatások emelendők ki. A szakértői rendszer kidolgozása kapcsolódik a „*Virtuális lézertechnikai laboratórium kidolgozása*” című, 11 európai ország részvételével megvalósuló VIRTUELLA elnevezésű, Leonardo programhoz [27], míg a „*Vékonylemezek ellenállás ponthegesztésének optimalizálása*” témakörben a Miskolci Egyetemen PhD doktori értekezés sikeres megvédésére is sor került [33]. A témából rangos idegen nyelvű szakfolyóiratokban is jelentek meg közlemények [13, 65].

A hőhatásövezet végeelemes modellezésével nyert eredményeket sikeresen alkalmaztuk acélok javító- és felrakóhegesztésénél. Melegszilárd acélok hegesztésének elemzéséről és modellezéséről átfogó tanulmány készült [42]. A melegszilárd acélok hegesztésének modellezésével nemzetközileg is figyelemre méltó eredményeket értünk el a repedékenységi hajlam, illetve az optimális előmelegítési hőmérséklet meghatározásában. Az elért eredményeket a legrangosabb nemzetközi hegesztési folyóirat is leköszölte [13] és nagyszámú, rangos külföldi hivatkozás jelzi az eredmények jelentőségét.

Különbféle kötéstechnológiák tervezésére alkalmas számítógépes hegesztéstechnológiai tanácsadó rendszert dolgoztunk ki. A Symplex módszer alkalmazásával, többszempontú optimalizálási eljárást dolgoztunk ki standardizált minőségi jellemzők felhasználásával. A programrendszer lehetővé teszi a kötéskialakítás számítógépes tervezését, a hozaganyag számítógépes megválasztását, a hozaganyag szükséglet számítását, a különféle hegesztési eljárások technológiai paramétereinek meghatározását, technológiai eljárástól függően a szükséges előmelegítési hőmérséklet és a hűlési idő számítását, valamint a technológiai tervezés előírt dokumentumainak számítógépes elkészítését. A „*Hegesztési folyamatok modellezése*” témakörben fogyóelektródás, védőgázos ívhegesztési eljárások leolvadási jellemzőinek modellezése eredményeként készült el a hegesztési paraméterek számítására alkalmas algoritmus, feltöltő és leolvasztó hegesztésre egyaránt. Az AWI – hegesztést felolvasztó hegesztésnek felfogva, szintén sikerült az eljárást jól modellező algoritmust kidolgozni a hegesztés-technológiai paraméterek számítására [82].

Új terület a kutatási munkában a matematikai statisztikai módszerek alkalmazása a hegesztés minőségirányításában [43] és a TRIP acélokban a nitrogén diffúziójának modellezése, illetve hatásának vizsgálata [78], [79], [90]. Vékony lemezekből készülő szerkezeteknél, pl. autó karosszériáknál fontos technológia a termikus egyengetés. Ennek a technológiának is elkészítettük a végeelemes modelljét [83].

### ***Képlékenyalakítás***

A projekt keretében elsősorban az ún. *gépipari alkatrészgyártó képlékenyalakító eljárások* különböző technológiáinak végeelemes modellezése képezte a kutatás központi feladatát. Ezen belül, kiemelten fontos területként kezeltük a különféle lemezalakítási eljárásokat, az ipari alkalmazás szempontjából nagy gyakorlati jelentőségű mélyhúzási-, nyújtóhúzással alakító eljárásokat (pl. az autó karosszéria elemek gyártásának modellezését), valamint a hajlítás különféle eljárásait [92-101].

A lemezalakítási folyamatok vizsgálatánál alkalmazott végeelemes rendszerekkel végzett elemzések egyik kulcskérdése az alakított anyag alakítás közbeni viselkedése. Az alakíthatóság kérdésköre rendkívül komplex témakör: napjainkban a lemezalakításban az alakítási határgörbék, alakítási határdiagramok alkalmazása általánosan elfogadott és a végeelemes rendszerek is a modellezés során a különféle anyagmodellek, anyagtörvények

választhatósága mellett a kísérletileg meghatározott alakítási határgörbék alapján végzik az egyes alakítási eljárások megvalósíthatóságának elemzését. Ennek érdekében átfogó tanulmányt készítettünk az alakítási határdiagramok történeti előzményeiről, az alakítási határdiagramok elméleti háttéréről, meghatározásuk módszereiről, valamint az alakítási határdiagramokat befolyásoló tényezőkről [21].

Különbféle összetett lemezalakítási eljárások végeसेlemes modellezését végeztük el az AutoForm és a PAM-STAMP végeसेlemes programrendszerrel, elemezve a különféle technológiai és szerszámparaméterek hatását. Elemeztük a különböző célorientált rendszerek eltérő számítási filozófiájának hatását a számítások időigényére és a számított eredmények pontosságára. Az elemzésekből részletes példatárat állítottunk össze, amely az oktatás, továbbképzés mellett a későbbiekben az ipari alkalmazók számára is fontos segédletet jelenthet [36].

Egyszerűsített közelítő módszer dolgoztunk ki a húzóbordás mélyhúzás vizsgálatára, amely lehetővé teszi a a húzóborda alakjának és méretének elemzését, optimális húzóborda kialakítás tervezését. E témakörből „*Egyszerűsített módszer húzóbordával végzett mélyhúzás elemzésre*” címmel készített PhD értekezés sikeres megvédésére is sor került 2003-ban [19].

A képlékeny lemezalakítás témakörben az egyik fő kutatási téma a többlépcsős képlékenyalakító technológiák modellezése volt. A különféle végeसेlemes rendszerek többlépcsős alakítási eljárásoknál való alkalmazásakor fontos megoldandó feladat az egyes alakítási lépések alakváltozási-, feszültségi- és hőmérséklet-mező eloszlásának az egyes alakítási lépéseket modellező rendszerei között az adatok megbízható átvitele. Ennek egyik kiemelt alkalmazási területe a sorozathúzó préseken végezhető alakítási folyamatok modellezése. Általános rendeltetésű (MARC), valamint speciálisan alakítási feladatok megoldására kifejlesztett célszoftver (DEFORM) alkalmazásával sikeres modellezési feladatokat oldottunk meg 8-12 alakítási lépést igénylő, bonyolult lemezalkatrészek véges elemes modellezésével [87]. A feladat jelentős ipari haszonnal is járt a Bakony Művek Rt. számára végzett ipari K+F munka keretében. A kidolgozott módszerrel jelentős kísérleti költség megtakarítás érhető el a költséges kísérleti szerszámok elkészítésének elmaradásával, valamint az időigényes technológiai kísérletek kiküszöbölésével. Az elért eredményeket hazai és nemzetközi konferenciákon, valamint rangos szakfolyóiratokban is közzé tettük [66-75]. Az ipari feladat megoldásáról zárójelentést készítettünk [71].

A hajlítás különböző eljárásai közül a csőhajlítási eljárások elemzését végeztük el. Ennek keretében kritikai értékelést adtunk a különféle hideg- és meleg csőhajlítási technológiákról, a lemezalakításban általánosan alkalmazott alakítási határdiagramok mintájára kísérletet tettünk a csőhajlításra alkalmazható alakítási határgörbék kidolgozására, továbbá a MARC végeसेlemes programrendszerrel elemeztük a ráncsimító alkalmazása nélkül, valamint ráncsimítóval és többfejes tuskéval végzett csőhajlítást. Az elemzéseket kísérleti vizsgálatokkal ellenőriztük. Az eredményekről részletes összefoglaló tanulmányt készítettünk és konferencia előadásokon ismertettük [22, 37, 39, 47].

A képlékenyalakítás másik nagy csoportját a különféle térfogatalakító eljárások képezik. A projekt keretében e területről a hátrafolyatási technológia elemzését választottuk, mint az egyik legnagyobb termelékenyséű, széles körben alkalmazott térfogatalakító eljárást. Ennek keretében elemeztük a hátrafolyatással gyártott, tubusszerű üreges testek (aeroszolos palackok, tubusok) gyártása során keletkezett különféle gyártmányhibák és az előgyártmány hibáinak kapcsolatát. Ehhez szükséges volt az anyagáramlás végeसेlemes modellezése is. A 3D-s modellezés időigényes futtatásainak megfelelő előkészítéséhez kismintás modell-kísérleteket végeztünk plasztilin modellanyag alkalmazásával. A modellkísérletek és az ennek alapján megtervezett és elvégzett végeसेlemes modellezések az előgyártmány és a

készgyártmány hibái közötti kapcsolatok feltárása szempontjából jól összevethető eredményeket szolgáltatottak. A kapott eredményeket tanulmány és konferencia előadás formájában is közzé tettük, illetve az előgyártmány és a készgyártmány hibái közötti kapcsolat szemléltetésére jól áttekinthető, elektronikusan is kereshető hibaatlaszt állítottunk össze [73-75].

A külső közreműködőként a kutatásban résztvevő BME Anyagtudományi és Technológiai Tanszék kutatási tevékenységének egyik fő területe a nanokristályos anyagok gyártása. A kutatási témához kapcsolódóan elvégzett végeselemes modellezés is alapvetően ehhez a feladatkörhöz kapcsolódik. A nanokristályos anyag előállításához használt egyik módszer a könyöksajtolás (angol néven *Equal channel angular pressing – ECAP*), amely a viszonylag nagy térfogatú, ultra finomszemcsés, esetenként nanoszemcsés anyagok előállításának fontos módszereihez tartoznak. Ez az intenzív képlékenyalakítási eljárás az egyik legperspektivikusabb technológia ezen a területen, amellyel hengeres vagy négyszög keresztmetszetű darabok állíthatók elő. Az alakítási folyamat kulcskérdése, hogy miképp lehet minél nagyobb alakváltozást létrehozni oly módon, hogy az alakváltozási mező minél egyenletesebb legyen, mivel ekkor lehet biztosítani közel egyenletes tulajdonságú anyagot. A végeselemes modellezéssel a következő kérdésekre kerestük a választ: Hogyan befolyásolja a szerszámgeometria, a súrlódás, az ellennyomás, az alakítási út az elérhető maximális alakváltozást, illetve mennyire homogén/inhomogén állapot érhető el az alakítással? Milyen kapcsolat van a 2D-s és 3D-s modellezés eredményei között? Milyen mechanikai kritériummal értékelhető a különböző alakítási folyamat, abból a szempontból, hogy melyik alkalmasabb finomszemcsés anyag előállítására?

E kérdések közül először az egy lépéses alakítás 2D-s és 3D-s modellezésével, a folyamatot befolyásoló geometriai és súrlódási tényezők hatásával foglalkoztunk. Ennek érdekében különböző végeselemes rendszereket használtunk. Az alapvető paramétervizsgálatot a síkalakváltozási modell felhasználásával végeztük. Ez alapján a következő megállapításokra jutottunk: Azonos geometriai kialakítás mellett a súrlódási tényezőnek az átlagos alakváltozásra, illetve az alakváltozási mező inhomogenitására gyakorolt hatása minimális. A geometriai paraméterek közül a szerszám két csatornája által bezárt szögnek a hatása a legerőteljesebb, kevésbé lényeges (de a súrlódási tényezőnél jelentősebb) a szerszámcsatornák külső rádiuszának a hatása az átlagos alakváltozásra és az alakváltozási mező inhomogenitására. Az előzőkből levonható következtetés: a szerszámgeometria elsődleges a kényszerített alakváltozási folyamat megvalósulása szempontjából [24, 25].

A 2D-s és 3D-s modellezés eredményeiből megállapítható, hogy az azonos geometriai, súrlódási, anyagparaméter és kinematikai feltételek mellett elvégzett számítások közül a 2D-s síkalakváltozási állapot, valamint a 3D-s négyszög keresztmetszetű eset alakváltozási állapota hasonló egymáshoz, míg a hengeres darab sajtolásakor kapott eredmények lényegesen eltérnek az előző kettőtől. Az alakváltozási folyamat bonyolultságát mérő mechanikai paraméternek a képlékeny alakváltozás intenzitása – egyenértékű képlékeny alakváltozás hányadost választottuk, amely jól jellemezte a folyamat egyszerű alakváltozástól való eltérését [23, 24].

A folyamat jellegzetessége, hogy a munkadarab keresztmetszete változatlan marad az alakítás során, ugyanakkor nagyon jelentős nyíró alakváltozások jönnek létre a darabban, amelyek eredményeként nagyon finom mikrostruktúra jön létre. A folyamat megvalósítása során a darabban létrejövő alakváltozások eloszlása alapvető jelentőségű a további felhasználhatóság szempontjából. A fő cél a minél homogénebb alakváltozási állapot létrehozása, mivel ebben az esetben biztosítható nagy térfogatban egyenletes finomszemcsés anyagstruktúra előállítása. A végeselemes számítások során a folyamatot befolyásoló technológiai paraméterek hatásával

foglalkoztunk, elsősorban abból a szempontból, hogy milyen feltételek mellett érhető el a közel homogén alakváltozási állapot.

A könyöksajtolás ciklikus jellegéből következik, hogy az alakítási lépések többször ismételhetők. Ezek az ismétlések jelentősen befolyásolják az anyag alakváltozását és mikrostruktúráját egyaránt. Az elméleti számításokat erre az esetre is kiterjesztettük, azzal a megszorítással, hogy egylépéses alakítás esetén 3D-és modellezést tudunk végrehajtani, de a többlépéses alakításnál csak a 2D-s modellezés volt használható [25]. Mivel ez az alakítás meglehetősen összetett, természetesen a végeleemes modellezés eredményeit kísérletekkel támasztottuk alá, illetve a VEM számítási eredményeket szerszámok és technológiák tervezésére egyaránt felhasználtuk [48, 49].

A képlékenyalakítás végeleemes modellezése témakörben végzett kutatások eredményeit a CAD/CAM/FEM kompetencia kurzusok című, mérnöktovábbképző tanfolyamhoz készített jegyzetben foglaltuk össze [86]

### ***Anyagvizsgálat***

A végeleemes modellezés sikere szempontjából a megbízható alapadatok rendelkezésre állása mind az anyagjellemzők, mind a különböző tribológiai-súrlódási-kenési jellemzők szempontjából kulcskérdés. A tribológiai paraméterek technológiai folyamatokra gyakorolt hatását részletesen elemeztük különféle lemezalakító eljárások véges elemes modellezésével. A témából összefoglaló tanulmány [45], díjnyertes TDK dolgozat [50] és diplomaterv [51] is készült. Térfogatalakító eljárásoknál a súrlódási tényező meghatározására a gyűrűzömítő próba általánosan elterjedt és széles körben alkalmazott eljárás. A különféle anyagokon elvégzett kísérleti vizsgálatok mellett az eljárás végeleemes modelljét is megalkottuk. Vizsgáltuk továbbá különböző anyagminőségeken az anyagparaméterek hőmérséklet-függését is, amely fontos alapadatokat szolgáltat a végeleemes rendszerekbe integrálható anyag törvényekhez. Ezen a területen kiemelendő a különféle mélyhúzó lemezanyagok alakíthatósági paramétereinek kísérleti meghatározása [44], valamint a környezetbarát kenőanyagok alkalmazásával kapcsolatos, nemzetközi kutatási projekthez is kapcsolódó vizsgálatok [6, 7], [11]. E projekt keretében számítógépes kenőanyagválasztó rendszert dolgoztunk ki lemezalakító eljárásokhoz az optimális kenőanyag választás biztosítására [9].

A modellezéshez nélkülözhetetlen megbízható mechanikai anyagjellemzők gyors, reprodukálható meghatározására az ME Mechanikai Technológiai Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumában működő korszerű, elektrohidraulikus egytetemes anyagvizsgáló gépre olyan számítógépes mérő-adatfeldolgozó rendszert dolgoztunk ki, amely a hagyományos, szabványos anyagvizsgálatok mellett alkalmas a lemezek alakíthatósága szempontjából kiemelt fontosságú n-r vizsgálatok számítógépes vezérlésére és a mérési eredmények számítógépes feldolgozására is. A számítógépes mérő-kiértékelő rendszerről a vizsgálatok végrehajtását részletesen ismertető felhasználói leírást készítettünk [17]. A kidolgozott rendszert ipari-kutatási feladatok megoldásánál is rendszeresen alkalmazzuk.

Különféle korszerű műszaki kerámiák alkalmazástechnikai kutatásaihoz kapcsolódóan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [41] és SiAlON [56] kerámiák mikroszerkezeti és dinamikus törési szívóssági vizsgálatai alapján a végeleemes modellezéshez is szükséges anyagjellemzők meghatározását végeztük el. A kutatások eredményeit nemzetközi és hazai folyóiratokban és konferenciákon tettük közzé [53-57], [58], [80], [88].

Hegesztett kötések hőhatásövezetében lejátszódó jelenségek kutatásához kapcsolódóan (különös tekintettel a nagy szilárdságú, gyengén ötvözött HSLA anyagokra) kapcsolatot kerestünk a végeleemes modellezéssel meghatározható anyagszerkezeti jellemzők, a mechanikai tulajdonságok és a várható élettartam becsléséhez szükséges anyagi mérőszámok,

valamint a hegesztett kötések ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállását kifejező anyagi mérőszámok között. Az anyagvizsgálati kutatási program egyik fő területe abból a gondolatból eredt, hogy a különböző szerkezetek, szerkezeti elemek anyagfolytonosság hiányoktól mentes gyártása csak elvileg garantálható, továbbá az üzemeltetés során is keletkezhetnek újabb hibák. A hibák között a legveszélyesebbek a repedések, s különösen igaz ez inhomogén anyagszerkezetek esetén (hegesztett kötések hőhatásövezete, különböző technológiákkal felületkezelt szerkezeti elemek, kompozit anyagok). Elemeztük az inhomogén anyagszerkezetek repedéskeletkezési és repedésterjedési sajátosságait kvázisztatikus, illetve ismétlődő igénybevétel esetén. Vizsgálatainkat fémes és kompozit anyagokra egyaránt kiterjesztettük. A vizsgálatok eredményeként fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési határgörbéket származtattunk HSLA acélokra és különböző (fém-, illetve polimer mátrixú) szálerősítéses kompozit anyagokra. A kutatási eredmények alapján megállapítottuk, hogy az alkalmazott módszer általánosan alkalmazható acélokra, nagy szilárdságú acélokra és hegesztett kötéseikre, valamint különféle kompozit anyagokra is. Az összegyűjtött adatok alapul szolgálhatnak a mechanika numerikus módszereivel elvégezhető számításokhoz a repedéssel rendelkező szerkezetek integritásának megítélésre. A kutatási témából *Fáradásos repedésterjedés nagyszilárdságú acélokban és különböző kompozitokban* címmel kutatási részjelentés készült, valamint konferencia előadások hangzottak el hazai és nemzetközi konferenciákon [2, 26].

### ***Összefoglaló értékelés***

Összefoglalóan megállapítható, hogy a Kutatási szerződésben vállalt feladatokat a kutatócsoport maradéktalanul teljesítette. A kutatási eredményekről készített publikációk (21 folyóiratcikk, 50 konferencia előadás), valamint az oktatásban és más kutatási projekteknél is hasznosuló nagyszámú tanulmány (3 Mérnöktovábbképző jegyzet, 11 Felhasználói leírás, 11 Összefoglaló tanulmány, 2 PhD értekezés, TDK dolgozatok és diplomatervek) ugyancsak az elvégzett munka eredményességét támasztják alá. A jelentős publikációs teljesítmény mellett feltétlenül kiemelésre méltó, hogy a kutatócsoport tagjai a kutatási projekt témájához kapcsolódóan 5 nemzetközi (EU FP6, Leonardo, Inco-Copernicus, bilaterális TÉT projektek) és 5 hazai (3 GFVOP, 2 HEFOP) projektben is részt vettek, illetve számos ipari kutatási feladatot megoldottak.