



MISKOLCI EGYETEM
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Szerszámgépek Tanszéke
Mechanikai Technológiai Tanszék



Egy süllyesztékes kovácsolási technológia VEM-szimulációjának validálása

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Készítette:

Szabó János

Gépészmérnök mesterszakos hallgató,

CAD/CAM szakirány

YOLZO6

Témavezető:

Lukács Zsolt

egyetemi adjunktus

Miskolc-Egyetemváros

2014

Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
1. A probléma ismertetése	3
2. A süllyesztékes kovácsolás.....	4
3. A kovácsszerszámok tervezése	7
3.1. A kovácsdarab megtervezése.....	7
3.2. A készrealakító szerszámüreg (FD) megtervezése	8
3.3. A zömítőlapok megtervezése.....	11
3.4. Az előalakító szerszámüreg (SD) megtervezése	12
4. A végeleemes szoftverek alkalmazási céljai	13
4.1. A DeForm működésének elvi áttekintése	14
5. Validálás.....	16
5.1. A kovácsdarab mélymaratása	16
5.2. A végeleemes modell felépítése.....	18
5.3. Az eredmények validálása	26
Összefoglalás.....	30
Köszönetnyilvánítás	31
Irodalomjegyzék.....	32
Mellékletek	

Bevezetés

Amennyiben olyan alkatrészt szeretnénk forgácsolás útján gyártani, amely a későbbi használat során jelentős igénybevételnek van kitéve, akkor számításba jöhet a süllyesztékes kovácsolás útján előállított előgyártmány választása. Előnyei közül kiemelkedik, hogy kiváló anyagminőséget biztosít a későbbi forgácsolás számára, illetve gazdaságossá is teszi azt, mivel a leválasztandó forgács mennyisége minimális. Ezeknek köszönhetően a süllyesztékes kovácsolási eljárás igen elterjedt – többek között – a tömeggyártásban gyártott fogaskerekek, illetve tengelyek alapanyagát tekintve.

A TDK dolgozatom témája egy kardánperem előgyártmányt előállító süllyesztékes kovácsszerszám végeselemes elemzése, amely jelenleg nagy számban produkál selejteket. A hiba oka egyelőre ismeretlen. A szerszám terveit az egri Firth Rixson Hungária Kft. bocsátja rendelkezésemre, azzal a céllal, hogy egy modern melegalakítási végeselemes szoftver segítségével felépítsek egy olyan kovácsolási szimulációt a szóban forgó kovácsdarab alapján, amely a mérnökök segítségére válhat a probléma okának feltárásában. Ez a szimuláció validálásával érhető el.

A dolgozatom tárgya tehát egy olyan végeselemes modellezés megalkotása, amelynek eredményét validálás útján alá is támasztom. Az érvényesítést egy választott, mérhető paraméter segítségével fogom elvégezni – addig fogom tökéletesíteni a felépített modellt, míg az abból kimutatott eredmény (közel) meg nem egyezik a valós munkadarabon mért ugyanazon paraméterrel.

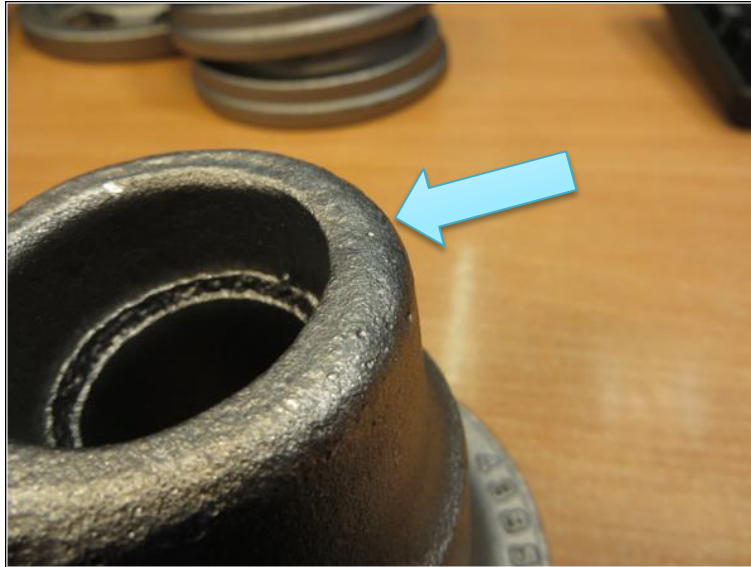
Tanulmányaim során először irodalomkutatással, majd az iparban megszerzett néhány hetes tervezési tapasztalatommal igyekeztem elmélyíteni tudásomat a süllyesztékes szerszámtervezés témakörében. Ennek eredményeképp sikeresen megismerkedtem a tervezés alapjaival, amit a dolgozatom első fejezeteiben be is mutatok a szerszámtervek tervezési lépéseinek megismétlésével. Amennyiben sikerrel zárul a kísérletem, az esetben jelentős időt, munkát és nem utolsósorban költséget spórolok meg a cégnek azáltal, hogy nem kell szerszámpróbákra fordítaniuk anyagi és szellemi erőforrásaikat.

1. A probléma ismertetése

Mint azt a bevezetésben is említettem, egy már létező és működő kovácsszerszámmal kapcsolatban kezdem meg a vizsgálódást. Ezt a süllyeszték garnitúrát – amely a H116-os kóddal van ellátva – az egri üzemben tervezték meg, ahol a szerszám megrendelés esetén jelenleg is gyárt (egy megrendelés alkalmával 1000 darab körül állítanak elő). A probléma az, hogy nagyon nagy számban jelentkeznek minőségi problémák a legyártott termékeken, és ezek közül sok javíthatatlan selejt. A kitöltetlenség szinte minden egyes munkadarabon megjelenik, azonban – szerencsére – túlnyomó részben ez a hiba nem nyúlik túl az ún. kovácsolási köpenyen. Ennek ellenére ez az állapot természetesen nem tartható fenn, meg kell találni a hiba okát és ki kell javítani. A tervezőmérnökök már több apróbb változtatást is elvégeztek a technológiában – mindeddig sikertelenül –, a szerszámok terveit azonban eddig még nem módosították jelentősen. Ennek oka az, hogy a szerszámpróbák költségesek – ha például lecsökkentenék egy átmérőt, vagy egy magassági méretet, az ugyan forgácsolással megoldható, de ha nem vált be a módosítás, akkor – ha ez lehetséges – vissza kell hegeszteni az eltávolított anyagmennyiséget. Viszont ha ez az út már nem járható egy adott szerszám esetében, akkor teljesen új üreget kell gyártani. A forgácsolási költségeken túl természetesen a kovácsolási folyamat működtetésének költségei (például felfuttatási költség, rezsiköltség, munkabér) sem elhanyagolhatóak. Mindemellett közvetett költségek is megjelennek, hisz a szerszámpróba idején tényleges gyártásra nem tudjuk használni a gépeket, késik a megrendelés teljesítési ideje, ezáltal vevőket veszíthetünk el.

A probléma egyik költséghatékony megoldása lehet a végeselemes célszoftverek alkalmazása. Amennyiben sikerül összeállítanom egy validált szimulációt, úgy a továbbiakban nem kell minden jelentősebb változtatás esetén szerszámpróbát végezni, hanem elegendő csupán akkor, amikor a szoftver hiba nélküli darabot ad eredményül.

A kitöltetlenség oka a kovácsdarab méreteiből adódik, ugyanis túl mélyen ül bele az alsó szerszámfélbe, valamint igen szűk helyen kell áramlania az anyagnak, amire így sokkal jelentősebb hatást gyakorol a szerszám és a kovácsdarab közötti hőmérséklet-különbség. A kovácsdarab hibáját az 1. ábra mutatja be.



1. ábra: A H116-os kovácsdarab problémás területe

A darab külső peremének a szerszámgeometriából adódóan sarkosnak kellene lennie, ezzel ellentétben jelentős rádiusszal rendelkezik. Igaz, hogy a kovácsolás egyik szabálya az, hogy az anyagkitöltés és a kivehetőség miatt nem lehetnek éles sarkok, azonban nem emiatt jelentkezik a kitöltetlenség. (Az üregből való kivehetőséget egy kilökö szerkezet biztosítja majd.)

2. A süllyesztékes kovácsolás

Ebben a fejezetben röviden be szeretném mutatni a süllyesztékes kovácsolási technológiáról szerzett ismereteimet, amire eddigi tanulmányaim során tettem szert. Természetesen nem volt lehetőségem a kovácsolás több területének a megismerésére, ismeretanyagom csupán a tárcsaszerű alkatrészek gyártására vonatkozik.

A tárcsaszerű alkatrészek alapvetően két részre oszthatók fel: körszimmetrikus termékek – mint például koronakerekek, kapcsolóperemek, szinkrontárcsák vagy fogaskerekek –, illetve nem körszimmetrikus termékek – például aszimmetrikus peremek, kardánkeresztek, tengelyek vagy kengyelek.

Az általam megismert technológia keretein belül kör- vagy négyzet keresztmetszetű, ötvözött, ötvözetlen és rozsdamentes acélból dolgoznak minimum 40 és maximum 100 mm-es szelvényméretig. Általában a kovácsdarab formája dönt arról, hogy éppen kör- vagy négyzet alakú előgyártmányt választanak-e. Ezt a korlátot az üzem berendezései szabják meg. Az alapanyagot az előzetesen meghatározott vágási hossz szerint fűrészelik (ami pontosabb, és a munkadarab középvonalára merőleges felületet eredményez – viszont lassabb), vagy

hidegen darabolják (ami olcsóbb és gyorsabb, viszont kevésbé pontos, illetve nem szabályozható a kialakítandó vágott felület – így zömítésnél a munkadarab nem áll merőlegesen a szerszámlap síkjához képest).

A ledarabolt előgyártmányokat először 1100 – 1200 °C fölé hevítik egy indukciós kemencében. A hevítési hőmérséklet egy fontos paraméter, mivel bizonyos hőmérséklet felett erős revésedés állhat be. A reve több szempontból is káros: ha ráakódik a szerszámmra, az selejtes termékeket eredményez, továbbá feleslegesen megnöveli a szerszámok terhelését, ezáltal csökkenti azok élettartamát. A hevítést követően az izzó bugákat előírt magasságra zömítik (ún. „pogácsa” lesz belőlük), így a káros zárványok, és helyi dúsulások szétrobbannak az anyagban, emellett a reve nagy része is „lerobban”. A zömítéshez állítva kell betenni a munkadarabot a szerszámba, ami általában két sík, vagy alakos tárcsaszerű szerszámlap. Miután a prés gép egy ütéssel előállította a pogácsát, az operátor egy megfogó segítségével kézzel áteszi a munkadarabot az előalakító üregbe (*Second Die, röviden SD*). Az előalak után a készrealakító szerszámüregbe (*Final Die, röviden FD*) kerül a munkadarab, ahol egy végső ütest követően elkészül a jelenleg még sorjás kovácsdarab. Ugyan az alakítás során a munkadarab hőmérséklete folyamatosan csökken a szerszámmal való érintkezés miatt, de az alakítás olyan mértékű belső hőt termel, ami visszamelegíti a darabot a kellő hőmérsékletre. Ennek köszönhetően a hűlés nem befolyásolja nagymértékben az anyagáramlást.

Az alakítás után történik a sorjátlanítás. A felesleges sorját sorjacsatorna tervezésével és egy sorjázó szerszám (*Cutting Tool, röviden CT*) segítségével könnyedén levághatják a darabról. A sorjázó szerszám két fő részből áll – az egyik a kovácsdarab rögzítésére szolgál, a másik a sorja eltávolítására. Az alakos fészek feladata a kovácsdarab illesztésének megkönnyítése (ez az ún. „spárolás”), a támasz feladata pedig a darab rögzítése és a vágóélek megvezetése. A lyukasztó tűske és a gyűrű távolítja el a nem kívánt sorját. A sorjázó szerszám mozgása igen bonyolult – a fészek az állórész, amelyre először a támasz fekszik rá, majd ezt követi a vágóélek és a sorjaledobó mozgása. A darab külső peremén sorjagyűrű, míg a belső részén egy ún. „dugó” keletkezik, amiket természetesen el kell távolítani.

A süllyesztékszerszám-felek a zömítőlapokkal egyetemben, illetve a sorjázó szerszám is egy-egy szabványos kazettában foglalnak helyet, ami megkönnyíti, lerövidíti az egyik munkadarabról a másikra történő átállást. A termékek méretskálájából adódóan egy kovácsolási kazettában többnyire egy zömítő szerszám, egy előalakító üreg és egy

készrealakító üreg található. Az előalakító üreg a készrealakító üreg terhelését hivatott csökkenteni, ezáltal annak élettartamát növelni. Azonban hiába vannak megelőző intézkedések a szerszámok élettartamára nézve (többek között ilyen a revétlenítés, az előalakító üreg alkalmazása, a nagy tűréstartomány), előbb-utóbb törvényszerűen elkopnak az üregek. Ám ezeket bizonyos keretek között fel lehet újítani – a kovácsdarab geometriájától, azaz az üreg komplexitásától függ, hogy hányszor tehetik ezt meg. A sorjázó szerszámok élei is elkopnak, ezeket újra és újra fel kell hegeszteni, amivel hosszabb éltartamot érhetünk el.

A sorjázást követően történik a még izzó darabok hűtése, amely többnyire levegőn zajlik. Hiába van revétlenítő hatása a zömítésnek, a sorjázás után még mindig tartalmaz ilyen jellegű szennyeződést a kovácsdarab. Ezt homokfúvással, vagy sörétezéssel oldják meg. Ezt követően a darabok még átesnek a megfelelő minőségellenőrzésen, majd csomagolják és kiszállítják a termékeket.

A mérnökök tehát minden egyes megrendeléshez külön megtervezik a kovácsdarabot (amennyiben persze a megrendelés csak a készre munkált alkatrészrajzot tartalmazta), a súllyesztékszerszámokat, valamint a sorjázó szerszámot. A szerszámokat szerszámacélból készítik. A tervezőmérnök első feladata tehát a kovácsdarab előállítás a készre munkált alkatrészrajz alapján. Ennek fő vezérfonala az, hogy a megtervezett kovácsdarab formája a lehető legjobban megközelítse a kész alkatrész formáját a kovácsolási szabályokat betartva (ilyen szabályok például, hogy ne legyenek alámetszések, sarkok, vékony falak, de a darab rendelkezzen a megfelelő oldalferdeséggel). A tervezés során szem előtt kell tartani, hogy a bugának nagyobb tömegűnek kell lennie, mint a kész kovácsdarabnak, mivel csak így biztosítható a megfelelő szerszámkitöltés. A kovácsdarab alapján először a készüregot kell megtervezni, majd az előalakítót, ellátva azokat a megfelelő sorjacsatornával. Ezt követi végül a sorjázó szerszám megtervezése. A szerszámtervezésen túl a mérnökök feladata a technológiai paraméterek meghatározása is. Ilyen paraméter például a zömítésnél a vágási hossz. A vágási hossz megállapításánál ügyelni kell arra, hogy az ne legyen túl nagy, illetve a szelvényméret se legyen túl kicsi, mert akkor zömítéskor fennáll a kihajlás veszélye. A buga szelvényalakjának (kör- vagy négyzet keresztmetszetű) meghatározásánál olyan szempontokat is figyelembe kell venni, mint a szálirány – nem lehet például kocka alakú előgyártmányt választani, mert akkor a dolgozó nem tudja egyértelműen megállapítani a szálirányt és rosszul üti le a terméket, tönkretéve így a kedvező szálirány nyújtotta kovácsolási előnyöket.^{[1] [2]}

3. A kovácsszerszámok tervezése

Ugyan a szerszámok tervezését nem én végeztem el, ennek ellenére nagy vonalakban mégis végigmegyek a tervezés lépésein, annak érdekében, hogy jobban megismerkedhessek a szerszámgeometriával, valamint a technológiával, és nem utolsó sorban azért, hogy számot adhassak a kovácsolási technológiáról szerzett eddigi ismereteimről.

3.1. A kovácsdarab megtervezése

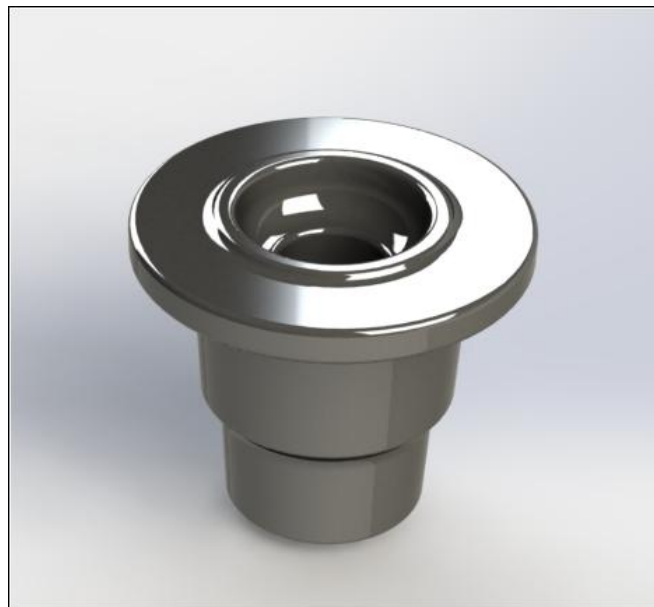
A kovácsdarab megtervezésekor bizonyos szabályokat be kell tartani. Ezek közül az egyik legfontosabb, hogy a kovácsdarab az alakítást követően kivehető legyen a süllyesztékből, abba ne ragadjon bele. Ennek érdekében a darab nem tartalmazhat alámetszéseket, illetve megfelelő oldalferdeséggel és lekerekítésekkel kell ellátni. Ezen felül ügyelni kell arra, hogy a tervezett kovácsdarab lehetőleg egyszerű geometriai elemeket tartalmazzon – ezt ha szükséges, geometriai elhanyagolásokkal tehetjük meg (például a furatokat csak később, forgácsolás útján alakítsuk ki).

A kovácsdarab megtervezése során az esztergált alkatrész köré egy kovácsolási ráhagyást, ún. kovácsolási köpenyt húzunk, ami biztosítja azt, hogy a kovácsolás során sehol sem metszünk bele a számunkra szükséges anyagrészbe. A tervezéséhez így nem kell egy teljesen új modellt alkotni, elegendő a már meglévő esztergált alkatrészmodell méreteinek módosítása. A kovácsolási köpeny alkatrészre húzása a vállalat gyakorlati tapasztalatai alapján történik – ennek megfelelően a köpeny vastagsága 1.5 mm . Ha a ráhagyás értéke túl nagy, az indokolatlanul megnöveli a kovácsdarab súlyát, ha viszont túl vékony, akkor kimunkálásnál nyersfoltos maradhat az alkatrész. A következő lépés a leütési irány és az osztófelület meghatározása, majd az oldalferdeségek (belső 6° , külső 3°) és a rádiuszok ($R2$, a hornyolatok $R10$) felhelyezése, valamint a geometriai elhanyagolások vizsgálata. Az osztósíkot úgy kell elhelyezni, hogy a darab ne tartalmazzon alámetszéseket, illetve, hogy a térfogat nagyobb része az alsó üregbe kerüljön. A kovácsolás szempontjából előnyös, ha a rádiuszok és a falferdeségek minél nagyobbak, ám ez jelentősen megnövelheti a kovácsdarab súlyát, amit viszont minimalizálni kell – tehát meg kell találni az optimális értékeket.

A köpeny felvitelekor az alábbi pontokat kell szem előtt tartani:

- A leütés által kijelölt iránnyal nem lehetnek párhuzamos oldalfalak, mivel ez beragadáshoz vezetne – kivételt képeznek ez alól a sorjázott illetve a lyukasztott felületek, ám ezek csak a sorja eltávolítása után jelennek meg a kovácsdarabon.
- Az $R2$ -es rádiuszok főleg a sarkokra, élekre vonatkoznak, ám ha ennél nagyobb lekerekítés is megengedhető, akkor dönthetünk amellett is – a lényeg tehát, hogy a választott lekerekítési érték ne növelje meg nagymértékben a darab súlyát.

Mindezeknek megfelelően a sorjázott-lyukasztott kovácsdarab a 2. ábra szerint fog kinézni (a valósághű renderelést a *SolidWorks* segítségével valósítottam meg).



2. ábra: A sorjázott-lyukasztott kovácsdarab háromdimenziós modellje

A kovácsdarab tűrésezése – ha nincsenek kitüntetett felületek – viszonylag egyszerű feladat, ami a következők szerint történik: a külső átmérőket és azokat a hosszméreteket, amiket megnövelve az darab térfogata nő $^{+1.5}_0$ tűréssel, míg a belső átmérőket és a térfogatcsökkentő hosszméreteket $^0_{-1.5}$ tűréssel látom el. Azért engedünk meg ekkora tűréseket, mert ezek a méretek magukba foglalják a forgácsolási ráhagyást is.^[1]

3.2. A készrealakító szerszámüreg (FD) megtervezése

A következő lépés a készüreg megtervezése, amelynek alapja az előzőekben megtervezett kovácsdarab. Azért célszerű először a készalakot megtervezni, mert abból sokkal egyszerűbben visszafejthető az előalak, mint fordítva.

Mivel melegen alakítunk, ezért a kovácsolás során számolni kell a hőtágulás jelenségével. Az FD tervezése úgy zajlik, hogy a korábban a kovácsdarabon $^{+1.5}_0$ tűréssel ellátott méreteket 0.5 mm -rel megnövelem, a $^0_{-1.5}$ tűréssel rendelkezőket pedig ugyanennyivel csökkentem a kovácsdarab hőtágulása miatt. Természetesen ez csak irányadó, ettől el lehet térni, ha egy méret ezt megköveteli. Az így kapott méreteket már nem kell tűrésezni – kivétel lesz ez alól a szerszámbetét miatti illesztett méretek.

A kovácsdarabot ún. hidegméretekkel tervezik meg, tehát a meghatározott méretek a kész, már lehűlt darabra vonatkoznak. Az FD méreteit ugyancsak hidegméretekre kell tervezni – többek között a megmunkálás miatt is. Viszont miután megnöveljük, vagy éppen csökkentjük a kovácsdarab egy adott méretét, az még mindig melegméret. Erre a magyarázat, hogy miután megnövelünk egy méretet 0.5 mm -rel, azt azért tesszük, mert ezt szeretnénk kapni a leütés után. Azonban ekkor nem csak a munkadarabon jelentkezik a hőtágulás, hanem a szerszámon is, tehát ez a méret a szerszám esetében is melegméret. Ahhoz, hogy megkapjuk a süllyesztékek hidegméretét, ezt az értéket meg kell szorozni az ún. hőtágulási együtthatóval, ami jelen esetben 1.013 . Bemutatom ezt egy konkrét példán keresztül is: vegyük a kovácsdarab legnagyobb külső átmérőjét, ami $\varnothing 103\text{ mm}$. A hidegméretet kék, míg a melegméretet piros színnel jelölöm:

$$\varnothing 103\text{ mm} + 0.5\text{ mm} = \varnothing 103.5\text{ mm}$$

$$\varnothing 103.5\text{ mm} \cdot 1.013 \approx \varnothing 104.8\text{ mm}$$

Tehát ahhoz, hogy megkapjam az FD végleges méreteit, az összes méretét újra kell számolnom az előbb ismertett módon. A méretek újraszámolása után a kovácsdarab sorjázott és lyukasztott felületeit is el kell látni a szükséges oldalferdeséggel, valamint meg kell tervezni a kovácsdarab forgástengelyére eső szerszámrészt – az ún. „csöcsöket” és az alsó szerszámbetétet –, valamint a sorjacsatornát.

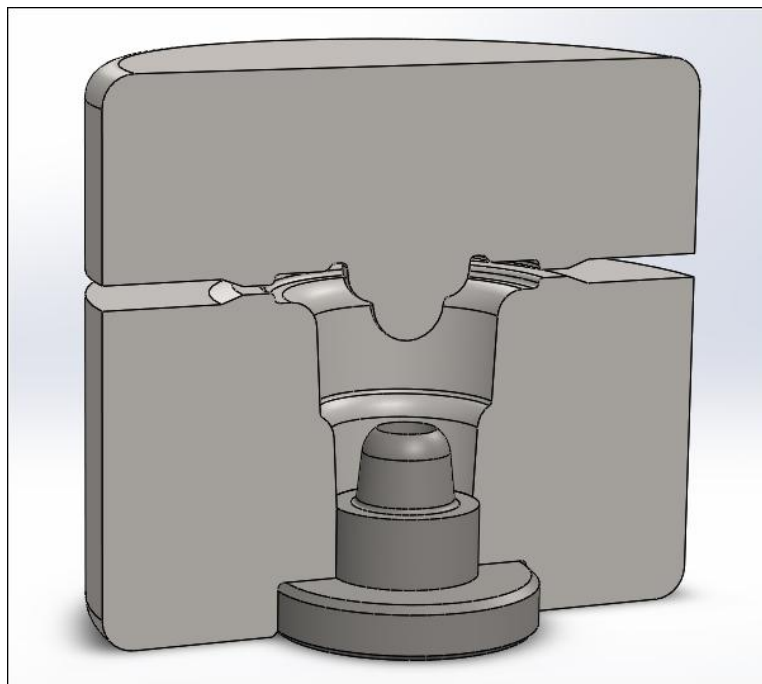
Azért van szükség a csöcsökre, mert ennek köszönhetően az anyag préseléskor a szerszám belsejéből az üreg széle felé áramlik. A legtöbb esetben a csöcsök közti távolságnak a présterhelés csökkentése, és a kedvezőbb anyagkitöltés érdekében minimum 10 mm -nek kell lennie. Továbbá a csöcsöket – amennyiben ez lehetséges – ugyancsak a présterhelés csökkentése miatt egyetlen, kiadódó körívvé kell tervezni. Az alsó csöcs esetében az ültetés megkönnyítése miatt a magasság minimalizálására kell törekedni. Azonban ilyen tekintetben ez a munkadarab problémás, mivel eléggé szűk átmérőjű és mély ülésű. Emiatt meg kell

növelni a csöcsök közti távolságot, valamint a szerszámbetét miatt az alsó csöcs magassága is nagyobb lesz. A szerszám e része viszonylag szabadon alakítható, mivel a csöcsök közti rész – az ún. „*dugó*” – lyukasztáskor eltávolításra kerül.

A következő teendő az alsó szerszámfél kivethető szerszámbetétének a megtervezése. A betét alakjának meghatározása könnyedén megtehető az alsó csöcs kontúrjának lemásolásával, ügyelve arra, hogy el kell helyezni rajta egy átmenő $\varnothing 22\text{ mm}$ -es furatot, amiben a kilökö fog mozogni.

A következő lépés a sorjacsatorna megtervezése, amely szintén a vállalaton belüli gyakorlatot követi. A sorjacsatornát az üregek összezárt helyzetében tervezik meg. Összezárt állapotban a megengedett sorjavastagság 3 mm , így ennek megfelelően ekkora rést hagynak a két szerszámfél között, majd ezt kibővítve helyet hagynak az anyagtöbblet szabad kiáramlásának. A csatorna megtervezésekor ugyancsak ügyelni kell arra, hogy a munkadarab palástfelületét ellássuk a megfelelő oldalferdeséggel, mivel ezt korábban, a kovácsdarab megtervezésekor sorjázott felületként az ütéssel párhuzamosan tervezték meg.

Utolsó lépésként el kell különíteni egymástól a két süllyesztékfelet, így kapjuk meg az alsó szerszámfelet (*Final Bottom, röviden FB*), valamint a felső szerszámfelet (*Final Top, röviden FT*). Az így elkészült készalak háromdimenziós modelljének metszetét, illetve a helyére illesztett alsó szerszámbetétet a 3. ábra mutatja be.

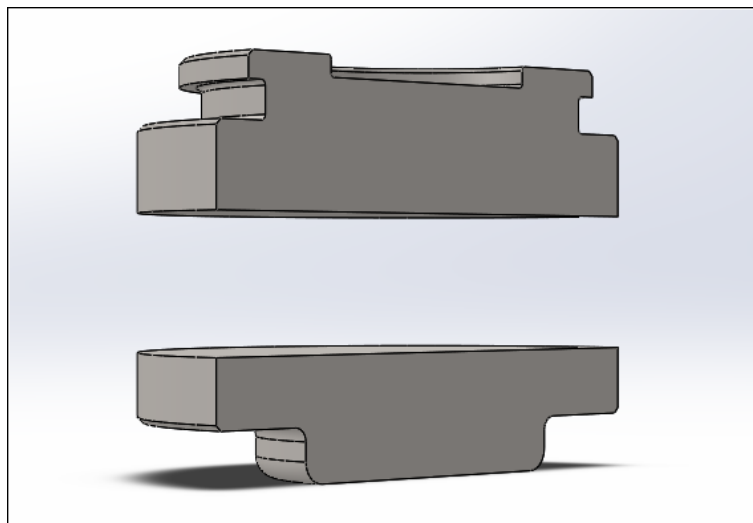


3. ábra: A készrealakító üreg metszetének és a kivethető szerszámbetétnek a háromdimenziós modellje

A következő lépés a zömítőlapok megtervezése, illetve a fontosabb zömítési paraméterek meghatározása. Logikailag a zömítési technológia megtervezése bárhol elhelyezkedhet a folyamatban, azonban számomra itt, az FD terveinek birtokában célszerű ezzel foglalkozni (az üreget kitöltő térfogat súlyának meghatározása miatt).^[1]

3.3. A zömítőlapok megtervezése

A zömítőlapok típusa, illetve a zömítési magasság megválasztása a tervező saját tapasztalatai alapján történik. Első lépésként meg kell határozni az előgyártmány vágási hosszát. Erre a célra a vállalat rendelkezik egy ún. vágási hossz kalkulátorral, amely segítségével a beírt súly alapján megkapható az ajánlott előgyártmány alak, illetve vágási hossz. A munkadarab súlyának meghatározása a *SolidWorks* tervezőrendszer segítségével történik az anyag-hozzárendelés (C45), valamint a sorjával megnövelt testmodell megalkotása után. Az így megkapott vágási súly 2.6 kg , ami alapján a vágási méretek: $\varnothing 60 \times 117\text{ mm}$. A kovácsdarab jellegéből adódóan a zömítőlapok egyszerű tárcsák lesznek bármiféle előalakítást végző geometriai elem nélkül (például domború vagy homorú szerszámlapok). A 4. ábra a zömítőlapok háromdimenziós modelljét mutatja be metszetben.



4. ábra: A zömítőlapok háromdimenziós modelljének metszete

A szerszám átmérője lényegesen nagyobb, mint a bugáé, mivel nem várható el az operátoroktól, hogy minden egyes előgyártmányt pontosan a zömítőlap közepére illesszenek.^[1]

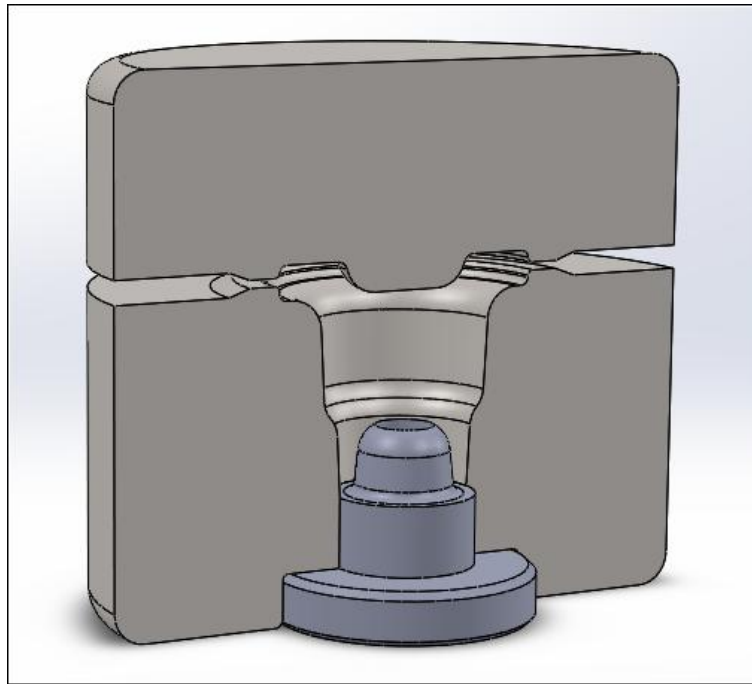
3.4. Az előalakító szerszámüreg (SD) megtervezése

A süllyesztékes kovácsolás során az alakítást végző szerszámok közül utolsóként az előalakító szerszámüreg következik, amelynek tervezése hasonló lépéseket igényel meg, mint a készalaké. Azért alkalmazunk előalakítást, hogy csökkentsük az FD terhelését, ezáltal a kopását, így megnő a szerszám élettartama. A tervezés alapja a készüreg.

A térfogatigény az előalak esetében nagyobb, mint az készalaknál. Tervezésekor így a fő szempont, hogy az FD belső átmérőit meg kell növelni, külső átmérőit pedig össze kell húzni – a gyakorlati tapasztalatok alapján – 0.5 mm -rel. A magassági méretek tekintetében az a fő elv alakult ki, hogy az alsó szerszámfél dimenzióit 1 mm -rel, míg a felső szerszámfélét 2 mm -rel kell megváltoztatni.

Az áttervezés során a rádiuszok értékét is meg kell növelni, mivel az előalakító szerszámüreg sokkal nagyobb alakítási munkát végez, mint a készalak. Amennyiben lehetséges – jelen esetben azonban nem előnyös –, itt is egyetlen kiadódó körívként kell megtervezni a csöcsöket. Az előalak esetében – persze ésszerű keretek között – bátran lehet geometriai elhanyagolásokat is alkalmazni, mivel ez csak egy közbenső lépés. Jelen alkatrész esetében jelentős egyszerűsítést csupán a felső szerszámfél (*Second Top, röviden ST*) terveiben hajtottak végre a présterhelés csökkentése végett (*az alsó szerszámfél rövidített jelölése SB, Second Bottom*).

További jelentős geometriai változás – a méretek módosításán kívül – nincs a két szerszámüreg között. A süllyesztékeken túl a kivehető szerszámbetét méreteit is módosítani kell, természetesen a csatlakozó méreteken kívül. Az elkészült előalakító szerszámüreg háromdimenziós modelljének metszetét, illetve a beillesztett alsó szerszámbetétet az 5. ábra mutatja be.



5. ábra: Az előalakító üreg metszetének és a kivehető szerszámbetétnak a háromdimenziós modellje

Az alakító szerszámüregek megtervezését a sorjázó szerszámok terveinek elkészítése követi, azonban mivel a szimuláció során nem kap szerepet a sorjázás, így azok tervezésének menetét nem ismertetem.^[1]

4. A végeselemes szoftverek alkalmazási céljai

Annak igénye, hogy akár már azelőtt rájöjjünk az esetleges szerszámb hibákra, vagy modellezni tudjuk a képlékenyalakítási folyamatokat annak érdekében, hogy kiszűrjük a selejteket, szinte már a technológiák kialakulásának napjától él. Azonban régebben ez elképzelhetetlen volt, hisz nem voltak meg hozzá a megfelelő feltételek. Természetesen már akkor is léteztek papír alapú ellenőrző számítások, valamint tapasztalati összefüggések, ám nagy áttörést a számítástechnika fejlődése jelentett. Mára eljutottunk odáig, hogy egy mérnöknek nem feltétlenül kell értenie az egyes VEM szoftverek mechanikai, matematikai hátteréhez, elegendő csupán a szoftver és az adott ipari terület megfelelő ismerete, hogy valóban olyan információkat nyerjen ki az adott programból, ami későbbi munkája segítségére válhat.

Mára az elvárások is megnöttek az alakításokkal szemben, amik már meg is követelik e szoftverek létezését, komplexitását, hisz a geometriailag egyre növekvő funkció-összevonási elv miatt egyre bonyolultabbá válnak az előállítandó formák. Napjainkban a tervezés egyik fő irányelve a *Right at first-elv*, ami magyarra fordítva „elsőre jól” jelent – és természetesen

mindezt a lehető legolcsóbban és legrövidebb határidővel. Mindezek csak akkor biztosíthatók, ha a mérnökök rendelkezésére állnak a legkorszerűbb VEM szoftverek, amikkel még bármiféle gyártási folyamat elvégzése nélkül, virtuális környezetben képesek megvizsgálni a szerszámokat, hogy tényleg elsőre jól tervezzenek.

A validálás során a *DeForm* elnevezésű meleg- és hidegalakítási célszoftver lesz a segítségemre. Sok más rendszerhez hasonlóan a *DeForm* is egy olyan végeselemes számításokon alapuló szoftver, amelynek fő profilja a fémek különféle képlékenyalakítási és hőkezelési folyamatainak modellezése. Azzal, hogy ezeket a feladatokat számítógépeken, azaz virtuális környezetben oldjuk meg, lehetőséget nyújtunk a tervezőmérnökök számára, hogy:

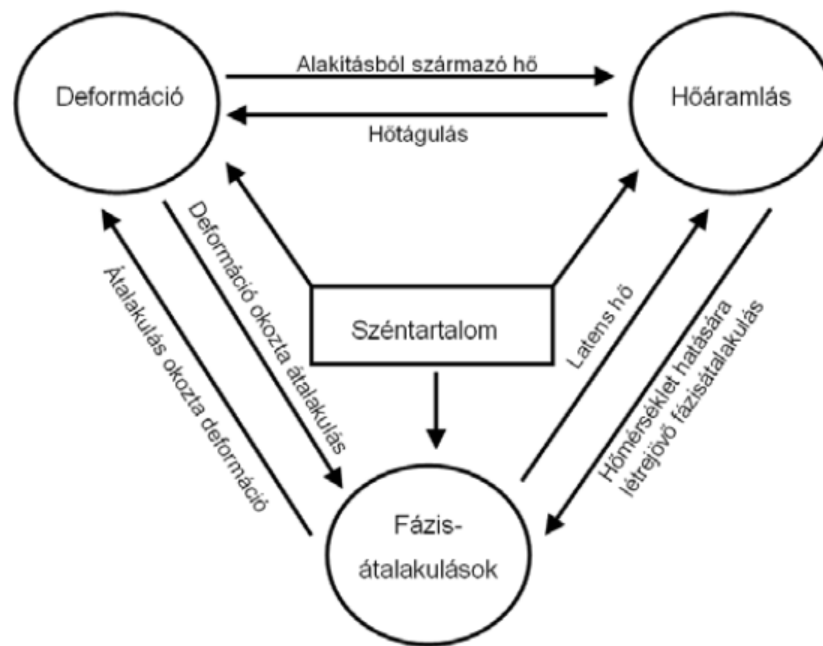
- csökkentsék a szerszámok tesztelésére, újratervezésére és átalakítására szánt költségeket és időt;
- a szoftverek segítségével újabb és jobb megoldásokkal állhassanak elő annak érdekében, hogy csökkentsék az anyag-, valamint a gyártási költségeket;
- jelentősen lerövidíthessék egy új termék piacra dobásának időszükségletét.

A piacon található legtöbb VEM-szoftverrel ellentétben a *DeForm* fő profilja a deformációk vizsgálatán alapszik. Felhasználóbarát grafikus kezelőfelület teszi lehetővé az adatok kényelmes és egyszerű előkészítését, valamint a szimuláció lefuttatását, így a mérnökök ahelyett, hogy egy bonyolult program betanulására szánják idejüket, nyugodtan koncentrálhatnak a deformációs feladatokhoz szükséges modellek megalkotására.

A szoftver kulcseleme a teljesen automatizált és optimalizált hálózóalgoritmus, amit kifejezetten a nagyobb deformációs problémák megoldásához fejlesztettek ki. A szoftver adaptív újrachálózást alkalmaz, ami azt jelenti, hogy a számolás közbeni újrachálózás során ott sűríti az új hálót, ahol alakváltozás történik.^{[3][4]}

4.1. A DeForm működésének elvi áttekintése

Ma a *DeForm* rengeteg célterületnek szolgáltat végeselemes almodulokat, mint például a forgácsolás, a hengerlés, a hőkezelés, vagy éppen a kovácsolás. E sokrétűségét azért tudta megvalósítani, mert a melegalakítási folyamatok modellezését leíró egyenletei továbbfejleszthetők voltak más alakítási problémák megoldására is. Így a *DeForm* a kapcsolt termo-mechanikai folyamatok modellezésének területén számos képlékenyalakítási problémát iparilag elismert módon képes vizsgálni. A szoftver logikai felépítését a 6. ábra mutatja be.



6. ábra: A kapcsolt termo-mechanikai folyamatok a szoftverben ^[3] (2.1. ábra) ^[4]

A modellezendő folyamatok így az alábbi fő csoportokra bonthatók:

- a képlékenyalakítás során bekövetkező deformáció;
- a hőfolyamatok okozta deformáció;
- a szimuláció tárgyát képező anyag metallográfiai sajátosságaiból adódó fázisátalakulások.

Mivel a *DeForm*ban az egyes folyamatokat leíró modellekben a karbontartalom az egyik jellemző paraméter, így ez mindhárom csoportra hatást gyakorol. Az egymás mellett lejátszódó folyamatokat az alábbi fizikai jelenségek kötik össze:

- az alakítás során végzett munka egy része hővé alakul, ami hőfolyamatokat generál;
- a hőközléssel bevitt energia a hőtágulás eredményeképpen alakváltozást indukál;
- a hőmérséklet mező miatt fázisátalakulások indulnak el, amik a felszabaduló hő útján visszahatnak a mezőre;
- a fázisok fajtérfogatának megváltozása lokális és strukturális feszültségeket okoz, ami deformációhoz vezet;
- az alakítás hatására közvetlenül is elindulhatnak fázisátalakulások (lásd TRIP-acél).

A szoftver három jól elkülöníthető modellezési részfolyamata a következő:

- *Pre Processor*: alapvetően a modell összeállítására szolgál. Itt konkretizáljuk a megoldandó végeleemes problémát, illetve itt jelöljük ki a feladathoz szükséges adatbázist a program számára.
- *Simulator*: ez a részfolyamat felel a problémák megoldásáért. Itt történnek a végeleemes számítások a modellezéssel összefüggő matematikai iterációk útján.
- *Post Processor*: feladata a végeredmény grafikus megjelenítése.^{[3] [4]}

5. Validálás

Ahogy a bevezetésben is említettem, a szimuláció validálásához választani kell egy a modellen és a valós darabon is mérhető paramétert az eredmény helyességének ellenőrzésére. Az általam választott paraméter a kovácsdarab szálfutása lesz, amely a meghatározott előkészületek elvégzése után szabad szemmel is láthatóvá válik.

5.1. A kovácsdarab mélymaratása

A vizsgálati mintadarab előkészítésének első lépése, hogy kivágjunk egy szeletet a kovácsdarabból. Mivel a szoftverben is az egyik szimmetriasík mentén vizsgálódok majd, így a valós darabból is innen vágok ki egy 10 mm-es szeletet, amelyen ezután további műveleteket kell elvégeznem. A darabolást egy keretes fűrészgépen hajtottuk végre a Mechanikai Technológiai Tanszék műhelyében, amelynek folyamatát a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra: A kovácsdarab darabolása egy keretes fűrészgépen

Mivel a maratást fényesített felületen kell elvégezni, ezért a következő lépés a munkadarab felületének finommegmunkálása síkköszörűgépen. Természetesen az erővonalak az abrazív megmunkálás után még nem lesznek láthatóak, azok csupán a mélymaratást követően válnak észlelhetővé. A művelet során 0.1 mm -t munkáltunk le a fényesítendő felületből. A köszörülést a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra: A mintadarab előkészítése síkköszörűgépen

A következő feladat a maratás. Ha nem végeznénk el a maratást, akkor a fényesített felületen általában csak a nemfémes zárványok és grafitlemezek, fészkek lennének láthatóak. A fémes jellegű szövetelemeket, fázisokat makromaratással kell láthatóvá tenni, ami a vas- és acélgyártmányok esetében az egyik legjobb módszer. A mélymaratást különböző savakkal, savkeverékekkel kell elvégezni, amik az által teszik szabad szemmel is láthatóvá az acélban található finom repedéseket, lyukacsosságot, illetve a szálirányelrendeződést, hogy ezeken a helyeken erősen kimarjék az acél. A dúsulásos zónák alakja és iránya alapján tehát lehetőség van a szálirányok kimutatására, ami alapján többek között megítélhető a melegalakítási technológia, illetve az én esetemben a VEM-modell megfelelése.

A mélymaratáshoz használt számos marószert közül jelen esetben az *Oberhoffer-féle* marószert (primer marószert) alkalmaztuk, melynek összetétele a következő:^[5]

- 500 cm^3 desztillált víz,
- 500 cm^3 96 %-os etilalkohol,
- 0.5 g ón-klorid,
- 1 g réz-klorid (kupri-klorid),
- 30 g vas-klorid (ferri-klorid),

- 42 cm^3 konc. sósav (fs. 1.19).

A maratáshoz a finomkőszőrülést követően sok esetben még csiszolni és polírozni is kell a próbadarabot. A maratás megkezdése előtt alkohollal gondosan le kell tisztítani a mintadarabot, majd szárazra kell törölni. A maratás közben ügyelni kell arra, hogy a marószerszám egyenletesen lepje el a csiszolatot, ellenkező esetben foltos felületet kaphatunk. A maratás szobahőmérsékleten 5 – 30 másodperces folyamat.^[5]

A maratás végeztével lehetőség nyílik a makroszkópos vizsgálatra. A 9. ábra a kovácsdarab felületének egy részét mutatja be a mélymaratást követően.



9. ábra: A mintadarab felülete mélymaratás után

A felvétel készítésekor ügyelni kell a megvilágítás szögére, hogy a legjobb betekintést kapjuk az erőhatásvonalakra. A mintadarabon további műveletet nem kell végezni, így a következő lépés a végeselemes modell megalkotása a *DeForm*ban.

5.2. A végeselemes modell felépítése

A szimuláció során igyekezni kell ugyanazokat a körülményeket megteremteni a virtuális környezetben, mint amit a megmunkálás és technológiai feltételeket biztosítanak a valós kovácsolás során. Természetesen csak azokat az inputokat kell vizsgálni, amelyek hatással vannak a kovácsolási technológiára – ezáltal a szerszámkitöltésre, és így a jelentkező probléma okára. A következőkben a modellezéshez szükséges beviteli adatokat gyűjtöm össze:

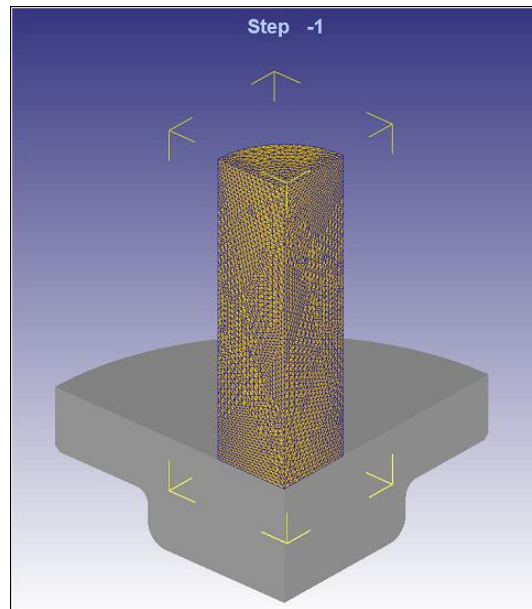
- a kovácsdarab alapanyaga C45-ös acél (egyéb jelölései: 1.0503, *AISI* – 1045);
- a kiinduló buga vágási hossza $\varnothing 60 \times 117\text{ mm}$, amit 95 mm-re kell zömíteni;

- a bugát a megmunkálás előtt egy indukciós kemencében 1200 °C-osra hevítik;
- a kovácsolás megkezdése előtt a szerszámokat gázégővel előmelegítik: a zömítőlapokat 100 °C körüli hőmérsékletre, míg az SD- és FD-üregeket 150 °C körüli értékre. A munkadarab méretétől és hőmérsékletétől függően ez az átlagolt érték értelmezhető a kovácsolási művelet során;
- az alakítás során a környezeti hőmérséklet 50 °C körüli;
- az alakító gép egy P3-as mechanikus excenter sajtó 1600 t alakítóerővel;
- a gép másodpercenként 1 ciklust tud végrehajtani;
- a lökethossz 350 mm, amit nyitott állapotban mérhetünk a zömítőlapok között.

Az inputok ismeretében a következő lépés az első modell megalkotása a végeselemes szoftverben – ezt a *DeForm Pre Processor* segítségével tudom elkezdni. A modellalkotás bemutatása során igyekszem csak a jelentősebb beállításokra kitérni. Az első modell esetében a céloom csupán egy működő (lefutó) szimuláció összeállítása, amit a továbbiakban már csak finomítani kell. A képlékeny alakításon túl a hőmérsékleti viszonyok miatt (hűlés és visszamelegedés) a szerszámok zárását és nyitását is szimulálni fogom.

A háromdimenziós környezet megnyitása után az első teendőm, hogy beimportáljam a munkadarab (*Workpiece*) és a zömítőlapok (*Top Die*, *Bottom Die*) háromdimenziós modelljét – ezt a rendszersemleges *STEP* kiterjesztés segítségével tehetem meg (megkönnyíti a későbbi pozicionálást, ha a 3D-s tervező szoftverben már eleve egytengelyűként rajzolom meg a testmodelleket). Arra ügyelnem kell, hogy miután behívtam a munkadarabom modelljét, a *Geometry* fülön a *Scale GEO* gomb segítségével meg kell növelnem a geometriát a hőtágulási tényező értékével (tehát 1.013 -szorosára), mivel szerszámtervezésnél is ezt az értéket használtam, a szimulációban pedig könnyebb a munkadarabot módosítani, mint külön-külön mind a hat szerszámot. A munkadarabot képlékenynek (*Plastic*), míg a szerszámokat rideg (*Rigid*) testeknek tekintem, ennél fogva csak az előbbi anyagát kell definiálnom, illetve azt kell behálóznom. (A C45-ös acélra vonatkozóan található anyagtörvény a szoftverben.) Ez azért lehetséges, mert nem a szerszámot, hanem a kovácsdarabot akarom vizsgálni. A hálózás (*Mesh*) tekintetében azt írjuk elő, hogy a kész kovácsdarab 3 mm vastag sorjacsatornájába vertikálisan 2 – 3 csomópont essen. Ennek érdekében először 50 000 -es hálóelemmel futtatok. A munkadarab hőmérsékletét 1200 °C-ra állítom be, míg a zömítőlapokét 100 °C-ra. A hálógenerálást követően egymáshoz pozicionálom a három objektumot az *Object positioning* menüpont segítségével – a munkadarabot az alsó zömítőlapra ejtem, majd a

lökethossznak megfelelően 350 mm -re állítom a két szerszámlap közti távolságot –, majd megadom a szimmetriasíkokat. Ha megfelelően állítom be a szimmetriát, úgy elegendő a modellek egynegyed körcikkét bevinni a szoftverbe, mivel körszimmetrikus geometriákról van szó. A behálózott, pozícionált munkadarabot a 10. ábra mutatja be.



10. ábra: A hálóval ellátott munkadarab modellje a DeFormban

A következő lépés a szerszámmozgás megadása: jelen esetben csak a felső zömítőlap fog mozogni $-Z$ irányban. A *Movement* pont alatt tudom beállítani az alakító gép típusát (*Mechanical Press*), a lökethosszt, a kovácsolási löketet illetve a ciklusidőt (1 ciklus/másodperc). Több lehetőségem is van annak beállítására, hogy mikor álljon le a szimuláció: meg tudok adni egy minimális távolságot a két szerszám között, amit ha elér, leáll a számítás, vagy definiálni tudom előre a lépések számát. Mivel az utóbbi esetében egyszerűbb a szerszámnyitás modellezése, így én ezt választom. Ennek megfelelően ki kell számolnom a lökethosszt: $350\text{ mm} - 95\text{ mm} = 255\text{ mm}$. Ha ezt az opciót választom, akkor a lökethosszt és a kovácsolási löketet azonos értékre kell beállítanom.^[6]

Az általános beállításokat a *Simulation Controls* menüpontban találom, ahol a *Main* fülön jeleznem kell, hogy jelen modellezése esetén az alakváltozás (*Deformation*) mellett hőátviteli folyamatokat (*Heat transfer*) is számítson a szoftver. A *Simulation Steps* fülön meg kell adnom, hogy hány lépésből álljon a számítás, illetve, hogy hány lépésenként mentse el a kiszámított értékeket a *Post Processor* számára. Mivel a *Step Increment* fülön azt állítom be, hogy az inkrementálás a szerszámmozgás alapján történjen (*Die displacement*), mégpedig 1 mm -enként, és mivel 255 mm -es a lökethosszom, így a szerszámzárást, a $-$ nyitást, és a

nulladik lépést is beleszámolva 511 lépésre van szükségem ($2 \cdot 255 + 1$). A folyamatot minden lépés után elmentem. Mivel a szimulációt a lépések számával vezérlem, így a *Stop* fülön már nem kell megadnom semmilyen leállítási kritériumot. Az újrahálózási kritériumot a *Remesh Criteria* fülön 0.5-re állítom, míg a környezeti hőmérsékletet a *Process Conditions* pont alatt 50 °C-ra.

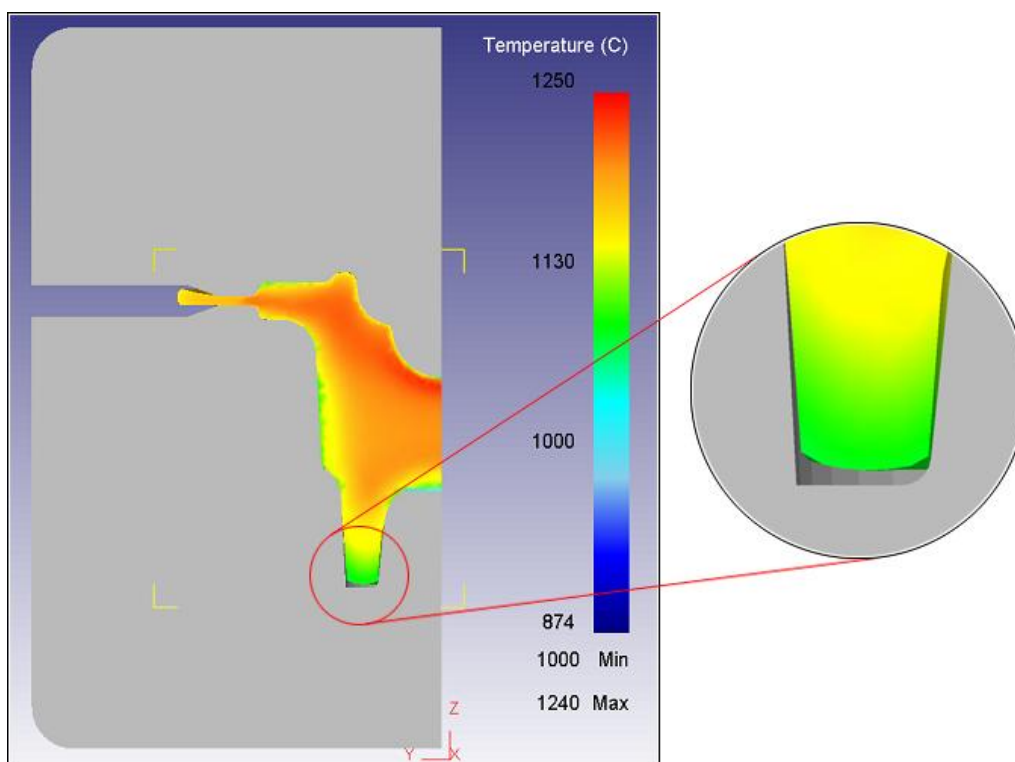
Az utolsó lépés a peremfeltételek megadása (*Inter-Object*). Itt tudom definiálni, hogy mely objektumok érnek össze, és az ütközés során melyik szenved az alakváltozást (*Slave*). Továbbá itt kell beállítanom a súrlódási tényezőt, amire elfogadom a szoftver által a melegalakításhoz ajánlott 0.25 -ös értéket. Mivel korábban bekapcsoltam a hőátviteli folyamatokat, így itt a *Thermal* fülön beállíthatom a hőátadási tényező értékét (jele: k) – első körben itt is elfogadom az alakításra vonatkozó ajánlást, ami jelen esetben $5 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$. Ezzel az adott szimuláció esetében befejeztem a *Pre Process* modul beállításait, így egyedüli teendőm már csak az adatbázis generálása a *Database Generation* menüpontban. Amennyiben mindent hiánytalanul elvégeztem, elindíthatom a megoldó modult (*Simulator*).

Miután lefutott a zömítés, jöhetnek az előalakítás szerszámai. Természetesen az utolsó zömítési lépés után kell áttérnem a következő műveletre, amire a későbbiekben 2-es műveletként fogok majd hivatkozni. Mivel a kivehető szerszámbetét és a kilökö mozgását nem szimulálom, így az SB (és az FB) geometriáját átalakítva egy modellként építem fel a három szerszámelemet. A geometriák beimportálásánál ügyelni kell arra, hogy pozicionálásnál a munkadarab egy helyben maradjon, és csak a szerszámokat mozgassam, azt érintsem hozzá a darabhoz – ennek a szálirányelrendezés számításánál mutatkozik majd meg a jelentősége. Az előalakítás során ugyanazokat a beállításokat kell alkalmaznom, mint zömítésnél – kivételt képez ez alól a szerszámok közti távolság, valamint a szerszámhőmérséklet, ugyanis az SD (és később az FD) 150 °C -os. (A munkadarab hőmérsékletét nem kell beállítanom, azt ugyanis hozza magával a zömítési műveletnek megfelelően.) Pozicionálásnál a sorjacsatornák közti távolság a korábban meghatározott lökethossz (255 mm), megnövelve a sorjacsatorna vastagságával (3 mm) – tehát 258 mm. A peremfeltételek frissítése, és az adatbázis ismételt generálása után újból elindíthatom a futtatást.

Az előalakítás kiszámítása után utolsó lépésként a készrealakítás következik. A 3-as művelet beállításai teljesen megegyeznek a 2-es művelet paramétereivel – természetesen a megfelelő szerszámgeometria becserélése után –, annyi különbséggel, hogy itt már felesleges

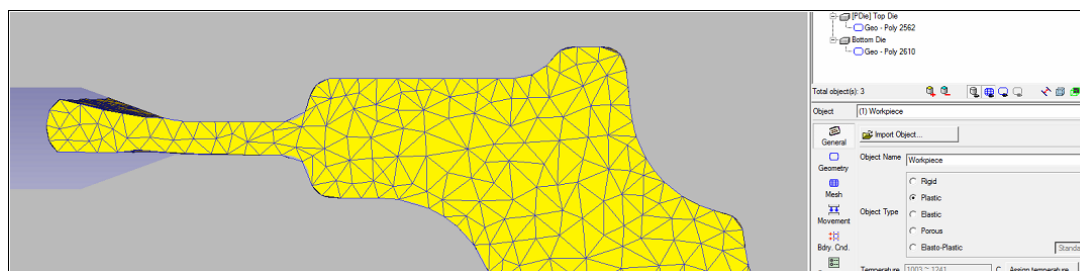
a szerszámnyitás szimulációja. Ennek érdekében már csak 256 számítási lépésre van szükségem (a lökethossz plusz a nulladik lépés). Leállítási kritériumként így most már azt is megadhatom, hogy a sorjacsatornák közötti távolság Z irányban 3 mm legyen.

A három művelet lefuttatása után az eredmények kiértékelése következik a *Post Processor* segítségével. A 11. ábra az elkészült kovácsdarabot mutatja be az összezárt készüregben a hőmérsékleti zónák feltüntetésével.



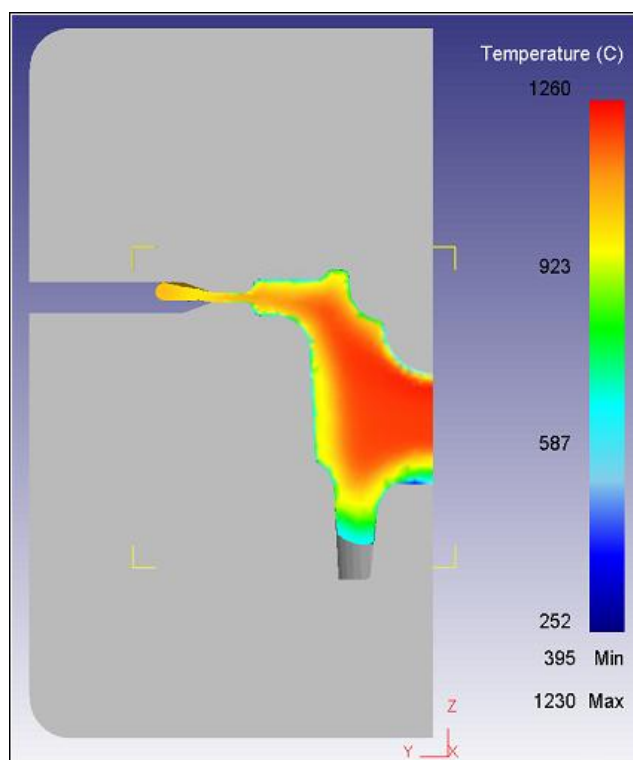
11. ábra: Az üregkitöltés $k = 5\text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ esetén, a hőmérsékleti zónák feltüntetésével

A kialakult geometria jó közelítéssel megfelel a valóságnak (lásd a kiszorított anyagtérfogatot), azonban látható, hogy az anyag nem éri el az üreg alját. Mivel ezen a területen jelentkezik a probléma, és ezt szeretném jobban megvizsgálni, így tovább folytatom a modellezést. Az újabb szimuláció elindításához szükségem van egy olyan paraméterre, aminek a változtatása kihat az anyagkitöltésre. A korábban leírtak alapján úgy vélem, hogy a következő futtatásnál a hőátadási tényezőt módosítom. Annak érdekében, hogy kiderüljön, mekkora változást mutat az eredményben e tényező módosítása, veszem a szoftver által ajánlott $5\text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ tízszeresét illetve tized részét. A modellezés elején előírtam, hogy legalább 2 – 3 csomópontot tartalmazzon a 3 mm -es sorjacsatorna Z irányban. A 12. ábra ezen a területen mutatja meg a generált hálót.



12. ábra: A kovácsdarab csomópontjai a sorjacsatornában

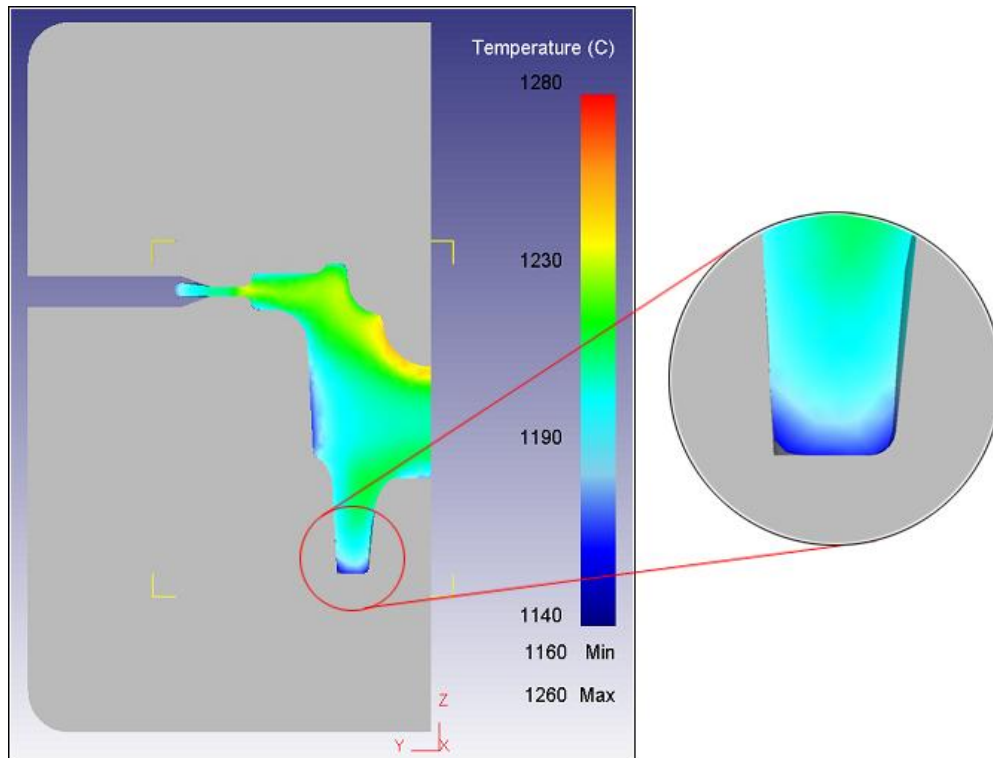
Ez alapján elfogadom az 50 000-es elemtagú hálót, hisz az előírt területen átlagosan 3 csomópont helyezkedik el Z irányban – így a modellezést ezzel a hálóval folytatom. Először az $50 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ -os hőátadási tényezővel kezdek. Fontos, hogy e kivételével minden más paramétert változatlanul hagyjak, mivel csak így láthatom meg, hogy valóban ezzel a paraméterrel kell-e játszanom. Amennyiben a változtatás nem befolyásolja az eredményt, úgy a következő lépés az anyagtörvény finomítása lehet. Annak érdekében, hogy a hálóm is ugyanaz legyen, mint az első futtatásnál, egyszerűen csak beimportálom a munkadarabom az előző futtatásom –1. lépéséből. Miután minden beállítást megismételtem, valamint lefuttattam a zömítést, az előalakítást és a készrealakítást, a 13. ábrán látható eredményt kaptam.



13. ábra: Az üregkitöltés $k = 50 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ esetén, a hőmérsékleti zónák feltüntetésével

Látható, hogy a nagyon magas hőátadási tényező ($50 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$) nagymértékben és negatívan módosította a szerszámkitöltést. Emellett míg az előző futásnál 1000°C volt a

minimum hőmérséklet, addig most a kilökönél csupán 395 °C. Lássuk, hogyan alakul az anyagáramlás 0.5 N/sec/mm/°C-nál – az eredményt a 14. ábra szemlélteti.



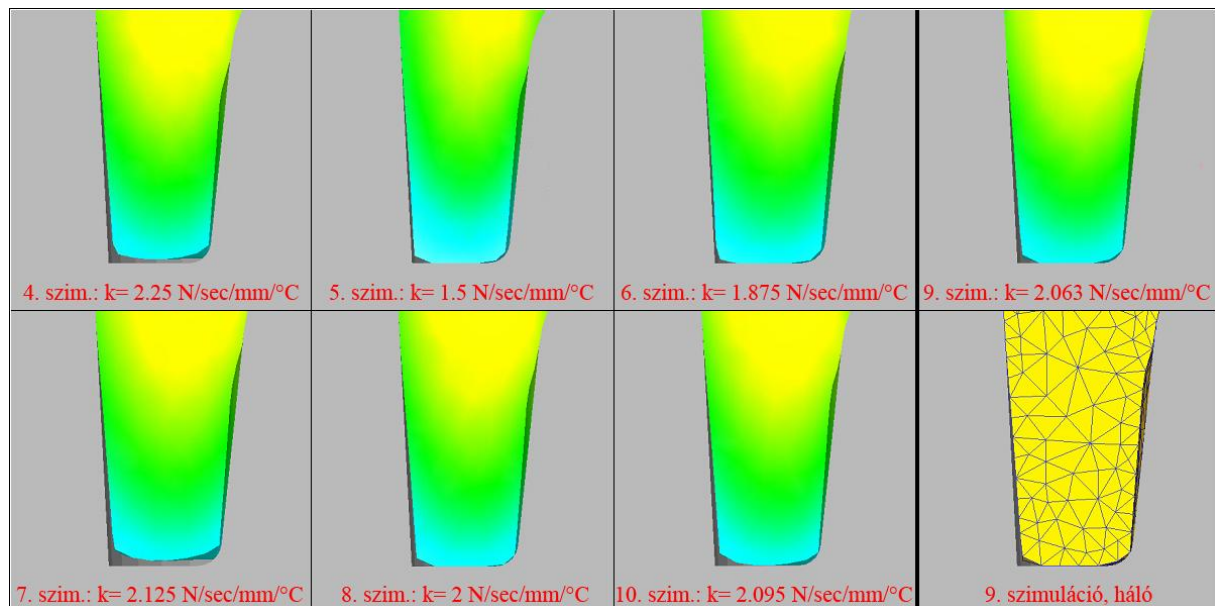
14. ábra: Az üregkitöltés $k = 0.5 \text{ N/sec/mm/}^\circ\text{C}$ esetén, a hőmérsékleti zónák feltüntetésével

A három futtatás eredményéből arra a következtetésre jutottam, hogy jó volt az első feltételezés, és valóban ezt a paramétert kell megfelelően beállítanom. Míg az ajánlott 5 N/sec/mm/°C-os hőátadási tényező túl magas értéknek bizonyult – tehát nem tölti ki megfelelően az üreget –, addig a 0.5 N/sec/mm/°C-os érték már túl alacsonynak – ami sokkal jobb üregkitöltést eredményez, mint ami a valóságban jelentkezik. A megfelelő érték keresését többnyire intervallumfelezéssel fogom végezni:

- a **negyedik futtatást** 2.25 N/sec/mm/°C-kal végeztem el – az eredmény alapján ez az érték sem megfelelő, mivel az anyag nem éri el az üreg alját;
- a sorban az **ötödik futtatást** egy a 0.5 – 2.25 N/sec/mm/°C intervallum közötti értékkel végzem el, szám szerint 1.5 N/sec/mm/°C-os tényezővel – ez esetben már leér az anyag az üreg aljáig, azonban a kérdéses helyen még túl kicsi a rádiusz;
- a **hatodik szimulációt** 1.875 N/sec/mm/°C -kal hajtottam végre, aminek az eredménye hasonló az előző futtatáshoz, így a következő számítás alkalmával nagyobb mértékben növelem meg a hőátadási tényezőt;

- így a **hetedik futtatást** $2.125 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ -kal indítottam el – ennek eredménye, hogy az anyag megint csak nem éri el az üreg alját, tehát ennél kisebb értékre van szükségem;
- a **nyolcadik szimuláció** esetében megfelezem a hatodik és hetedik érték közötti intervallumot, így $2 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ -ot állítok be – az eredményen azt látom, hogy az anyag eléri az üreg alját, és a rádiusz is nagyobb lett. A következő futtatások során azt szeretném kideríteni, melyik az az utolsó érték, ami még eléri az üreg alját, és így a legnagyobb lekerekítést eredményezi
- ennek megfelelően a **kilencedik szimulációt** ismét intervallumfelezéssel, $2.063 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ -os hőátadási tényezővel indítom el: az anyag még mindig hozzáér az üreg aljához;
- a **tizedik futtatást** a felezésnek megfelelően $2.095 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ -os tényezővel indítottam el, amikor is az anyag már nem érte el az üreg alját.

A szimuláció-sorozatból tehát azt az eredményt kaptam, hogy a hőátadási tényező $2.063 \text{ N/sec/mm/}^{\circ}\text{C}$ -os érték mellett adja vissza leginkább a valós megmunkálás körülményeit. A 15. ábra a sorozat eredményeit mutatja be a kritikus terület vonatkozásában.



15. ábra: Az üregkitöltés alakulása az egyes hőátadási tényezők esetében

Látható, hogy a kritikus pontban nem szép íves az anyag kontúrja, hanem egy ponton megtörik – ez a háló miatt van. Nagyobb elemszám esetén az ívek szintén tartalmaznának ilyen töréseket, mivel egyenesekből áll a háló, azonban ez finomítható, viszont a nagyobb elemszám nagyobb gépkapacitást és gépidőt igényel. Látható továbbá, hogy a valóságban

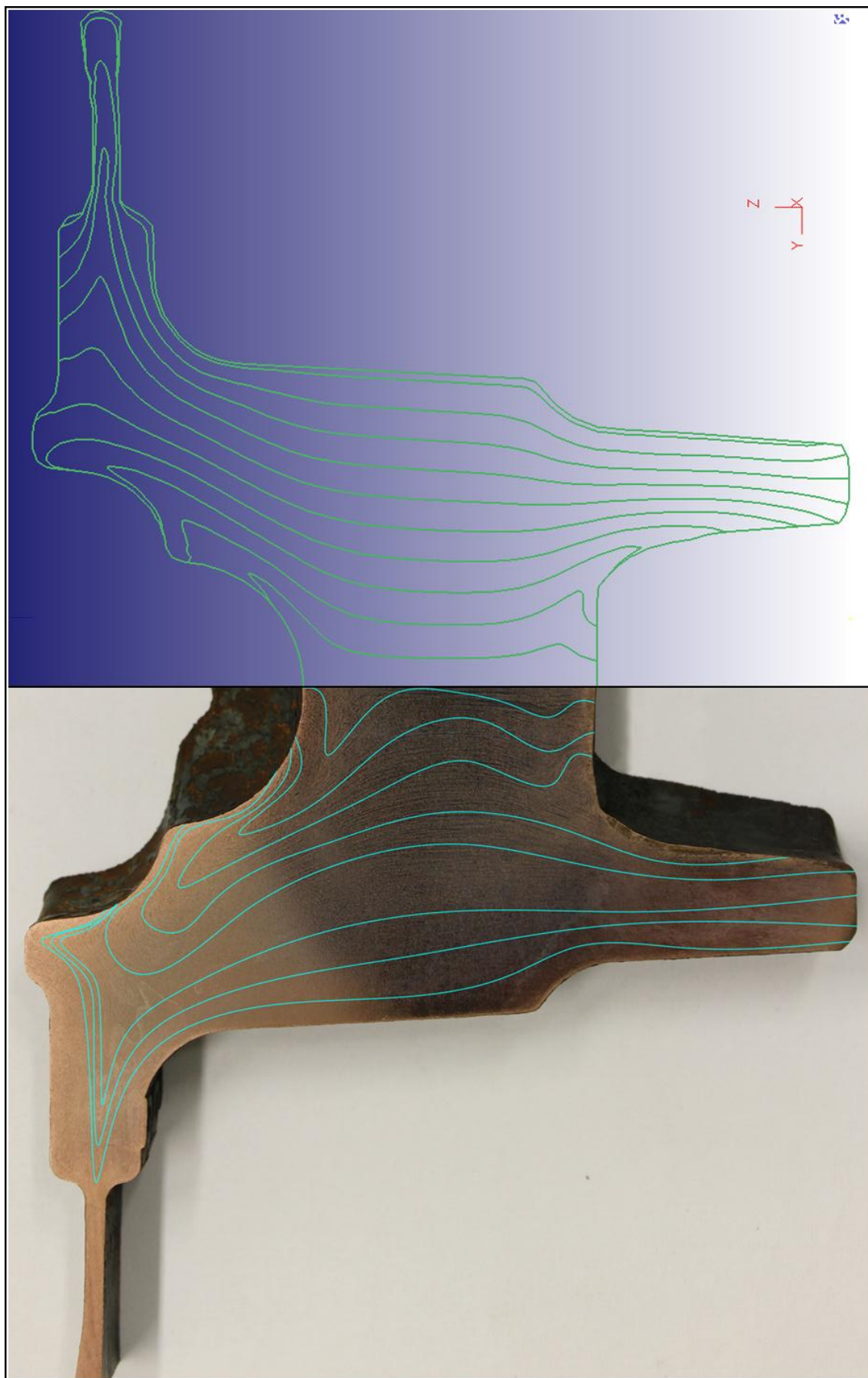
(lásd az 1. ábrát) a kitöltetlenségből adódó rádiusz sokkal nagyobb, mint a szimulációban – ennek az az oka, hogy én a szimuláció során konstans hőmérsékleti értékeket feltételezek a szerszámok esetében ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $150\text{ }^{\circ}\text{C}$), ami viszont a valóságban nem megvalósítható. Mivel az objektumok hőmérséklete alapvetően kihatással van az anyag folyási tulajdonságaira, a szerszám hőmérsékletmezőit pedig nem tudom egyértelműen meghatározni a valós megmunkálás során – valamint annak szimulálása is igen nagyszabású feladat lenne –, a szimuláció eredményét elfogadom. A szerszámok hőmérséklete mellett a munkadarab hőmérséklete is csökken – többek között a szerszám és a darab közti hőmérséklet-különbség miatt – azonban az alakításból származó hő visszamelegíti azt.

Az utolsó lépés – amennyiben a szálfutás megegyezik a valós darabon kimutatott irányokkal – a modell validálása lesz.

5.3. Az eredmények validálása

Miután megalkottam a H116-os kovácsdarab technológiájának virtuális szimulációját, az utolsó lépésem a szálirányelrendeződés kimutatása, amit a *Post Processor Flow Net* parancsával tudok megvalósítani. Miután kijelöltem, hogy az első lépéstől az utolsóig mutassa az erővonalakat, ki kell választanom a rács típusát – egyszerű vertikális vonalakból álló rács típust választok. A következő lépésben megadom, hogy az $Y - Z$ síkban szeretném kimutatni a szálirányokat. Mivel a buga rádiusza $R30$, ezért annak érdekében, hogy 10 rácselemet kapjak, 3 mm -es rácsközt adok meg. A számítási idő letelte után a *DeForm* lehetővé teszi, hogy az egész kovácsolási folyamaton át követhessem a szálirány alakulását az anyagban. Abban az esetben, ha az egyes műveletek között elmozdítottam volna a munkadarabot, akkor a szálirány meghatározása eredménytelen lenne, ugyanis az önkéntes mozgatót a szoftver nem képes lekövetni.

Annak érdekében, hogy megfelelően összevethessem a valós darab és a szimulált darab szálirányelrendeződését, *AutoCAD*-ben ún. „szplájn görbék” segítségével igyekeztem a lehető legjobban lekövetni a szabad szemmel látható erővonalak irányát. A 16. ábrán egymás mellé helyezve mutatom be a valós darab és a szimulált munkadarab szálirányelrendeződését.



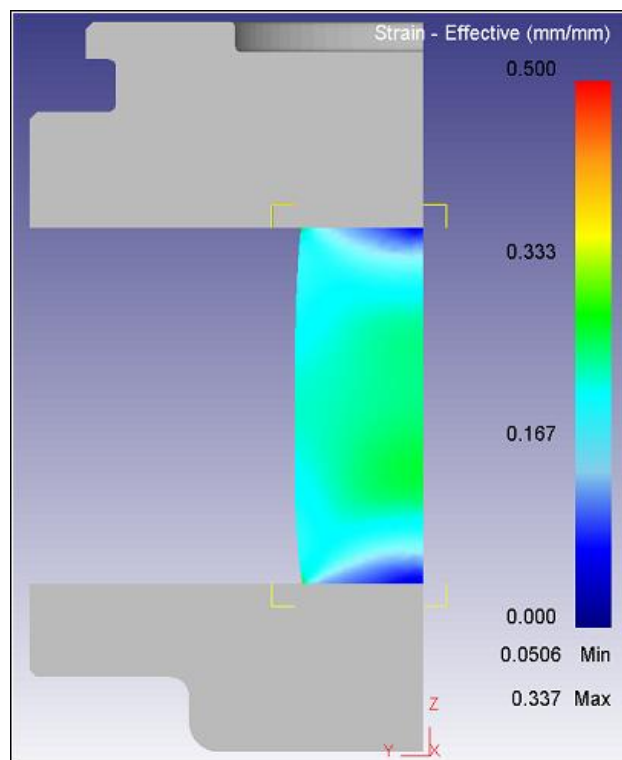
16. ábra: A szálirányelrendeződés összehasonlítása a valós (bal oldali ábra) és a virtuális (jobb oldali ábra) munkadarabon

(A mintadarabról készített további, nagyfelbontású képek megtalálhatók a mellékletben.)

Az utolsó feladatomban az eredmények kiértékelése. Jobban megvizsgálva a látható szálirányokat, valamint összehasonlítva azt a valós darabon és a szimulált modellen, arra a következtetésre jutottam, hogy a szálirányok közel azonos lefutásúak, az ívekben fellelhetők az azonos irányultságok. Jól látható az ábrán, hogy a munkadarabnak a szerszámokkal érintkező részei csak kis mértékben szenvedtek alakváltozást. Ezeket a részeket ún. nyomókúpoknak nevezzük.

Megállapítom, hogy a végeleemes modellem validálása sikerrel zárult. Ez a szimuláció innentől kezdve reális kiindulási alapként szolgálhat a H116-os termék üregkitöltési problémájának megoldásához.

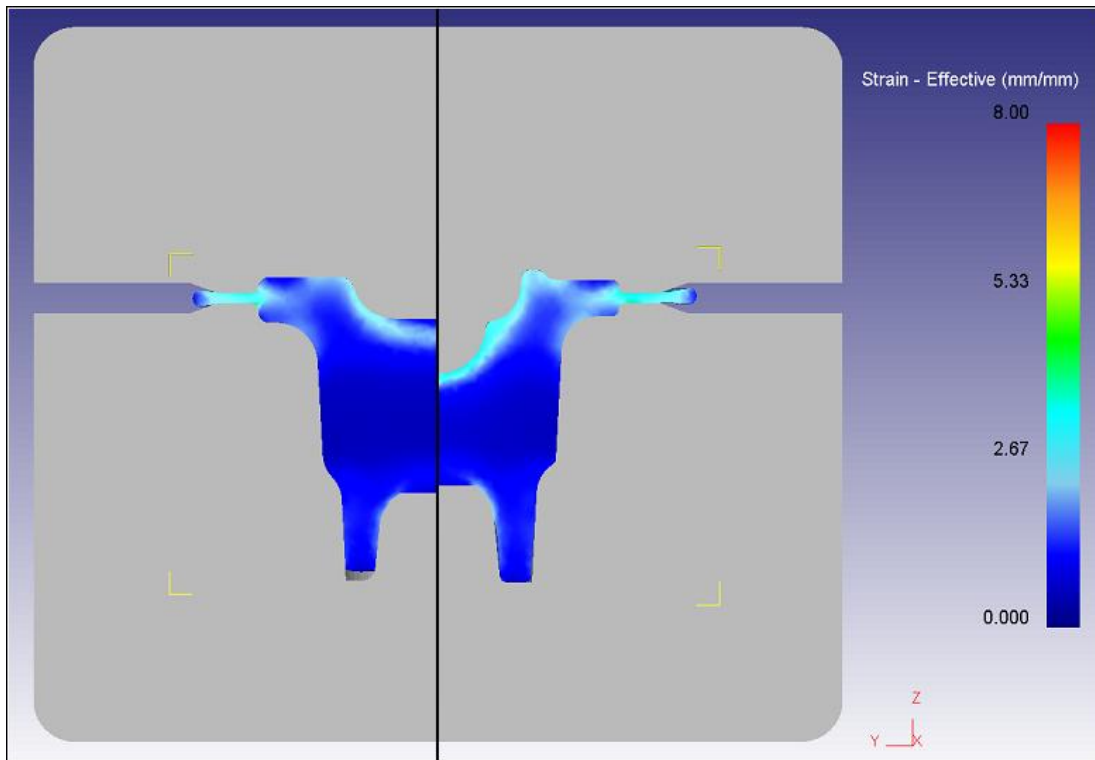
Végül, felhasználva a végeleemes modellt, szemléltetem az egyenértékű alakváltozási feszültséget (*Strain - Effective*) mindhárom műveletnél a szerszámok összezárásának pillanatában. A 17. ábra a zömítés esetén jelentkező alakváltozási feszültséget mutatja be.



17. ábra: Az egyenértékű alakváltozás a zömítés utolsó lépésekor

A zömítés során az alakváltozás a munkadarab közepén a legnagyobb, a szerszámlapokkal érintkező részén pedig a legkisebb. Ennek oka a munkadarab és a szerszám között fellépő súrlódás, amely meggátolja az anyag mozgását – itt alakulnak ki a

nyomókúpok. Ez okozza a zömített munkadarabra jellemző hordósodást. A 18. ábra az előalakítás (bal oldali ábra) és a készrealakítás (jobb oldali ábra) esetén szemlélteti az egyenértékű alakváltozást.



18. ábra: Az egyenértékű alakváltozás az előalak és a készalak esetében

Látható, hogy a legnagyobb alakváltozási feszültség a sorjacsatornák kialakítása során jelentkezik, illetve látható az is, hogy a nyomókúpok a szerszámmal érintkező felületeken alakulnak ki.^{[3] [4] [7]}

Összefoglalás

A Tudományos Diákköri Dolgozatomban arra vállalkoztam, hogy segítséget nyújtok egy létező ipari probléma megoldásában. Ennek érdekében tanulmányaim során igyekeztem elmélyíteni tudásomat a körszimmetrikus alkatrészek süllyesztékes kovácsolási technológiájában. CAD/CAM szakirányos, mesterszakos gépészmérnök hallgatóként azt a feladatot vállaltam, hogy egy végelelemes melegalakítási célszoftver segítségével elkészítem a problémás kovácsolt termék virtuális legyártásának szimulációját.

Ennek érdekében először megismerkedtem a süllyesztékes kovácsszerszámok tervezésének folyamatával, majd részleteiben is tanulmányoztam a H116-os kovácsdarabot előállító szerszámok terveit. A szerszámtervezés ismerete mellett elengedhetetlen követelmény, hogy a kovácsolási technológiával is megismerkedjek, így a gyártás helyszínén adatokat gyűjtöttem a későbbi szimuláció megalkotásához.

A modellalkotás mellett a valós kovácsdarabon is dolgoznom kellett, hisz a validálás egyik alapja a szálirányelrendeződés láthatóvá tétele. Ennek érdekében darabolást, finomköszörülést és mélymaratást végeztem el a mintadarabon, melynek eredményeképp szabad szemmel is láthatóvá váltak az erővonalak.

Miután sikerült megalkotnom egy működő, lefutó szimulációt, a megfelelő paraméter módosításával iteráció útján addig finomítottam a modellt, míg a valós kovácsdarabbal közel meg nem egyező eredményt kaptam. Ezt követte a virtuális szálfutás kimutatása.

A valós és a virtuális szálirányelrendeződés megfelelő összehasonlításához tanulmányoznom kellett a képlékenyalakítás vonatkozó ismeretanyagát, így végül kijelenthetem, hogy a validálás sikerrel zárult. Az általam megalkotott modell így reális kiindulási alapként szolgálhat a kitöltetlenségi probléma megoldásához, amivel a Diplomamunkám keretein belül szeretnék bővebben foglalkozni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Témavezetőmnek, Lukács Zsoltnak, hogy megteremtette a lehetőségét a dolgozat megírásának, illetve, hogy a dolgozat megírása közben – annak ellenére, hogy saját doktori munkáján is dolgozott – a segítségemre volt.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani az egri Firth Rixson Hungária Kft. mérnökeinek is, hogy minden szükséges információval elláttak, és a rendelkezésemre bocsátottak egy mintadarabot.

Köszönettel tartozom továbbá a Dr. Gál Gasztonnak, és a Mechanikai Technológiai Tanszék műhelyében dolgozóknak, hogy segítettek a mintadarab előkészítésében, illetve Csurilláné Balogh Ágnesnek, aki a labormunkák elvégzésében volt a segítségemre. Emellett köszönöm a Tanszéknek, és Kerekes Gábornak, hogy rendelkezésemre bocsátották a tanszéki számítógépeket a számítások idejére.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Szabó László: *Süllyesztékes kovácsolás*
Internetes jegyzet, Miskolci Egyetem, Miskolc, 1997
<http://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/kovacs.htm> (2014. február 16.)
- [2] Dévényi György, Dr. Mecseki István: *Képlékenyalakítás I., Kovácsolás*
Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
- [3] Dr. Tisza Miklós, Kovács Péter Zoltán, Lukács Zsolt: *Számítógépes technológiatervező rendszerek folyamatmodellezése*
Oktatási segédlet, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2010
- [4] Lukács Zsolt: *Integrált tervező rendszerek II.*
Előadásvázlat, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2013
- [5] Szabó Ödön: *A vas- és acélipar gyakorlati metallográfiája*
Műszaki Könyvkiadó, 2. átdolgozott és bővített kiadás, Budapest, 1968
- [6] Dr. Kiss Ervin, Dr. Voith Márton: *Kohógéptan*
Tankönyvkiadó, Budapest, 1974, ISBN: 963-17-07385
- [7] Dr. Voith Márton: *A képlékenyalakítás elmélete*
Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 1998, ISBN: 963-661-315-x







