

A projekt fő célkitűzése a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékének fő kutatási területeit jelentő anyagtechnológiák (hegesztés, hőkezelés, képlékenyalakítás) anyagtudományi és technológiai háttérének komplex végeselemes elemzése, modellezése. A projekt kidolgozásában a témavezető irányításával a tanszék fiatal oktatói, kutatói és doktorandusz hallgatói vettek részt.

A kutatás keretében végzett kutatómunkát – a szerződés szerinti munkatervvel való könnyű összehasonlíthatóság érdekében – a szerződés mellékletét képező *Részletes kutatási terv* szerinti éves bontásban ismertetjük.

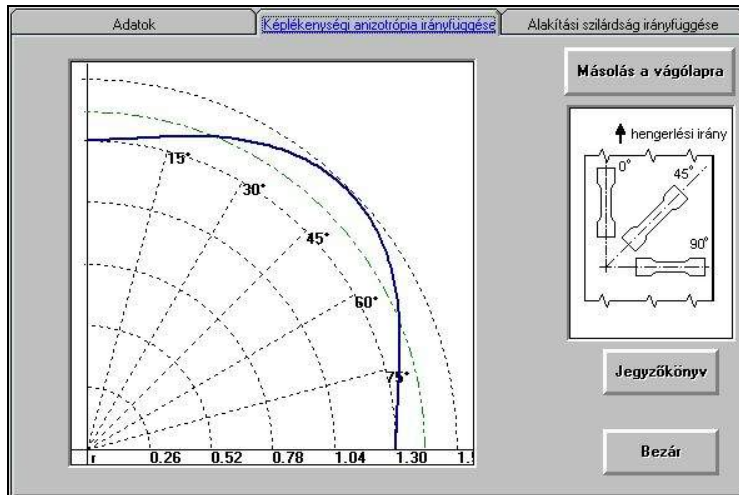
1. A 2006-ban végzett kutatások eredményei

A végeselemes modellezés kulcskérdése a modellezéshez alkalmazott anyagmodellek, anyagtörvények helyessége, a modellezéshez alapadatokként felhasznált mechanikai anyagjellemzők megbízható meghatározása. Ennek érdekében részletesen elemeztük a különféle technológiai célrendszerekben alkalmazott anyagmodelleket, anyagtörvényeket egyrészt a technológiai folyamatelemzés előkészítése céljából, másrészt annak érdekében, hogy a kísérleti anyagvizsgálatokkal milyen anyagjellemzők meghatározása szükséges konkrét vizsgálati anyagok esetén. Az anyagmodellek elemzéséről összefoglaló tanulmányt készítettünk [Lukács Zs., Tisza M.: *Technológiai VEM rendszerekben alkalmazott anyagmodellek*, 2006].

A különféle technológiai elemzéseknél alkalmazandó valós anyagok modellezés szempontjából szükséges anyagjellemzőinek kísérleti meghatározására számítógépes mérő-adatfeldolgozó rendszert dolgoztunk ki, amely alkalmas a tanszéken rendelkezésre álló MTS típusú, elektrohidraulikus működtetésű, egyetemes anyagvizsgáló berendezés vezérlésére, a mérési adatok számítógépes feldolgozására, kiértékelésére. A kidolgozott számítógépes mérő- és kiértékelő rendszert számos ipari kutatási projektben is sikerrel alkalmaztuk. A számítógéppel vezérelt mérő-adatfeldolgozó rendszer fényképe az 1. ábrán látható.



1. ábra. Számítógépes mérő-kiértékelő rendszer a végeselemes modellezésnél alkalmazott anyagjellemzők kísérleti meghatározására



2. ábra. A számítógépes mérő-kiértékelő rendszerrel felvett anizotrópia térkép StW 24 mélyhúzóható anyagminőségre

kiértékelésére alkalmas (Gál I., Kiss A., Kovács P., Tisza M.: *Lemezek alakíthatóságának átfogó értékelése n-r vizsgálattal*, 2006. [2]). A 2. ábrán a kidolgozott mérő-kiértékelő rendszerrel felvett anizotrópia térkép látható StW 24 mélyhúzóható anyagminőségre.

Lemezanyagok végeselemes modellezésénél az alakíthatóság elemzése szempontjából elsődleges fontosságú az alakítási határ diagramok ismerete. A Miskolci Egyetem Mechatronikai és Logisztikai Regionális Egyetemi Tudásközpontja keretében folyó kutatásokhoz kapcsolódva a tanszéken egy komplex alakíthatósági vizsgálóberendezést építettünk ki. A berendezés beszerzését nagyrészt az ML-RET, és kisebb részben az OTKA projekt beruházási keretéből finanszíroztuk. A berendezés, amelynek fényképe a 3. ábrán látható, egy elektrohidraulikus működtetésű lemezvizsgáló gépből és egy 4 CCD kamerás optikai alakváltozásmérő rendszerből áll.



3. ábra. A projekt keretében kifejlesztett komplex alakíthatósági vizsgálóberendezés (baloldalon a komplett vizsgálórendszer, jobb oldalon az optikai mérőrendszer látható)

A megvalósított komplex lemezalakíthatósági vizsgálóberendezés alkalmas a lemezalakításban legáltalánosabban alkalmazott alakíthatósági vizsgálatok elvégzésére és automatikus, számítógépes kiértékelésére. A projekt keretében átfogó elemzést végeztünk az alakíthatósági határ diagramok témakörében (Kovács P., Tisza M.: *Alakítási határ diagramok elmélete és kísérleti meghatározása*, 2006. [9]), részletes elméleti összefoglalót és felhasználói leírást ké-

szítettünk az optikai alakváltozás mérőrendszeréről (Kovács P. Z., Tisza M.: *Vialux AutoGrid – Optikai alakváltozás mérőrendszer*, 2006. [8]). A kidolgozott komplex alakíthatósági vizsgálorendszert több ipari projekt keretében is sikerrel alkalmaztuk (Kiss A, Tisza M., Kovács P.: *Zárójelentés hidegen hengerelt acéllemezek alakíthatóságának minősítéséről*, Megbízó: Dunaferr Zrt., ME MTT, Miskolc, p. 1-125. 2007. [28]).

A tanszék technológiai területeinek egyik fő alkalmazási területét az autóipar képezi. Ez tükröződik az előzőkben ismertetett lemezalakítási kutatások mellett a hegesztési tématerületen is. Az autóiparban a karosszéria gyártásban és a szerelési folyamatokban kiemelt jelentőségű az ellenállás-ponthegesztés. A SysWeld végelelemes programrendszer alkalmazásával modelleztük az ellenállás ponthegesztett kötések kialakulásának folyamatát: matematikai modellt dolgoztunk ki a folyamat közbeni hőátvitel, valamint a ponthegesztés közben létrejövő rugalmas és képlékeny alakváltozások elemzésére. Az ellenállás ponthegesztési folyamat tengelyszimmetrikus volta alapján, egyszerűsített 2D-s modellt alkalmaztunk (Szabó P.: *Az ellenállás ponthegesztés végelelemes modellezése*, 2006. [16]). E témakörben a tanszéken PhD értekezés sikeres megvédésére is sor került *Vékonylemezek ellenállás-pontkötéseinek minőségtechnikai optimalizálása* címmel.

A kutatások egy további súlyponti területét a felületötvöző hőkezelések és a lézeres felületedzés képezte. A kutatások elméleti alapjainak rendszerezése érdekében átfogó elemzést készítettünk egyrészt a vonatkozó szakirodalom, másrészt az e területen az elmúlt évtizedekben megszerzett tanszéki-üzemi kísérleti tapasztalatok alapján a felületötvöző hőkezelések (nitridálás, cementálás, karbo-nitridálás) anyagtudományi és termo-kémiai alapjairól (Lapis E., Schäffer J., Tisza M.: *Felületötvöző hőkezelések anyagtudományi és termokémiai alapjai*, 2006. [35]). Összefoglaltuk a felületötvöző hőkezelések matematikai modellezésére alkalmas módszereket (Rowshan, R.: *Felületötvöző hőkezelések termikus folyamatainak matematikai modelljei*, 2006. [10]). A SysWeld végelelemes programrendszerbe integrálható számítómódulokat dolgoztunk ki a lézeres felületedzés modellezésére (Rowshan, R.: *A lézeres felületedzés elméleti alapjai. A szilárd állapotbeli fázisátalakulások termikus analízise, fázisátalakulási modellek*, 2006. [11]).

A fémes anyagok mellett – különösen az utóbbi években – a nemfémes anyagok egyre szélesebb körű alkalmazása figyelhető meg. A technológiai alkalmazások szempontjából – a tanszéki kutatási irányok figyelembevételével – különös fontosságú a különféle műszaki kerámiák alkalmazási lehetőségeinek elemzése. E célból átfogó tanulmányt készítettünk kerámia anyagok mechanikai viselkedéséről (Kaulits, N., Marosné. B. M.: *Kerámia anyagok mechanikai viselkedését leíró anyagmodellek, anyagtörvények elemzése*, 2006. [6]), valamint a kerámiás anyagok törési folyamatainak matematikai modellezéséről (Kaulits, N., Marosné. B. M.: *Kerámia anyagok törési folyamatainak mechanikai modelljei, a modellek végelelemes rendszerekbe integrálhatóságának elemzése*, 2006. [7]).

2. A 2007. évben végzett kutatások eredményei

A 2007. évben folytattuk a kutatás első évében megkezdett anyagjellemzők gyűjtését a kutatási terv részét képező anyagtechnológiák (hegesztés, hőkezelés és képlékenyalakítás) területén annak figyelembevételével, hogy az egyes eljárásoknál alkalmazott végelelemes rendszerek milyen anyagjellemzők és anyagtörvények megadását igénylik. Ennek érdekében részletesen elemeztük a különféle technológiai célrendszerekben alkalmazott anyagmodelleket, anyagtörvényeket egyrészt a technológiai folyamatok elemzés előkészítése céljából, másrészt annak érdekében, hogy a kísérleti anyagvizsgálatokkal milyen anyagjellemzők meghatározása szükséges konkrét vizsgálati anyagok esetén. Az anyagmodellek elemzéséről összefoglaló tanulmányt készítettünk (Lukács Zs., Tisza M.: *Képlékenyalakító végelelemes rendszerekben*

alkalmazott anyagmodellek, OTKA_NI-061724 Tanulmány, ME MTT, Miskolc, pp. 1-16. 2007. [37]).

Hegesztéstechnológiai eljárások modellezéséhez szükséges anyagjellemzők rendszerezését és szisztematikus feldolgozását végeztük el, figyelembe véve a hegesztési eljárások VEM modellezésénél elsősorban alkalmazott SysWeld végeselemes rendszer követelményeit. Mivel a hegesztéstechnológia eredményessége és a hegesztett kötések minősége szempontjából a kötés hőhatás-övezetében lejátszódó jelenségek kiemelt jelentőségűek, kiemelt témaként szerepelt a repedésterjedés elemzése különös tekintettel a nagyszilárdságú acélokra (Lukács J. et al: *Fáradásos repedésterjedés nagyszilárdságú acélokból és kompozitokban*, OTKA_NI-061724 Tanulmány, ME MTT, Miskolc, pp. 1-32. 2007. [36])

A termo-kémiai eljárások közül elemeztük a gyorsnitridálás és az ionnitridálás disszociációs és abszorpciós folyamatait a nitridálási folyamat gyorsításának és a termokémiai eljárások gazdaságosságának növelési lehetőségeinek számbavételével. A vizsgálatokat különböző acél csoportokra végeztük el, az elemzés eredményeit átfogó tanulmányban összegeztük (Rowshan, R; Tisza M: *A gyorsnitridálás és az ionnitridálás disszociációs és abszorpciós folyamatainak elemzése*, OTKA_NI-061724 Tanulmány, ME MTT, Miskolc, pp. 1-22. 2007. [51]).

A kutatási téma egyik kiemelt területe a lézeres felületedzés, amelynek modellezését a SysWeld végeselemes programmal végeztük. A fázisátalakulások matematikai modellezésére a Leblond modellt alkalmaztuk, és a Johnson-Mel-Avrami egyenleteket integráltuk a SysWeld végeselemes programba a transzformációs kinetika elemzésére. Megfogalmaztuk háromdimenziós modellre a folyamat termikus és metallurgiai egyenletrendszerét, elemeztük acélok egyedi nyomvonalakon történő lézeres felületedzését, amelyek révén előre jelezhetjük a hőeloszlást, a fázisátalakulásokat és az elérhető keménységet a munkadarab tetszőleges pontjaiban, tetszőleges időben. Meghatároztuk a lézeres felületedzés optimális paramétertartományait, kvázi-statisztikus állapotok esetére. E témakörben, 2007-ben sikeresen megvédett PhD értekezés készült (Rowshan R.: *Laser transformation Hardening*, PhD Thesis, ME, 2007. pp. 1-132. [45]).

Folytattuk a képlékeny lemezalakító eljárások határállapotainak megbízható előrejelzésére alkalmas alakítási határ diagramok elméleti és kísérleti elemzését. A témakörben PhD értekezés részfejezetét képező tanulmány készült (Kovács P; Tisza M: *Lemezalakítási eljárások határállapotainak előrejelzésére alkalmas alakítási határ diagramok elméleti és kísérleti elemzése*, OTKA_NI-061724 Tanulmány, ME MTT, Miskolc, pp. 1-36., 2007. [34]), valamint több anyagféleségre alakváltozási határ diagramokat különféle kísérleti módszerekkel is meghatároztunk. E vizsgálatok eredményeként lemezanyagok alakíthatóságának értékelésére újfajta minősítő eljárást is kidolgoztunk az ún. lokális alakváltozási egyenlőtlenesség (Λ) mérőszámának bevezetésével, amely különösen az autóiparban alkalmazott karosszéria lemezek minősítésénél jelentős selejtcsökkenést eredményező minőség javulást eredményezhet.

A kutatási tervvel összhangban, ebben az évben a végeselemes modellezésre alkalmas nagyteljesítményű munkaállomások és kapcsolódó perifériák beszerzése valósult meg. Az ezen eszközökkel felszerelt tanszéki CAD/CAM/FEM laboratóriumot a tanszéki doktorandusok mellett a nappali és posztgraduális képzésben résztvevő hallgatók is használják.



4. ábra. A projekt beruházási kerete terhére beszerzett korszerű, nagy teljesítményű számítógépekkel berendezett számítógépes oktató laboratórium

3. A 2008. évben végzett kutatások eredményei

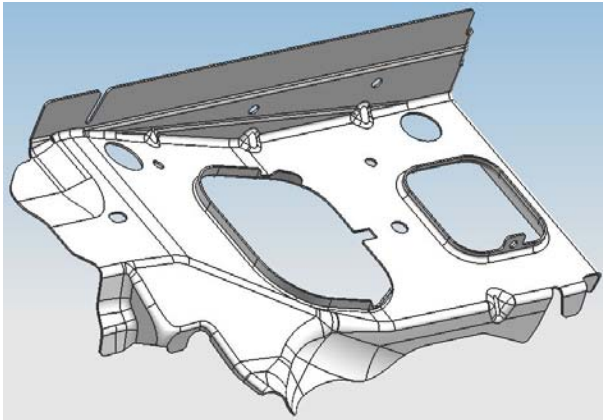
Inhomogén anyagszerkezetek repedéskeletkezési és repedésterjedési sajátosságait elemeztük elsősorban a hegesztés, azon belül is a nagy szilárdágú acélok hegesztése kapcsán. Rendszereztük az acélokban megvalósuló törési mechanizmusokat, a hegesztéskor keletkező repedések fő típusait (hideg-, meleg-, kristályosodási-, újraolvadási-, edződési-, stb. repedéseket). Az International Institute of Welding (IIW) ajánlásait is figyelembe véve matematikai modelleket dolgoztunk ki a repedések keletkezésének és terjedésének elemzésére, valamint a repedések elhárításának, megelőzésének módszereire, javaslatokat tettünk az optimális technológiai folyamat paraméterek meghatározására (Komócsin M.: *Repedések keletkezése és terjedése acélok hegesztésekor*, OTKA NI 61724 Tanulmány, ME MTT, Miskolc, 2008. [68]).

A hegesztett szerkezetekben fellépő, hegesztés okozta belső feszültségek nagyságának és eloszlásának elemzését elsősorban a feszültségek okozta teherbírás-csökkenés és stabilitás problémák csökkentése és elhárítása céljából végeztük el. E problémák elemzése a hegesztéssel együtt járó méret- és alakváltozások meghatározása és csökkentése (kiküszöbölése) szempontjából is fontos. Az elemzések eredményét átfogó tanulmányban összegeztük (Balogh A.: *A hegesztés okozta belső feszültségek elemzése hegesztett szerkezetekben*, OTKA NI 61724 Tanulmány, ME MTT, Miskolc, 2008. [63])

Elemeztük az energia és gázfelhasználás csökkentését, a költséges hőkezelő berendezések kihasználtságát növelő módszereket a nitridálás technológiai folyamatára. Ennek keretében elemeztük a nitridálás folyamata és a késztermék minősége közötti kapcsolatot, a nitridált réteg összetételének, tulajdonságainak a késztermék tulajdonságára gyakorolt hatását (Rowshan, R; Schäffer J; Tisza M: *A nitridálás folyamata és a késztermék minősége közötti kapcsolat elemzése*, OTKA_NI-061724 Tanulmány, ME MTT, Miskolc, 2008. [50]).

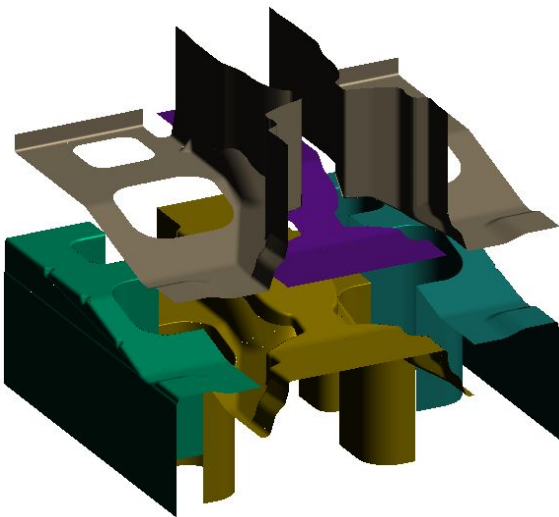
Lézeres felületedzési kísérleteket hajtottunk végre a kidolgozott végelelemes modellezés eredményeinek ellenőrzésére. Mikroszkópi vizsgálatokkal elemeztük a hőhatás okozta anyagszerkezeti változásokat, a fázisátalakulásokat, a felhasználói tulajdonságokat meghatározó szövetszerkezetet, a felületkezelés eredményeként létrejött keménység- és feszültség-eloszlást különféle anyagminőségeken, különböző paraméter-kombinációkkal megvalósított lézeres edzés esetén. A végelelemes modellezés és a lézeres felületedzési kísérletek eredményei alapján meghatároztuk a lézeres felületedzés optimális technológiai paramétereit, a stabil folyamat működési tartományát (*technological window*).

A képlékenyalakító eljárások végelelemes modellezését kiterjesztettük többlépcsős alakító eljárások vizsgálatára mind a lemezalakítás, mind pedig a térfogatalakítás területén. Mindkét technológiai területen a technológiai folyamattervezést és a szerszámtervezést egyaránt jelentősen megkönnyítő és számottevő minőség javulást eredményező olyan integrált megoldásokat dolgoztunk ki, amelyek a különféle CAD



5. ábra. Autóipari lemezalkatrész CAD modellje

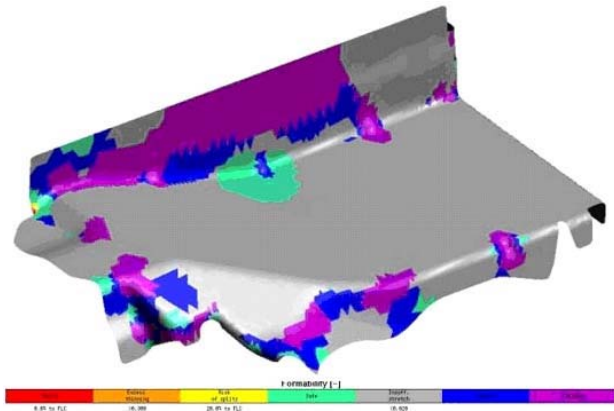
Autóipari lemezalkatrészek többlépcsős gyártási technológiáját és szerszámait dolgoztuk ki a kutatási téma keretében kidolgozott módszerek ipari hasznosításaként több K+F megrendelés keretében. Az 5. ábrán egy jobbos-balos elrendezésű alkatrész CAD modellje látható, amelynek az AutoForm végelelemes rendszerrel kidolgozott technológiai gyártási folyamat modellezését a 6. ábrán szemléltetjük.



7. ábra. Autóipari lemezalkatrész CAD szerszám terve

lésének kapcsolt végelelemes modellezése, amelyet a DEFORM 3D+HT végelelemes programrendszerrel végeztünk.

rendszerekben megvalósított gyártmánytervezés, valamint a dedikált technológiai FEM rendszerekben megvalósítható végelelemes technológiai folyamatlemezés és szerszámtervezés között folyamatos, kétirányú adattranszfer megvalósításával integrált technológiai és szerszámtervezést tesz lehetővé. E folyamatoknál az alakítási eljárások közben gyakran szükséges közbenső hőkezelési eljárások kapcsolt technológiai folyamatának végelelemes modellezését is megoldottuk.

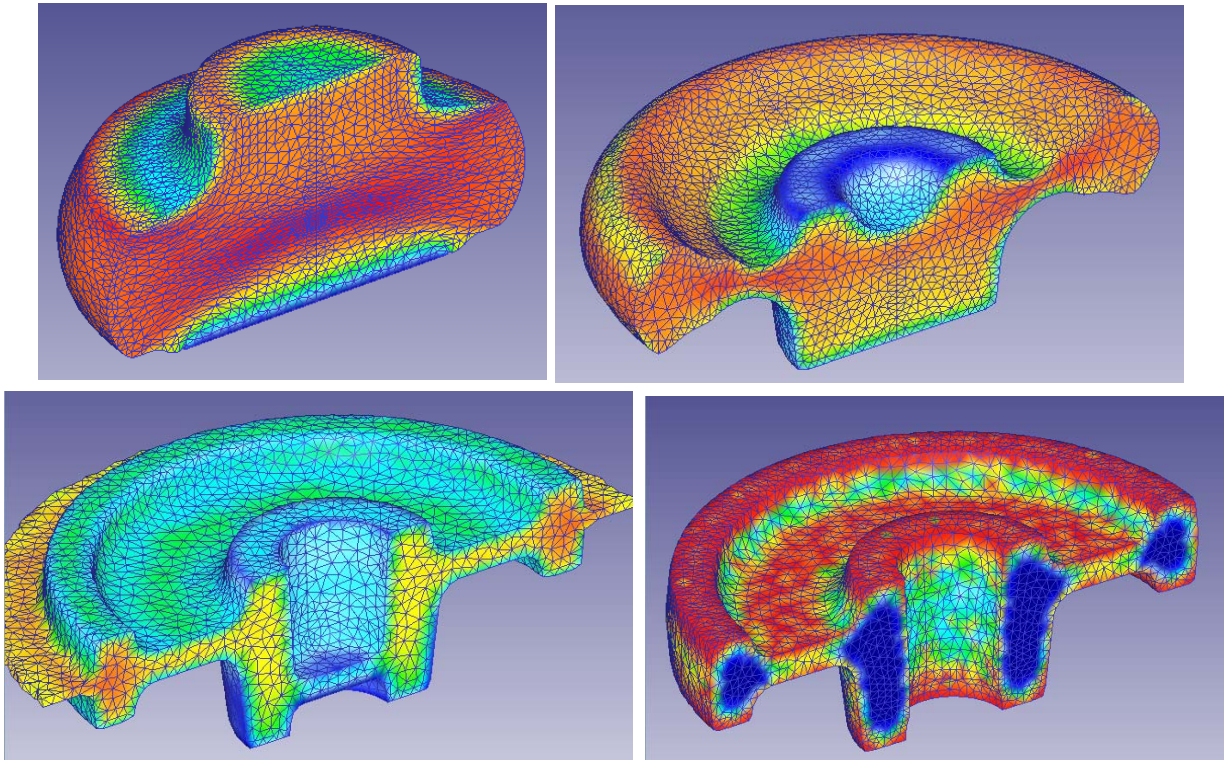


6. ábra. Alakítási folyamat végelelemes modellezése az AutoForm rendszerrel

A technológiai modellezéssel meghatározott optimális alakítási folyamat eredményeiből a FEM rendszerből a szerszámtervezéshez szükséges adatok a CAD rendszer számára közvetlenül átadhatók, amellyel egyrészt a szerszámtervezők fáradságos munkája nagymértékben megkönnyíthető, másrészt radikálisan lecsökkenthető az új gyártmányok gyártásba való bevezetéséhez szükséges idő. Egy ilyen CAD szerszám vázlatot mutat a 7. ábra.

A kutatás keretében elért eredmények egy további fontos ipari hasznosítási lehetőségeire példa melegalakítással gyártott nagyméretű fogaskeréktettek többlépcsős alakításának és hőkezelésének kapcsolt végelelemes modellezése, amelyet a DEFORM 3D+HT végelelemes programrendszerrel végeztünk.

A gyártandó fogaskerék végeselemes modellezéssel meghatározottműveleti sorrendterve a 8. ábrán látható. A gyártás többlépcsős melegalakítással végezhető. Az ábra jobb alsó részletén az edzést követő állapotban a martensites szövet eloszlása látható.



8. ábra. Fogaskeréktest többlépcsős melegalakításának és hőkezelésének kapcsolt végeselemes modellezése

Az előzőkben röviden vázolt ipari hasznosítás mellett a kutatási eredmények a tanszék oktatási tevékenységében is hasznosultak. Mind a számítógépes tervezés, mind pedig a végeselemes modellezés az egyetemi képzésben (a kétlépcsős képzés bevezetésével a mesterképzésben) a gépészmérnök képzésben több szakirányon is a tantervi kötelező tárgyak listáján szerepel, így például az Anyagtechnológiai, az Alkalmazott anyagtudományi, a Hegesztéstechnológiai és a CAD/CAM szakirány tanterveinek is része. Ugyancsak kiemelendő a PhD képzésben való hasznosulása: a témához kapcsolódóan a Mechanikai Technológiai Tanszéken két PhD értekezés sikeres védeése valósult már meg és két további – a szervezett PhD képzést már befejezett, abszolutóriummal rendelkező volt PhD hallgató értekezése rövid távon benyújtásra kerül.

A kutatásokban résztvevők a projekt keretében elért eredményekből a kutatás 3 éve alatt 89 különféle szakközleményt jelentettek meg: ezek közül 33 átfogó tanulmány, illetve kutatási jelentés, 36 túlnyomórészt nemzetközi konferencián elhangzott, nyomtatásban megjelent konferenciacikk, továbbá 20 hazai és nemzetközi szakfolyóiratban megjelent folyóiratcikk, közöttük számos impakt faktoros folyóiratcikk.