

**NYÍREGYHÁZI FŐISKOLA
MŰSZAKI ÉS MEZŐGAZDASÁGI KAR
NYÍREGYHÁZA**

FORGÁCSKÉPZŐDÉS FIZIKAI MODELLEZÉSE

Tudományos diákköri dolgozat

Készítette: Herman János

Szak: Gépészmérnöki

Évfolyam: III.

Konzulens: Dr. Dezső Gergely

Beosztása: Főiskolai tanár

2013.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS.....	3
2. A FORGÁCSOLÁS.....	4
2.1. Alapfogalmak	4
2.2. Gyalulás	5
2.3. Forgácsképződés	6
2.4. A munkadarab anyaga.....	8
2.5. A forgácsolt felület.....	9
3. SÚRLÓDÁS.....	11
3.1. A Coulomb-törvény	11
3.2. A Coulomb-törvény arcus tangens helyettesítése	12
3.3. A Coulomb-törvény tapadás-csúszás modellje	13
3.4. A Coulomb-törvény bilineáris közelítése	14
3.5. A Coulomb-törvény korlátai.....	14
3.6. Nyírási modell	14
3.7. A súrlódási együttható, mint függvény.....	15
4. TERMIKUS FOLYAMATOK.....	16
4.1. A forgácsolás energiamérlege	16
4.2. A súrlódáskor fejlődő hő.....	18
4.3. Hőleadás.....	18
4.4. Hőterjedés	19
5. A KOPÁS.....	21
5.1. A kopás fajtái.....	21
5.2. A kopás modellezése.....	22
6. HALMAZÁLLAPOT ÉS KÉMIAI VÁLTOZÁSOK.....	24
6.1. A munkadarab megolvadása.....	24
6.2. A levegő szerepe	24
6.3. A hűtő-kenő folyadék.....	24
6.4. Kémiai változások	24
7. A MODELLEZÉS SORÁN HASZNÁLT ALAPELVEK, ELJÁRÁSOK.....	25
7.1. A VEM fő elvi lépései	25
7.2. A végelemek tulajdonságai	27
7.3. Összeállítás	31
7.4. Peremfeltételek.....	31
7.5. A felhasznált szoftver.....	32
8. A DISZKRÉT MODELL.....	33
8.1. A végeelem modell.....	33
8.2. Az érintkezési feladat.....	34
8.3. Az anyagi minőség.....	37
8.4. A végeelem modell globális újragenerálása	39
8.5. A megoldó eljárás beállításai.....	40
9. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE.....	41
9.1. A feszültségállapot.....	41
9.2. A sebességállapot.....	45
9.3. A hőmérséklet eloszlás	47
9.4. A kopás	49

10. ÖSSZEFOGLALÁS	50
11. FELHASZNÁLT IRODALOM	51

1. Bevezetés

A környezetbarát megmunkálások fejlesztése mind gazdasági, mind ökológiai szempontból sürgető kérdés. E törekvések részben új módszerek kutatásában, részben pedig az ismert módszereknek az új követelmények szerinti továbbfejlesztésében nyilvánulnak meg. A forgácsoló eljárások napjainkban is a gyártási megmunkáló folyamatok túlnyomó többségét teszik ki. A forgácsolás során alkalmazott hűtő-kenő anyagok mennyiségének csökkentése igen lényeges környezetvédelmi szempontból, mert így lényegesen kevesebb veszélyes anyag áll elő, amelynek kezelése és megsemmisítése jelentős költséggel jár.

A Nyíregyházi Főiskola Műszaki Alapozó és Gépgyártástechnológiai Tanszékén, a Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszékével együttműködve környezetbarát megmunkálásokkal kapcsolatos vizsgálatok zajlanak. A kísérleti munka és a fizikai modellezés egyaránt részét képezi a kutatásnak. Hazánkban több kutatóhelyen folynak hasonló témájú vizsgálatok. [8],[9]

A kísérletek során minimálkenés mellett a fúrás erő és forgatónyomaték szükségletének vizsgálata történt meg. A kísérletekből nyert adatok beépültek a fúrási folyamatra vonatkozó modellszámításokba is.

A szimuláció területén a dinamikai (tranziens) számítások irányába szeretnénk továbblépni. Célunk olyan elméleti modell kidolgozása, amely a kísérleti tapasztalatokkal jól egyező eredményeket szolgáltat a forgácsolás szempontjából fontos és mérhető mennyiségekre, melyek a mechanikai mennyiségek, a hőmérséklet és a kopás.

Ebben a dolgozatban a forgácsoló ék működését vizsgálom szerkezeti acél gyalulása során. Az a célom, hogy előtanulmányt végezzek más forgácsolási technológiák szimulációjának előkészítéséhez. Modellezem a mechanikai, a hőtani folyamatokat és vizsgálom a kopási indexet. A szimuláció során nem csak a munkadarab és a szerszám érintkezési feladatát oldom meg, hanem a környezet hatásait is érintkező testek segítségével veszem figyelembe.

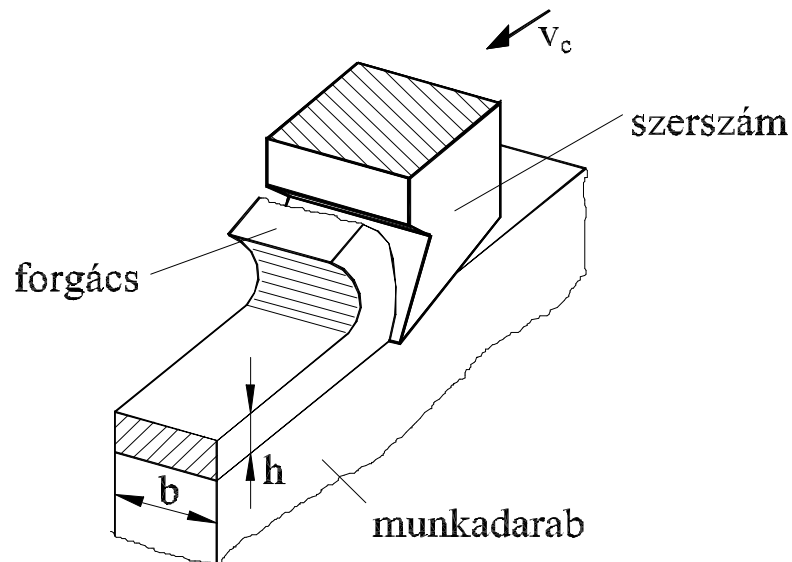
Eredményeimet összehasonlítom az ismert tapasztalatokkal és kísérleti eredményekkel.

2. A forgácsolás

Ez a fejezet áttekinti a forgácsolás alapfogalmait, legfontosabb összefüggéseit az [1] és [2] tankönyvek alapján.

2.1. Alapfogalmak

A forgácsolás az anyagok megmunkálásának egyik módja. Az alkatrészek alakjukat anyagrészek leválasztásával érik el. Az anyagleválasztás a munkadarab és a szerszám egymáshoz képesti elmozdulásával jön létre, mely során a szerszám ékhez hasonlóan behatol az anyagba, és arról anyagot választ le.



2.1. ábra A munkadarab alakítása szabad forgácsolás esetén (Forrás: [1] Dudás, 157. oldal)

Forgácsolás esetén a célunk előírt alakú, méretű, felületminőségű alkatrész gazdaságos előállítása.

Ez a folyamat a munkadarab (M), készülék (K), szerszámgép (G), és a szerszám (S), valamint az irányítás (I) alkotta mechanikai rendszerben valósul meg.

Ezt a rendszert MKGSI rendszernek is nevezik. Ettől alacsonyabb és magasabb szintű rendszerek is definiálhatóak.

A munkadarab, melyről egy vagy több rétegben anyagot választunk le. Jele: M.

A készülék a munkadarab vagy szerszám befogására, vezetésére szolgál. Jele: K.

A szerszámgép valósítja meg a munkadarab – szerszám viszonylagos mozgását.

Jele: G.

A szerszám végzi az anyagleválasztást. Jele: S.

Irányítás, lehet kézi vagy automatikus. Jele: I.

A forgácsolási folyamatot jellemző alapmennyiségek:

v_c - forgácsoló sebesség – a forgácsolóél kiválasztott pontjának a munkadarabhoz viszonyított sebessége;

f - egy a gépen beállított hosszúság; az előtolás;

v_f - előtolási sebesség

$$v_f = n_c f \quad (2.1.)$$

a -fogásméret, - szélesség vagy mélység;

n_c , c -forgácsolási fordulatszám, illetve szögsebesség;

h ; b -forgácsvastagság és metszőszélesség, vagy elméleti forgácméretek,

A -elméleti forgácskeresztmetszet, származtatott mennyiség:

$$A = hb \quad (2.2.)$$

q_c -anyagleválasztási sebesség $q_c = a f v_c$

G -anizometrikus forgácsalak tényező:

$$G = \frac{b}{h} \quad (2.3.)$$

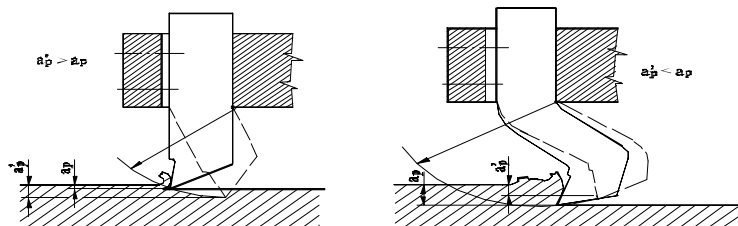
2.2. Gyalulás

A gyalulás ismétlődő, többnyire egyenes vonalú forgácsoló mozgással és a forgácsolás irányára merőleges, szakaszos előtoló mozgással végzett forgácsolás.

A megmunkálás során általában állandó keresztmetszetű forgács szakaszos leválasztása valósul meg egyéltű szerszámmal. Forgácsleválasztás csak munkalöketben van, az irányváltás utáni hátramenet üreslököt.

A gyalulás szerszámai egyéltű forgácsoló kések. A gyalukések a munkalöket kezdetén erős ütésszerű igénybevételt szenvednek. Ezért a dolgozó rész csak szívós anyagból készülhet. A szerszámok befogása rövid kinyúlásúnak kell lennie, mert hosszú kinyúlás esetén a szerszám rugalmasan hátrahajlik és megnő a

fogásmélység (a_p), ami „nyugtalan járáshoz” és rezgések kialakulásához vezet. Ezt a jelenséget könyökös gyalukés alkalmazásával lehetséges kiküszöbölni.



2.2. ábra Forgácsleválasztás gyalulás esetén (Forrás: [1] Dudás, 299. oldal)

Ebben a dolgozatban gyalulás modellezésével foglalkozunk.

2.3. Forgácsképződés

A forgácsolás következménye a forgács is, amelynek keresztmetszete és alakja befolyással van a forgácsolás folyamatára.

A forgácsolás jelenségeit nagyrészt kísérleti úton vizsgálják. A kísérleti modell célszerűen a „szabad forgácsolás”, amikor is csak a főél forgácsol, azaz sem a szerszám csúcsa, sem a mellékél nem vesz részt az anyag leválasztásában. A vizsgálat módszerének olyannak kell lennie, mely lehetővé teszi a forgácstő megfigyelését munka közben, vagyis, ahol a forgács, és a forgácsolt felület még összefügg egymással. A megfigyelés célja, hogy megállapítsuk miként valósul meg a forgácsképződés a forgácsolóék anyagba való behatolásakor.

Megállapítható, hogy **szívós anyagoknál** az anyagleválás a képlékeny alakváltozások területére esik, amikor az anyag egy közelítőleg sík, a nyírási sík mentén, lemezkék formájában elmozdul a munkadarabról. A forgács tehát nem homogén fémszalag, hanem vékony lemezkékből álló képződmény.

Rideg anyag forgácsolásakor forgácslemezek nincsenek, a nyírási sík messzemenően nem sík, az anyag darabokban válik le, és a nyírási szög helyzete is csak feltételezhető.

A forgácsolóék által leválasztott forgács képződésének módja szerint három fajta forgács kialakulásáról kell szólni. Megkülönböztetjük ugyanis a

folyóforgács-,

a nyírt forgács- és

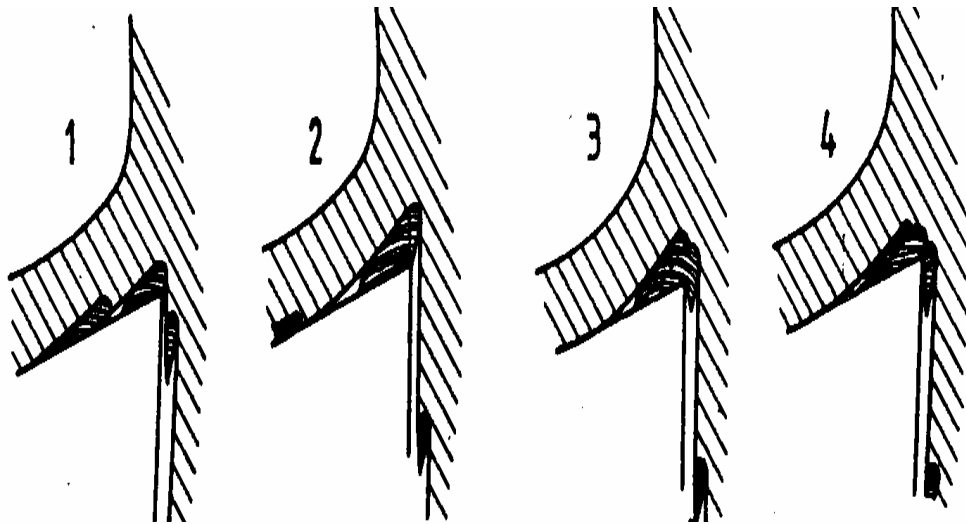
a töredezett forgács képződését.

A **folyóforgács** képződése szívós anyagoknál folytonos forgács kialakulását jelenti. A forgácslemezek szabad szemmel nem láthatók. A forgács azonos sebességgel, folytonos szalagként fut le a szerszám homlokfelületén és a forgácslemezek a nyírási síkban nem, vagy alig mozdulnak el. A nagy forgácsolósebesség miatt kialakuló magas hőmérsékleten a forgács vörösen izzik. $T = 600-900\text{ }^{\circ}\text{C}$. A folyóforgács keletkezésének kedvez a nagy forgácsolósebesség ($v_c > 80\text{ m/p}$), a pozitív homlokszög ($=15-20^{\circ}$), a kicsi forgácsvastagság, az anyagok homogén finomszemcsés szövetszerkezete.

A **nyírt forgács** is szívós anyagok forgácsolásakor keletkezik. A nyírási síkban egymáshoz képest elmozduló forgácslemezek szabad szemmel is jól láthatók. Szét azonban nem esnek, mert hideghegedéssel összekapcsolódnak. A nyírt forgács keletkezését elősegíti a csökkenő homlokszög ($\gamma > 0^{\circ}$), a nagyobb forgácsvastagság, valamint a közepes forgácsolósebesség ($v_c = 20-80\text{ m/p}$).

Shívós anyagok közepes sebességtartományban végzett forgácsolásakor várható az **élrátét** kialakulása. Keletkezésének feltétele a munkadarab anyagának felkeményedési képessége. Az acélok $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli elridegedése, felkeményedése okozza a forgácsoló él előtti anyagfolyamban. Ennek következménye, hogy a szerszám homlokfelületén és a lekerekedett él előtt anyagrészecskék jelentősen deformálódnak, felkeményednek és a szerszámra feltapadnak. Ez igen káros, mert megváltozik a szerszám élgeometriája, az éltartama csökken, a felületi érdesség nő, a forgácsolóerő lüktet, és fellép a rezgésveszély.

Megszüntetése a forgácsolósebesség növelésével lehetséges.



2.3. ábra Élratét képződés (Forrás: [1] Dudás, 186. oldal)

Tört forgács keletkezik rideg, vagy jelentősen inhomogén anyag forgácsolásakor (lemezgrafitos öntöttvas, öntött bronz, sárgaréz). Ebben az esetben nem a forgácsolóék által okozott képlékeny alakváltozás, hanem az anyagrészecskék kitöredezése, kiszakadása révén jön létre a forgács. A forgácsoláskor fellépő erő periodikusan változik, ezért jobban igénybe veszi a szerszámot, és a szerszámgépet.

2.4. A munkadarab anyaga

A munkadarab anyag keménységének és szilárdságának növelésével csökken a felületi érdesség. Ennek magyarázatát abban lehet keresni, hogy a szilárdság növelésével csökken az anyag képlékenysége, és vele együtt a képlékeny alakváltozás munkája is. A gyakorlatban sok esetben mesterségesen növelik az anyag keménységét, hogy forgácsolásnál a felületi minőség jobb legyen.

2.5. A forgácsolt felület

A forgácsolt felület rétegére jellemző fizikai-mechanikai tulajdonságok erősen befolyásolják az alkatrész felhasználási tulajdonságait (élettartam, kopásállóság). A felületi réteg állapotát jellemző legfontosabb mutatók a maradó feszültségek nagysága és előjele, valamint azok behatolási mélysége, továbbá a felületi felkeményedés mértéke és a felkeményedett réteg vastagsága. A maradó feszültséget és a felkeményedést a forgácsolóerő, a forgácsolási hő és a szerkezeti átalakulások okozzák. Határozott élű szerszámmal végzett forgácsolásnál a forgácsoló erőnek a forgácsolás zónájában kialakuló feszültségi állapotban döntő szerepe van.

Rideg anyagok forgácsolásánál a felülethez közeli rétegben nyomófeszültségek maradnak vissza, képlékeny anyagoknál pedig leggyakrabban húzófeszültségek. Egy igen vékony rétegben (0,002 mm) nyomófeszültség marad vissza, majd egy igen vastag réteg következik, melyben húzófeszültségek hatnak. Tekintettel arra, hogy a húzófeszültség zónája nagyságrendekkel nagyobb a nyomófeszültségénél, e réteg alapján jellemzik a felületi réteg feszültségi állapotát. A mélyebb rétegben uralkodó feszültség egyensúlyt tart a felette elhelyezkedő réteg feszültségével, tehát előjelét is az határozza meg. A maradó feszültségek képződésének mechanizmusát a következőképpen lehet elképzelni: A szerszám hátfelületén ható súrlódó erő hatására a megmunkált felület vékony rétege képlékeny húzó igénybevételt szenved és az alatta levő rétegben ennek megfelelően rugalmas húzó alakváltozás megy végbe. A szerszám áthaladása után az alsó réteg össze akar húzódní, de ezt gátolja a felső réteg, aminek eredményeképpen az alsó rétegben maradó húzófeszültség lesz.

A maradó feszültségek nagysága és hatásuk zónája függ a szerszám homlokszögétől, az előtolástól, a forgácsoló sebességtől, és a szerszámkopástól.

Az anyag **felkeményedési** fokán (H) a felületi rétegben mért legnagyobb keménység ($H_{\max}$) és a munkadarab (H_d) alapkeménysége különbségének az utóbbihoz viszonyított arányát értik.

$$\Delta H = \frac{H_{\max} - H_d}{H_d} \quad (2.4.)$$

A felületi réteg felkeményedése lényegében a ferritbázis deformációjával és szilárdulásával kapcsolatos. A felkeményedés foka és a felkeményedett réteg vastagsága szoros kapcsolatban van a forgács alakváltozásával és a ható erővel. Éppen ezért, a felkeményedés csökken a homlokszög növelésével és a forgácsvastagság csökkentésével. A forgácsszélességnek a felkeményedésre kifejtett hatása elenyésző. A forgácsolási sebességnek a felkeményedésre kifejtett hatása megegyezik annak az alakváltozási tényezőre kifejtett hatásával. A szerszámkopás növeli a felkeményedést és a felkeményedett réteg vastagságát.

3. Súrlódás

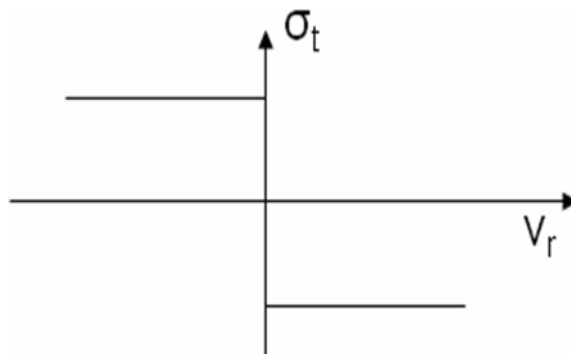
A súrlódás két, egymással érintkező, egymáshoz viszonyítva elmozduló test között jön létre. Itt a munkadarab és a szerszám között fellépő súrlódással foglalkozunk. A súrlódás következtében az érintkező felületek között nyíró irányú erőhatás lép fel, amely a felületek relatív mozgását akadályozza, és függvénykapcsolatba hozható a normál irányú erővel. Lokális megközelítésben azt mondjuk, hogy a nyomófeszültség fellépte miatt nyírófeszültség ébred a két felület között. Nagy általánosságban igaz, hogy a nyomó és nyíró erőhatás azonos irányba változik, azaz nagyobb nyomóerő esetén nagyobb nyíró irányú (súrlódási) erő lép fel. A súrlódás jelensége jelenleg is kutatás tárgyát képezi. A súrlódási erő nem csak a nyomóerőtől függ, hanem például a felületek relatív sebességétől, a hőmérséklettől és a felületi érdességtől is. A 3-5. fejezetek anyaga az [1], [2] tankönyvek és [7] elméleti összefoglaló alapján készült.

3.1. A Coulomb-törvény

A súrlódás leírására leginkább elterjedt modell a Coulomb-törvény:

$$|\sigma_t| < \mu_t \sigma_n \text{ tapadás esetén, } \sigma_t = \mu_{cs} \sigma_n \text{ csúszás esetén,} \quad (3.1.)$$

ahol σ_t a nyíró feszültség, σ_n a nyomófeszültség, μ_t és μ_{cs} rendre a tapadási és a csúszási súrlódási együttható. A csúszási súrlódásból származó nyírófeszültség iránya ellentétes a relatív sebesség irányával. Ezt írja le a 3.1 képlet és szemlélteti a 3.1 ábrán látható lépcsős függvény.



3.1. ábra A Coulomb-törvény grafikonja

Numerikus vizsgálatok esetén a lépcsős függvény igen kedvezőtlen, mert általában konvergencia problémákhoz vezet. Ennek elkerülése céljából a Coulomb-törvény „lépcsőjét”, azaz a nulla sebességnél bekövetkező szakadását valamilyen folytonos függvénnyel szokták helyettesíteni.

3.2. A Coulomb-törvény arcus tangens helyettesítése

A Coulomb-törvényben szereplő lépcsős függvényt arkusz tangens függvénnyel is közelíthetjük:

$$\sigma_t = -\mu\sigma_n \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{|v_r|}{c}\right), \quad (3.2.)$$

ahol

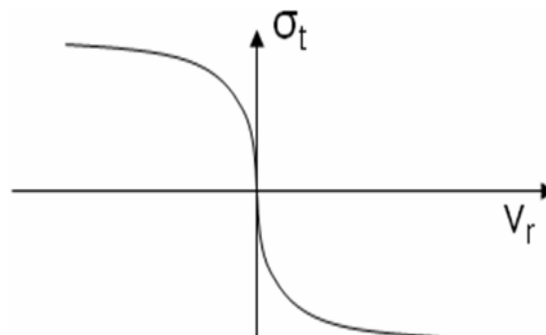
σ_t az érintő irányú (súrlódásból származó) nyírófeszültség,

σ_n a normál irányú nyomófeszültség,

μ a súrlódási együttható,

v_r a két test relatív sebessége az érintkezési pontban,

c sebesség dimenziójú konstans, amely a függvény nulla körüli szakaszának meredekségét befolyásolja.



3.2. ábra A Coulomb-törvény arcus tangens közelítése

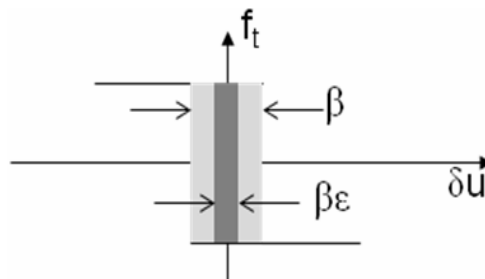
Ez a függvény a nullánál is deriválható, valamint nincs benne nagy ugrás, ami gondot okozhatna egy iteratív eljárás optimális lépéshosszának keresésekor. Minél

kisebb a c konstans értéke, annál inkább hasonlít a függvény az eredeti lépcsős alakhoz.

Az arcus tangens modell érdekessége, hogy nem tartalmazza a tapadást, vagyis a két felület érintkezési pontjai mindig mozognak feltételezi. Ez kapcsolatba hozható azzal a feltételezéssel, hogy kis relatív sebességek esetén a két felület kölcsönhatása különleges, a lineáris törvénnyel le nem írható, mikroszkopikus folyamatokkal magyarázható, amit makroszkopikus szinten tapadásként érzékelünk, de ez valójában kis sebességű, nemlineáris folyamat.

3.3. A Coulomb-törvény tapadás-csúszás modellje

A tapadás-csúszás (stick-slip) modellben a felületek pontjaihoz „tapadó” vagy „csúszó” állapotot rendelünk hozzá, és mindkét esetben speciális peremfeltételeket alkalmazunk a mozgásuk leírására. A kétféle állapot között az adott pontbeli elmozdulás nagysága dönt. Ebben a modellben nem a sebesség szerepel, hanem egy kis időlépésen belüli elmozdulás, és nem feszültség, hanem csomóponti erő.



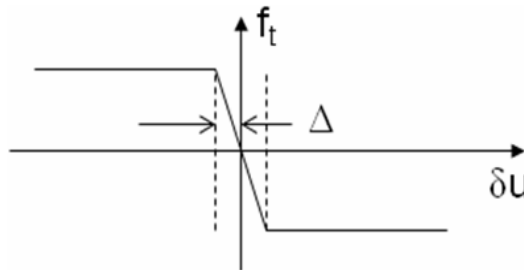
3.3. ábra A tapadás-csúszás modell

A β és az ϵ számok egyaránt kicsik, 10^{-6} nagyságrendűek, ebből következik, hogy a $\beta\epsilon$ szorzat igen kicsiny. Ha a csomópont elmozdulása a $\beta\epsilon$ intervallumba esik, akkor a „tapadó” állapotot rendeli hozzá modell, ha nem, akkor „csúszó”. Ha a csúszás során az erő és az elmozdulás iránya megegyezik, de a β tartományba esik az elmozdulás, akkor az iterációs lépést nem indul újra, ellenkező esetben igen.

A modell célja az iterációs eljárás újraindításának elkerülése a nagyon kis mértékben rossz irányba elmozduló érintkezési pontok miatt.

3.4. A Coulomb-törvény bilineáris közelítése

A bilineáris modell a csúszást a plasztikus (maradandó) elmozdulással, a tapadást a rugalmas (visszafordítható, nem maradandó) elmozdulással hozza összefüggésbe. Az elmozdulást rugalmas és rugalmatlan összetevőkre bontja fel.



3.4. ábra A Coulomb-törvény bilineáris helyettesítése

A Δ határon belül a pontot tapadónak feltételezi a modell.

3.5. A Coulomb-törvény korlátai

Nagy nyomóerők esetén a Coulomb-törvény linearitásából adódóan a súrlódási erő oly nagynak adódna, mely nem egyezik a kísérleti tapasztalatokkal, vagy például meghaladja az anyag folyáshatárát, ami lehetetlen. E probléma megoldására három út kínálkozik:

- nemlineáris súrlódási együttható használata,
- súrlódási erő (feszültség) korlát bevezetése,
- nyíróerőn alapuló súrlódás modellek használata.

3.6. Nyírási modell

A nyírási modell a súrlódásból eredő nyírófeszültséget a kérdéses pontbeli σ_e egyenértékű feszültségből származtatja:

$$|\sigma_t| < m \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \text{ tapadás esetén, } \sigma_t = m \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \text{ csúszás esetén,} \quad (3.3.)$$

ahol μ a súrlódási együttható.

3.7. A súrlódási együttható, mint függvény

A súrlódási együttható a legáltalánosabb esetben megadható úgy, mint más mennyiségek függvénye.

$$\mu = \mu(x, f_n, T, v_r, \sigma_e) , \quad (3.4.)$$

ahol

x az a hely, ahol a súrlódási erőt (feszültséget) számítjuk,

f_n a két felületet összenyomó (normál)erő,

T a hőmérséklet,

v_r a két felület relatív sebessége,

σ_e az egyenértékű feszültség.

4. Termikus folyamatok

4.1. A forgácsolás energiamérlege

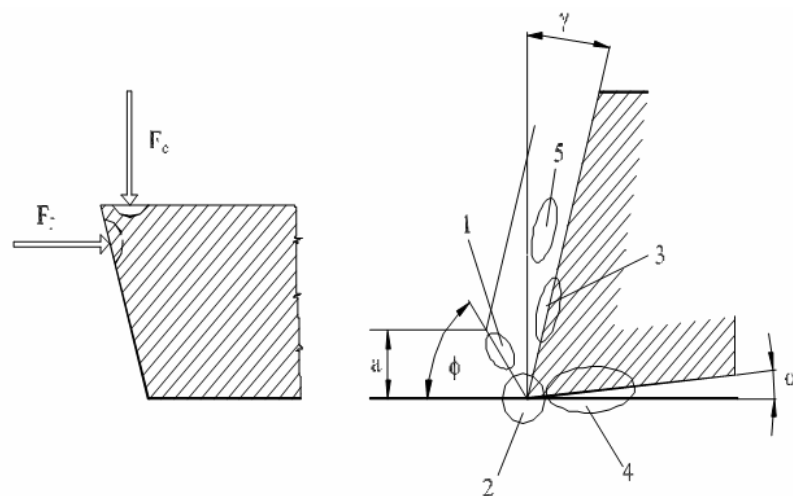
A forgácsolásban részt vevő anyagok felmelegedése igen fontos tényező, mert a hőmérséklet befolyásolja az anyagi tulajdonságokat, és bizonyos jelenségek lezajlását is (pl. hőfeszültség, fázisátalakulások, kémiai reakciók). A melegedés vizsgálatának alapja a forgácsolás energiamérlege. (Dudás I.: Gépgyártástechnológia I. 203-207.o.)

Számba vesszük a hő forrásait, terjedési módjait és nyelőit. A hő forrásai a deformációs munka és a súrlódási munka (amelyek hővé alakulnak). A hő terjedhet anyagon belüli hővezetéssel, anyagok közötti hővezetéssel, amit hőátadásnak is nevezünk, sugárzással és konvekcióval (hőáramlással).

A forgácsolás során keletkező hő a folyamatot jelentősen befolyásoló tényező, és ismeretében magyarázhatók a forgácsolás folyamatának sajátosságai, de a gyártás és gyártmány minőségi jellemzői is. Tapasztalati adatok alapján megállapítható, hogy a forgácsolási energia több mint 90%-a gyakorlatilag hővé alakul át. Ennek megfelelően, a forgácsolásnál képződő hő mennyisége lényegében azonos a forgácsolási energiával.

A forgácsolás hőforrásai:

- belső súrlódás a nyírási síkban, (1)
- anyagszétválasztás a szerszám csúcsánál, (2)
- súrlódás a homlokfelületen, (3)
- súrlódás a hátfelületen, (4)
- további anyagdeformációk, (5)



4.1. ábra A forgácsolás hőforrásai (Forrás: [1] Dudás, 204. oldal)

Így a forgácsolás energiamérlege az egységnyi leforgácsolt anyagtérfogatra vonatkoztatva:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 \quad (4.1.)$$

másrészt:

$$u = u_W + u_S + u_F \quad (4.2.)$$

tehát az öt hőforrásból származó energia lényegében a munkadarabra (W), szerszámba (S), és a forgácsba (F) vándorol.

Figyelemre méltó, hogy a legnagyobb hőmérséklet nem a szerszám csúcsán, élén, hanem kissé hátrább a homlokfelületen jelentkezik.

A magas hőmérséklet nemcsak a különféle kopási folyamatokat segíti elő, hanem veszélyezteti a szerszámanyag hőszilárdságát is. Ezért arra kell törekedni, hogy a forgácsolási hőmérséklet minél alacsonyabb legyen.

A forgácsoláskor keletkezett hőmennyiség megoszlására vonatkozólag a szakirodalom többféle adatot közöl. Lössl szerint a forgácsoláskor keletkezett hőmennyiség 60%-a marad a forgácsban, 38%-ot a munkadarab vesz fel, 2%-ot pedig a szerszám vezet el.

A munkadarab, a szerszám és a forgács közötti hőeloszlás mértéke függ a munkadarab és a szerszám anyagának hőtani tulajdonságaitól és az alkalmazott forgácsolási tényezőktől, elsősorban a forgácsolási sebességtől.

Munkadarab	J/cm ³	Átl. forg. hőfok	Hőeloszlás %-ban		
			forg.- ba	mdb.- ba	szerszámba
Acél ($R_m=630$)	3200	450 °C	~75	~25	~1,5
Öntöttvas (HB=200)	2500	300 °C	~50	~50	~1,5
Alumínium	1600	150 °C	~25	~75	~1,5

4.1. táblázat Hőmérséklet eloszlási arányok különböző anyagoknál (Forrás: [1]

Dudás, 206. oldal)

Az ábra alapján megállapítható, hogy a forgács átlagos hőmérséklete függ a munkadarab fizikai-mechanikai tulajdonságaitól. Acél forgácsolásánál a viszonylag magas forgácsolási hőmérséklet azzal magyarázható, hogy az „1” és „3” zóna egyaránt jelentős hőforrás. Öntöttvas forgácsolásánál a forgácsba távozó hő mennyiségének csökkenése az elemi forgácsfajtaival magyarázható. Ez a forgácsfajta a „3” zónában minimális súrlódó munkát végez, és a zóna részaránya az energiamérlegben erősen lecsökken. Az alumínium jó hővezető képessége következtében a hő az „1” zónából nagy intenzitással a munkadarabba távozik, csökkentve ezzel, a forgácsba jutó hőmennyiség arányát.

A szerszámba távozó hő mennyisége igen alacsony. A munkadarab anyagától, a forgácsolási tényezőktől függetlenül ez a hőmennyiség messze alatta marad a munkadarabba vagy a forgácsba távozó hő mennyiségének. Ez a jelenség a szerszámanyag alacsony hővezetőképességével, a szerszám erősen korlátozott geometriai méreteivel, illetve elemi forgács esetében a forgács és a szerszám érintkezésének szakaszos jellegével magyarázható.

4.2. A súrlódáskor fejlődő hő

Az egymáson elmozduló felületek mentén a súrlódási erő munkát végez, ami hő formájában, a résztvevő felületeken keresztül az anyagba kerül. A súrlódásról külön fejezetben szólnunk.

4.3. Hőleadás

Hőleadásról akkor beszélünk, ha a termodinamikai rendszer hő formájában energiát ad át a környezetének. A forgácsolás tanulmányozásakor a rendszer és a környezet elhatárolása műszaki szempontok szerint történhet, ez azonban nem mindig egyértelmű. A forgácsolás, mint termodinamikai jelenség a munkadarab és a szerszám egy viszonylag kicsiny részében zajlik, amely nagy sebességgel mozog a térben. Műszaki szempontból a „rendszer” ez a kis környezet, amelyben a forgácsleválasztás zajlik, a munkadarab és a szerszám többi része fontos szerepet

játszik a hőelvonásban is, bizonyos értelemben a környezet (vagy „hőtartály”) szerepét tölti be.

A szerszám, mint vonatkoztatási rendszer szemszögéből nézve a munkadarab és a forgács nagy relatív sebességgel mozog. Azt is mondhatjuk, hogy a szerszámhoz képest nagy sebességgel mozgó munkadarab és forgács, konvekcióval szállít el nagy mennyiségű hőt, itt az „áramló közeg” szilárd halmazállapotú.

A munkadarab és a forgács érintkezik a környező levegővel. Nem becsülhetjük alá a forgácsleválasztási zónában a szilárd testek körül nagy sebességgel áramló levegő hővezetőképességét.

A forgácsleválasztás után a munkadarab lehűlése során alakul ki a maradandó feszültségállapot, amely a munkadarab minősége és tartóssága szempontjából fontos tényező.

A hőleadás modellezése tehát elsősorban a hőterjedés figyelembevételével valósítható meg.

4.4. Hőterjedés

A hő három módon terjedhet: hővezetéssel, hőáramlással (konvekcióval) és hősugárzással. A forgácsolás során legnagyobb szerepe a hővezetésnek van, de nem hagyható figyelmen kívül a másik két folyamat sem.

A hővezetési folyamatokat érdemes anyagon belüli és határfelületen keresztül történő esetekre csoportosítani.

A munkadarab és a szerszám belsejében zajló hővezetés nem vet fel megoldatlan kérdéseket.

A hőátadás az alábbi határfelületeken zajlik:

A munkadarab és a szerszám hátfelülete között, amelynek sajátossága, hogy a szerszám kialakítása miatt kis rés van a szilárd felületek között. Ebből következően a gyorsan áramló levegő, vagy hűtő-kenő folyadék erős konvekcióval közvetítő szerepet tölthet be a hőátadásban, de ebből adódóan jelentős hőelvonás is bekövetkezhet.

A forgács és a szerszám homlokfelülete között nagy nyomóerővel valósul meg az érintkezés, itt jelentős súrlódási hő is fejlődik. Sajátossága, hogy a forgács fokozatosan távolodik a szerszámtól, így a két szilárd felület érintkező és nem

érintkező régiói közötti átmenet helye bizonytalan. A mechanikai rezgések miatt a hőátadásban is nagy ingadozások várhatók, a jelenség tranziens jellegű.

A munkadarab, a forgács és a szerszám a környező levegőnek és hűtő-kenő folyadéknak is folyamatosan hőt ad át. Mi csak a levegő hatását vesszük figyelembe, a hűtőfolyadékot nem modellezzük.

Látható, hogy a felületek mentén zajló hőátadásban a konvekció is szerepet játszik. Átlagos forgácsolási sebesség esetén a hőfejlődés üteme nagyságrendekkel meghaladja a hősugárzással leadható hőmennyiséget, ezért ennek a folyamatnak nincs nagy jelentősége a forgácsolás leírásakor.

5. A kopás

Az ismétlődő terhelésnek kitett szerkezetek működése során fontos jelenség a kopás. A kopás egymással érintkező és egymáshoz viszonyítva elmozduló felületeken következik be (akárcsak a súrlódás jelensége). A kopás általában anyagleválással jár együtt, de különleges esetekben ennek ellenkezője is megtörténhet. Ebben a fejezetben áttekintjük a kopás fő típusait és a kopás modellezésének lehetőségeit.

5.1. A kopás fajtái

Tekintettel arra, hogy a kopás igen összetett jelenség, lefolyása és mértéke is erősen függ a felületek és egyéb fizikai, kémiai, műszaki paramétereiktől, körülményektől. A kiváltó fizikai jelenségek alapján alábbi kopási típusokat különböztetjük meg:

abrazív kopás,
adhéziós kopás,
diffúziós kopás,
oxidációs kopás,
elektromechanikus kopás.

A műszaki gyakorlatban kopásformákat is megkülönböztetünk a kopási kép alapján, ezzel lehetnek: a felület töredezése, a felület karcolása (szántása), kagylós kopás, berágódás, szilárd szemcse benyomódása. A kopással együtt tárgyalható a polírozás is, amelynek különlegessége, hogy ennek során anyagleválás helyett anyaghozzáadás is történhet.

Technológiai szempontból a forgácsolás esetén a kopás helye szerint is végezhetünk csoportosítást, így ismerünk sarokkopást és hátkopást.

5.2. A kopás modellezése

A kopás modellezésekor abból indulunk ki, hogy a kopás anyagleválással jár. Azt igyekszünk leírni, hogy a felület hogyan módosul ennek következtében. Számos kopásmodell alapját képezi az Archard modell:

$$w = KF \frac{G_t}{H}, \quad (5.1.)$$

itt

w a kopás előtti és a kopás utáni felület távolsága a vizsgált helyen,

K az ún. kopási együttható,

F a felületre merőleges erőhatás,

G_t a felület mentén történő elmozdulás nagysága,

H a felület keménysége.

Ezt az összefüggést differenciális formában adjuk meg a további alkalmazások céljából:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} \sigma v_{\text{rel}}, \quad (5.2.)$$

ahol

$\dot{w}$ a kopás sebessége a felületre merőleges irányban,

σ a nyomófeszültség,

v_{rel} a két felület relatív sebessége.

A kopás hőmérsékletfüggése és nyomófeszültségtől való nemlineáris függése a Bayer féle, termikus aktiválással kiegészített exponenciális formulával írható le:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} \sigma^m v_{\text{rel}}^n e^{-\frac{T}{T_0}}, \quad (5.3.)$$

ahol az új jelölések:

T a hőmérséklet,

T_0 az ún. aktiválási hőmérséklet,

m és n valós számok.

A $\dot{w}$ kopási sebességet kopási indexnek is nevezik. Ez a szimuláció során minden egyes lépésben kiszámítható, és a kopásnak kitett felület ennek megfelelően módosítható. Így a szerszámkopás figyelembe vehető. Mi kopás indexet számítottunk, de a kopást még nem vettük figyelembe, mert egyelőre a gyalulásnak egyetlen menetét modelleztük. [7]

6. Halmazállapot és kémiai változások

A forgácsolás folyamatában nem csak szilárd testek vesznek részt. Ebben a rövid fejezetben említést teszünk olyan jelenségekről, amelyek fellépnek a forgácsolás során, összetett voltak miatt azonban nem, vagy csak részben vettük figyelembe azokat. Ez a fejezet áttekintést ad a nem szilárd halmazállapotú testekről, amelyek állandó vagy csak esetleges szereplői a forgácsolásnak.

6.1. A munkadarab megolvadása

A forgácsolás során a hőfejlődés és a nagy nyomás miatt a munkadarab megolvadhat. Ez igen nagy forgácsolási sebesség mellett következik be. Ebben az esetben a forgácsleválasztás mechanizmusa lényegesen módosul, hiszen hidrodinamikai jelenségek is fellépnek. Ebben a dolgozatban ilyen forgácsolással nem foglalkozunk.

6.2. A levegő szerepe

A forgácsolás általában szabad levegőn zajlik. Különösen minimálkenés és szárazmegmunkálás esetén a levegő nagy sebességgel áramlik a munkadarab és a szerszám körül. Ez jelentős konvektív hőelvonást vagy hőátvitelt hozhat létre. Erre visszatérünk a termikus folyamatok tárgyalásánál.

6.3. A hűtő-kenő folyadék

Hűtő-kenő folyadék alkalmazása esetén a levegőről fentebb elmondottak a folyadékra is érvényesek. Ismert, hogy a kenési állapot függ a kenőanyag mennyiségétől, és számos más fizikai és technológiai paramétertől. A hűtő-kenő folyadék nem csak a hőtranszportot, hanem a mechanikai kölcsönhatásokat és az esetleges kémiai folyamatokat is lényegesen befolyásolhatja. Munkánkban nem modelleztük ezeket a hatásokat.

6.4. Kémiai változások

A forgácsolás során nagy nyomás és magas hőmérséklet lép fel. Ennek következtében kémiai folyamatok indulhatnak el, amelyek megváltoztatják a munkadarab, a szerszám, vagy a kenőanyag vegyi összetételét. Ezek lehetnek káros, vagy előre tervezett, hasznos folyamatok is. Szimulációnk során a kémiai változásokat nem modelleztük.

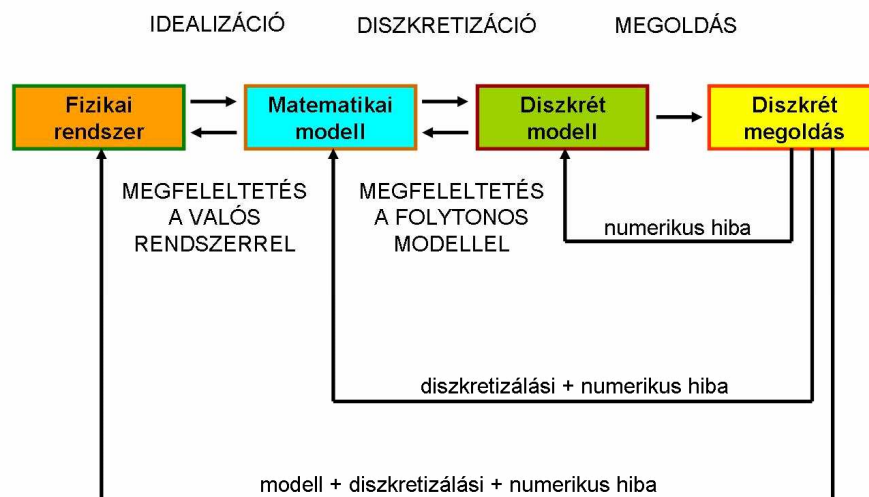
7. A modellezés során használt alapelvek, eljárások

Ebben a fejezetben áttekintjük azokat az alapelveket, amelyek szükségesek a szimuláció során használt modell felépítéséhez és kiszámításához. Különös figyelmet fordítunk a végelem modellezésre (VEM, angolul finite element method, FEM), mert ezt használtuk.

Ez a fejezet a [3],[4],[5],[6] szakirodalmak felhasználásával készült.

7.1. A VEM fő elvi lépései

A végelem módszer fő elvi lépéseit most általánosabb nézőpontból tekintjük át. Bár a figyelmünk középpontjában a mechanikai alkalmazások állnak, minden elvi lépés általánosítható és értelmezhető más típusú feladatokra is. Az 1. ábrán a VEM három fő lépése: az idealizáció, a diszkretizáció, a megoldás, és azok kapcsolatrendszere látható. Bár ez az ábra egyszerűsítésekkel él, mégis alkalmas a szóhasználat és az elv bemutatására. Mindegyik lépés hibák forrása. Az ábrán visszafelé történő mozgások („megfeleltetések”) általában lényegesen nehezebbek, rosszul kondicionált feladatok.



7.1. ábra A VEM szimuláció lépései

Idealizáció

Az idealizáció a valós fizikai problémától a matematikai modellig vezető lépés. A műszaki gyakorlatban ez a legfontosabb lépés, mert nem gépesíthető. Ezt mindig ember végzi.

Modellek

A modell egy szimbolikus (elvont, absztrakt) gép, amelynek célja egy rendszer működésének leírása és előrejelzése bizonyos szempont(ok)ból.

A modell elvonatkoztat a valóságtól, és a vizsgálni kívánt szempontokból írja le a rendszert.

Matematikai modell

A *matematikai modellezés*, vagy *idealizáció* az a lépés, amellyel a mérnök a valós fizikai rendszertől annak *matematikai modelljéig* jut el. A modell kifejezést a fenti értelemben használjuk. Azért hívjuk idealizációnak ezt a lépést, mert a matematikai modell szükségképpen elvonatkoztatással áll elő a fizikai rendszerből. Attól a személytől, aki felelős az ilyen döntések meghozataláért elvárható, hogy ismerje mindegyik modell előnyét, hátrányát és érvényességük korlátait. Továbbá a döntés más lehet statikai és dinamikai vizsgálatok esetén.

A műszaki problémák egyre összetettebbek. Ahhoz, hogy a szimuláció lehetővé váljon, szükség van a komplexitás kezelhető mértékűre történő csökkentésére.

Diszkretizáció

A matematikai modellalkotás egy egyszerűsítő lépés. Azonban nem minden fizikai rendszer matematikai modellje elegendően egyszerű ahhoz, hogy megoldjuk azokat. Gyakran térbeli és idő változók szerinti csatolt parciális differenciálegyenletekkel állunk szemben, amelyekre peremfeltételek is vonatkoznak (bonyolult peremfeltételekkel megadott peremérték feladatok). Az ilyen feladatoknak végtelen sok szabadsági foka van. A diszkretizáció során a (általában) végtelen szabadsági fokú matematikai modellt véges szabadsági fokú diszkrét modellel helyettesítjük. A diszkretizáció során

Hibaforrások és közelítés

A 7.1 ábrán láttuk, hogy a szimuláció minden lépése hiba forrása. A műszaki számításokban a modellezéssel (idealizálással) kapcsolatos hibák a legjelentősebbek.

A diszkretizációs hiba a második legfontosabb hibaforrás. A diszkrét megoldás általában csak közelítése a matematikai modell egzakt megoldásának. Ennek az eltérésnek a mértéke a *diszkretizációs hiba*.

A végeelem módszer

A végeelem módszer (VEM) a szerkezeti mechanika domináns diszkretizációs technikája. A VEM tárgyalható fizikai és matematikai megközelítésben. Mi az előbbi választjuk.

Fizikai nézőpontból a VEM alap gondolata az, hogy a matematikai modellt egymással nem átfedő egyszerű geometriai tartományokra bontjuk, amelyeket *végeelem*eknek, vagy egyszerűen csak *elem*eknek hívunk.

7.2. A végeelemek tulajdonságai

Az elemek egyedi tulajdonságait a többi elemtől függetlenül, külön-külön írhatjuk le, mintha nem is lennének kapcsolatban egymással. Ez a kulcsa az elemkönyvtárakon alapuló moduláris programozásnak.

Kiterjedés

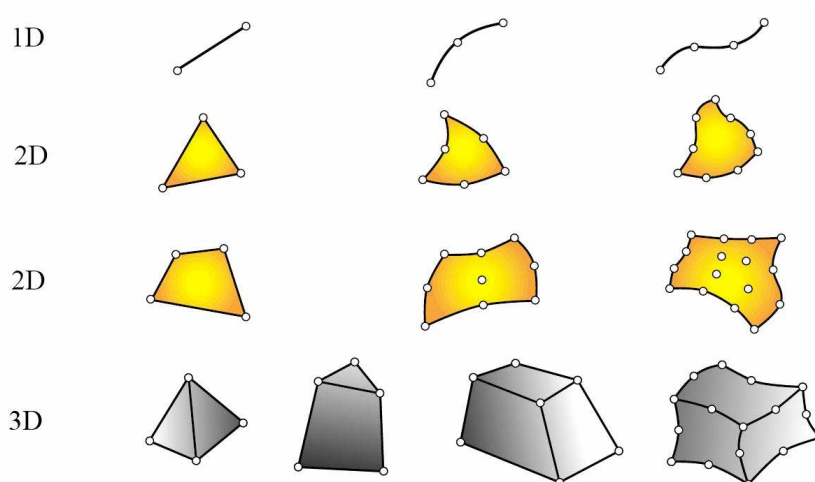
Az elemek egy- két- vagy háromdimenziósak lehetnek (1D, 2D, 3D). Léteznek kiterjedés nélküli (nulla dimenziós) speciális elemek, például pontszerű rugók, pontszerű tömegek. Az elemek tényleges dimenziója kiterjeszthető kinematikai transzformációkkal, így például 1D elemekből, amelynek a rúd és gerenda elemek, felépíthetők 2D vagy 3D szerkezetek is.

Csomópontok

Minden elem tartalmaz megkülönböztetett pontokat, amelyeket csomópontoknak hívunk (nodal point, node). A csomópontoknak kettős szerepük van:

meghatározzák az elem geometriai jellemzőit, és a csomópontokhoz kapcsolódnak a szabadsági fokok is. Ha szükséges a megkülönböztetés, akkor beszélhetünk geometriai csomópontokról és kapcsolódási csomópontokról. Az általunk tárgyalt esetek többségében ezek egybeesnek.

A csomópontok általában az elemek végpontjai vagy csúcspontjain helyezkednek el, ahogy a 2. ábra is mutatja. Az ún. finomított vagy magasabb rendű elemek esetén további csomópontok lehetnek az éleken, lapokon vagy az elem belsejében is.



7.2. ábra Tipikus végelemek alakok, és a csomópontok lehetséges elhelyezkedése

Alak (geometria)

Az elem alakját a csomópontok elhelyezkedése határozza meg. A gyakorlatban használt legtöbb elem alakja egyszerű. Egy dimenzióban az elemek egyenes szakaszok vagy görbe vonaldarabok (szegmensek). Két dimenzióban háromszög vagy négyszög alakúak. Három dimenzióban a legelterjedtebb alakok a tetraéder (tetrahedron, tet), az ötoldalú (síklapokkal határolt) test (nevezik éknek vagy prizmának is, pentahedron, wedge), vagy a hatoldalú test (a kockaszerű/kuboid vagy „tégla” elnevezés is szokásos, brick, hexahedron, hexa).

Szabadsági fokok

Az elem szabadsági fokai az elem *állapotát* definiálják. Ezen felül egyfajta „kezelő eszközként” is funkcionálnak, amelyeken keresztül a szomszédos elemek

csatlakoznak. A szabadsági fokok definíció szerint az elsődleges változónak a kapcsolódási csomópontokban felvett értékei (esetleg a deriváltjai).

Csomóponti erők

A szabadsági fokokhoz egy-egy értelmű hozzárendeléssel mindig kapcsolódnak erők. Mechanikai elemek esetén az összefüggés energia elvekből származik.

Összetétel (anyagi) jellemzők

Mechanikai elemek esetén ezek adják meg az anyag tulajdonságait. Például lineáris, rugalmas rúdelemre elegendő megadni az E rugalmassági együtthatót és az α hőtágulási együtthatót.

A mechanikai elemek osztályozása

A szerkezeti mechanikában használt végelemek alábbi csoportosítása nagyjából azon alapul, hogy azok kiterjedésüket tekintve mennyire vannak „közel” az eredeti fizikai rendszerhez, amit vizsgálunk.

Primitív (egyszerű) szerkezeti elemek

Hasonlítanak a valódi szerkezeti elemekre. A *primitív* jelző megkülönbözteti ezeket a makroelemektől, amelyekről később esik szó. A primitív azt jelenti, hogy nem bonthatók fel további, egyszerűbb elemekre.

Ezek az elemek általában az anyagok mechanikájának egyszerűsített modelljein alapulnak, és sokkal könnyebb megérteni azokat fizikai megfontolások alapján, mint matematikai megközelítésből. Ilyenek például a rúd, gerenda stb. elemek.

Kontinuum elemek

Egyáltalán nem emlékeztetnek a valódi szerkezetekre. Folytonos tömegeloszlású testek felosztásából származnak, vagy folytonos közegként felfogott szerkezeti elemekből.

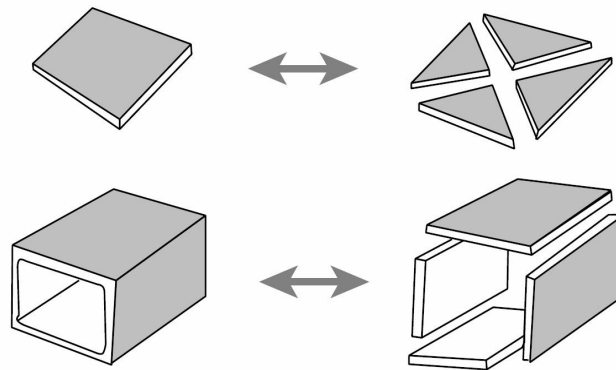
A szerkezeti (primitív) elemekkel ellentétben a kontinuum elemeket egyszerűbb megérteni matematikai leírásuk alapján. Ilyenek például a lemez, héj, tengelyszimmetrikus térbeli, vagy az általános térbeli szilárd elem.

Speciális elemek

A speciális elemek rendelkeznek a szerkezeti vagy kontinuum elemek tulajdonságaival, de ezen felül még olyan sajátosságaik is vannak, amelyek a feladat speciális fizikai jellegéből adódnak. Például ilyenek a repedést szimuláló elemek (amelyeknek egyik csomópontjuk kettős), nyíródó panel elemek, végtelen, vagy „majdnem végtelen” elemek, érintkezési és büntető (-függvényekhez járulékot adó) elemek, merev test elemek.

Makroelemek

A makroelemeket szokás elemcsomagnak (mesh unit) vagy szuperelemeknek is nevezni, bár ez utóbbi átfed a következő részben tárgyalt alstruktúrákkal. A makroelemek hasonlítanak bizonyos szerkezeti elemekre, legfontosabb jellemzőjük, hogy egyszerű elemekből épülnek fel (3. ábra).



7.3. ábra Makroelemek

A makroelemek használatának fő célja az előfeldolgozás egyszerűsítése.

7.3. Összeállítás

A teljes modell felépítése két fő lépés tartalmaz:

Globalizáció

Az elemeket leíró egyenleteket egy közös, globális koordináta-rendszerbe transzformálják, ha szükséges.

Összefűzés

Az egyes elemekre külön-külön felírt merevségi egyenleteket egyetlen, közös merevségi egyenletté állítják össze megfelelő indexelés bevezetésével és sorok, oszlopok beszúrásával a mátrixokba. A globális merevségi egyenlet sok ezer, vagy több millió szabadsági fokú is lehet, emiatt számítógépes alkalmazások használata, vagy készítése szükséges.

7.4. Peremfeltételek

A VEM fő erőssége, hogy alkalmazása során könnyen és elegánsan kezelhetők a peremfeltételek és kapcsolódási feltételek. Ennek az erősségnek azonban árnyoldala is van. A kezdő VEM felhasználók számára komoly kihívást jelent megérteni és helyesen kezelni a peremfeltételeket. A legfontosabb, amire emlékeznünk kell az, hogy a peremfeltételek alapvetően két módon jelentkezhetnek, ezek: lényeges és természetes.

Lényeges peremfeltételek

Közvetlenül befolyásolják a szabadsági fokokat, a bal oldali $\bar{u}$ vektorra alkalmazzuk azokat.

Természetes peremfeltételek

A szabadsági fokokat nem befolyásolják közvetlenül, s jobb oldali $\bar{f}$ vektorra alkalmazzuk azokat.

Elmozdulás peremfeltétel típusok:

Talaj vagy támasz feltétel

Közvetlenül megtiltja a szerkezet merev testszerű elmozdulásait.

Szimmetria feltételek

Szimmetria vagy antiszimmetria megszorításokat alkalmaz a szerkezet valamely szimmetria síkjára, tengelyére vagy pontjára. Ez lehetővé teszi, hogy a diszkretizáció során a rendszernek csak egy részére végezzük el a számítást, és így csökkenjen a modellezésbe fektetett munka, és a megoldandó egyenletek száma.

Elhagyható szabadsági fokok.

Azoknak az elmozdulásoknak a figyelmen kívül hagyása, amelyek lényegtelenek a feladat megoldása szempontjából. Még a végeselem programok gyakorlott felhasználóit is megzavarja időnként ez a fajta peremfeltétel. Példa: egy sima héjszerkezet felületére merőleges forgási szabadságfok.

Kapcsolódási feltételek

A szomszédos szerkezetekkel, alszerkezetekkel való kapcsolódást biztosítják, vagy összefüggéseket adnak meg a szabadságfokok között. Az ilyen feltételek közül sokat a többpont feltételek vagy több szabadsági fokra vonatkozó feltételek (multipoint constraints, multifreedom constraints) címszó alatt emlegetik. Ezeket numerikus szempontból rendkívül nehéz kezelni.

7.5. A felhasznált szoftver

Munkánk során az „MSC Simulation Academic Bundle 2010” szoftvercsomag két tagját használtuk. A MENTAT egy elő- és utófeldolgozó szoftver, amelynek segítségével definiáltuk a modellt, majd kiértékeljük a számítási eredményeket. A MARC a végeselem modell megoldó szoftvere.

A modell definiálása után a MENTAT *.dat kiterjesztésű input fájlt készít a MARC számára, majd meghívja azt. A MARC számos fájl segítségével kommunikál a MENTATtal és a felhasználóval. A *.sts, *.log és *.out kiterjesztésű szöveges állományok szövegszerkesztőben megnyithatók és olvashatók. A *.t16 kiterjesztésű bináris fájl a MENTAT segítségével nyitható meg, és tartalmazza a számítás eredményeit.

8. A diszkrét modell

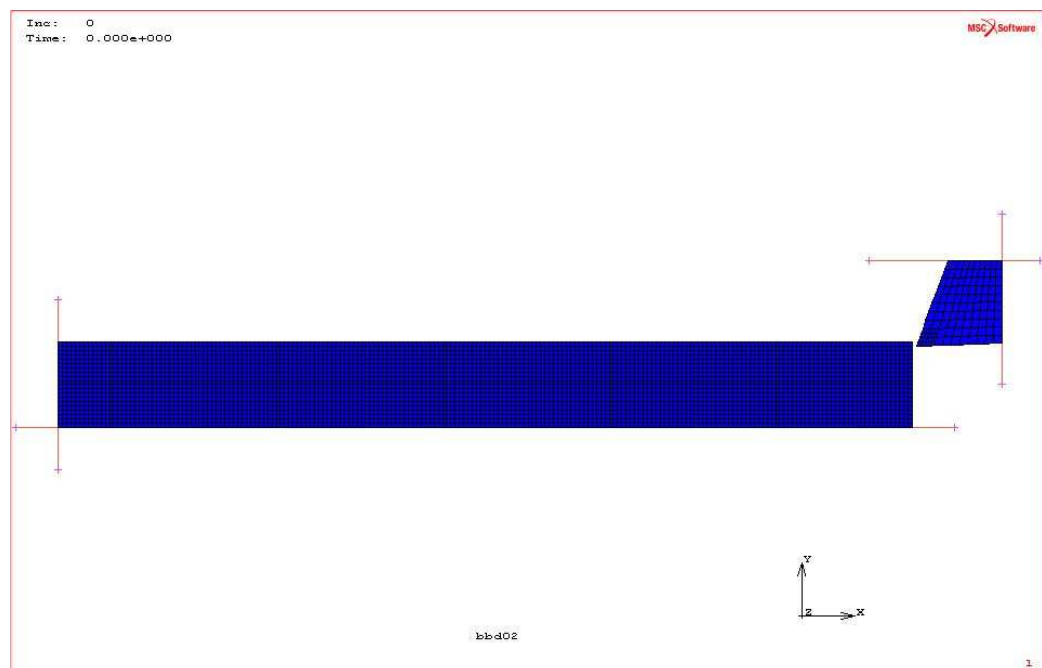
Ebben a fejezetben bemutatjuk a fogácsolási feladat diszkrétizált modelljét. Szó esik a végelem felosztásról, a peremfeltételekről, az anyagi tulajdonságokról, az érintkezési problémáról, a globális újrarahálózásról és a megoldó eljárás beállításairól.

A munkadarab mérete 40x200x1 mm, a szerszám homlokszöge 20° , hátszöge 5° , a fogásmélység 1 mm, az forgácsolási sebesség 50 mm/s.

8.1. A végelem modell

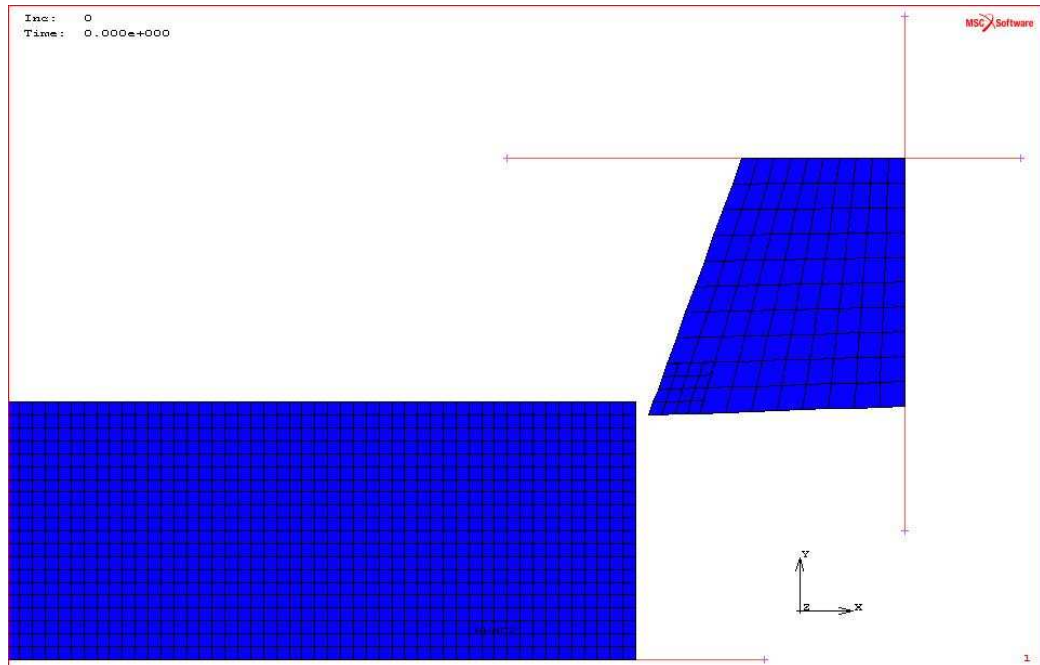
Síkbeli feladatot fogalmaztunk meg, amely paraméterként tartalmazza a munkadarab és a szerszám vastagságát, ez 1 mm.

Lineáris négyszög elemeket használtunk. A munkadarab esetén ezek 1 mm élhosszúságú négyzetek. A szerszám esetén közel 1 mm élhosszúságú négyszögek. (8.1 és 8.2 ábra)



8.1. ábra A feladat végelem modellje

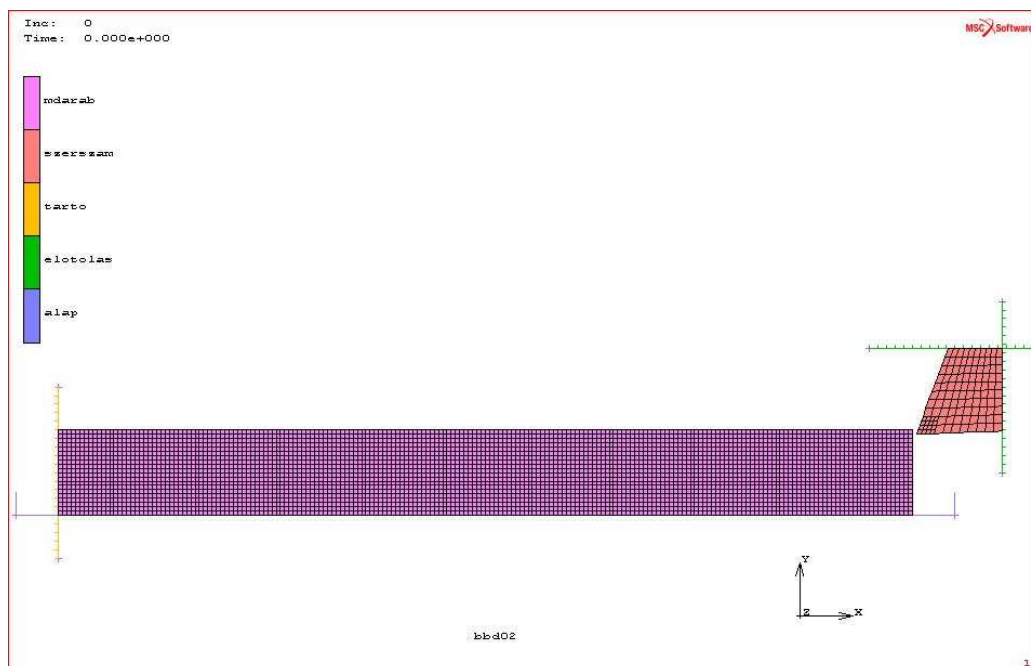
A szerszám élénél az általunk keresett függvények várhatóan nagy változásokat tartalmaznak majd, ezért a jobb közelítés érdekében sűrűbb végelem felosztást alkalmaztunk (8.2 ábra).



8.2. ábra A szerszám élénél sűrűbb végelem felosztást hoztunk létre

8.2. Az érintkezési feladat

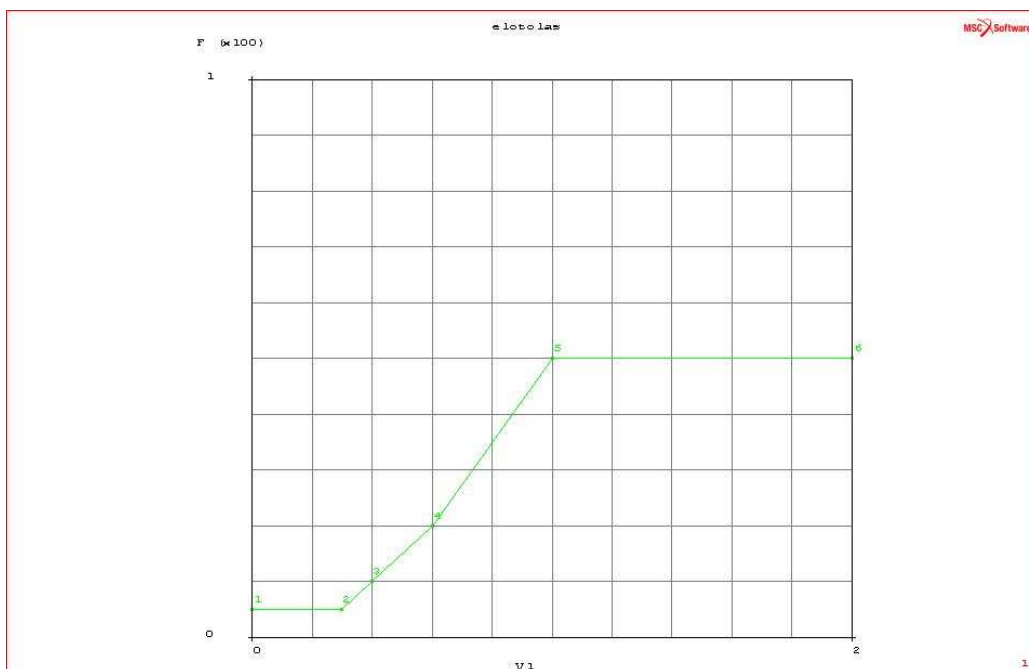
A munkadarab rögzítését és a szerszám mozgását merev testek beépítésével oldottuk meg. A 8.3 ábra mutatja a feladatban szereplő testek összességét.



8.3. ábra A feladatban szereplő testek

A munkadarab és a szerszám deformálható testek, később szó esik még róluk. A modellbe olyan testeket építettünk be, amelyeknek nincsenek anyagi tulajdonságaik, de érintkezési kölcsönhatásba lépnek a deformálható testekkel, így biztosítva számukra bizonyos kényszerfeltételeket. A „tarto” olyan merev test, amely egy egyenes szakaszból áll, helyhez rögzített, a munkadarab megtámasztását szolgálja. A munkadarab csomópontjai nem léphetnek át ezen a testen. Az „alap” egy szimmetria megszorítást tartalmazó merev test, a munkadarab középvonalán helyezkedik el. A munkadarabnak csak a felső felét építettük fel véges elemekből, az alsó részét, amely a felső tükörképe terhelésmentes esetben, a szimmetria feltétel alapján vesszük figyelembe. A munkadarab nem válik el az „alaptól”, nem hatol át rajta.

Az „elotolas” nevű merev test két egyenes szakaszból áll, amelyek a szerszám szárának hatását helyettesítik. A szerszám ehhez a merev testhez ún. ragasztott érintkezéssel csatlakozik, azaz nem válik el tőle, nem is hatol át rajta. Az „elotolas” nevű test előírt sebességgel mozog, ez biztosítja a szerszámmozgást. A 8.4 ábra mutatja a szerszámmozgás sebességét az idő függvényében.



8.4. ábra A szerszám x irányú sebessége az idő függvényében

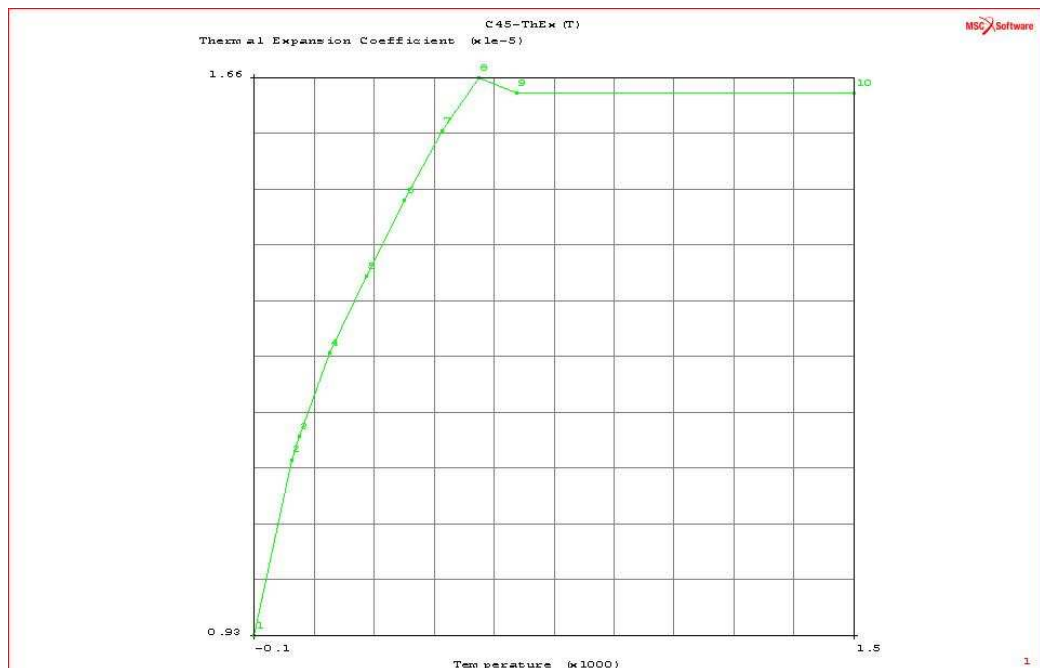
A sebesség 5mm/s értékről indul, majd fokozatosan növekszik 50 mm/s-ig. Erre két okból van szükség. Egyrészt a valóságos szerszámmozgás sem állandó sebességű. Másrészt a munkadarab és a szerszám találkozásakor túl nagy sebesség esetén konvergencia problémák lépnek fel, melyek így elkerülhetők.

A szerszám és a munkadarab érintkezésénél a határok diszkrét reprezentációját használtuk, kétoldalú érintkezésvizsgálattal. A tolerancia távolság megválasztását automatikus értékreállítottuk, amely változik a számítás során, a bias factor szintén az alapértelmezett 0,95.

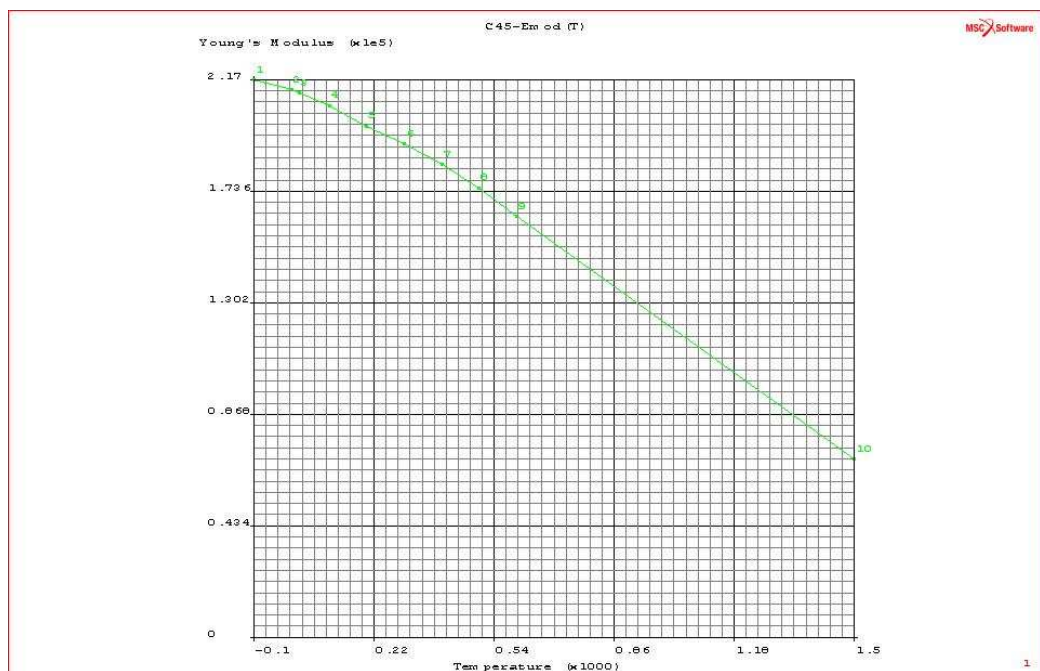
A szerszám és a munkadarab érintkezésére vonatkozóan a mechanikai és hőtani paraméterek beállítása is szükséges. A súrlódási együttható 0,4, a Coulomb törvény arcus tangens közelítését használtuk 10 mm/s határsebességgel. A hőátadással kapcsolatosan három adatot definiáltunk. A hőátadási tényező 100 mJ/mm². Az ún. érintkezés közeli távolságot viszonylag nagy, 0,5 mm értékre állítottuk. Ezen a távolságon belül még azt feltételezi a megoldó eljárás, hogy van termikus kölcsönhatás a felületek között, ennek hőátadási tényezőjét 50 mJ/mm²-re állítottuk be. A távolságfüggő hőátadás tényezője 20 mJ/mm².

8.3. Az anyagi minőség

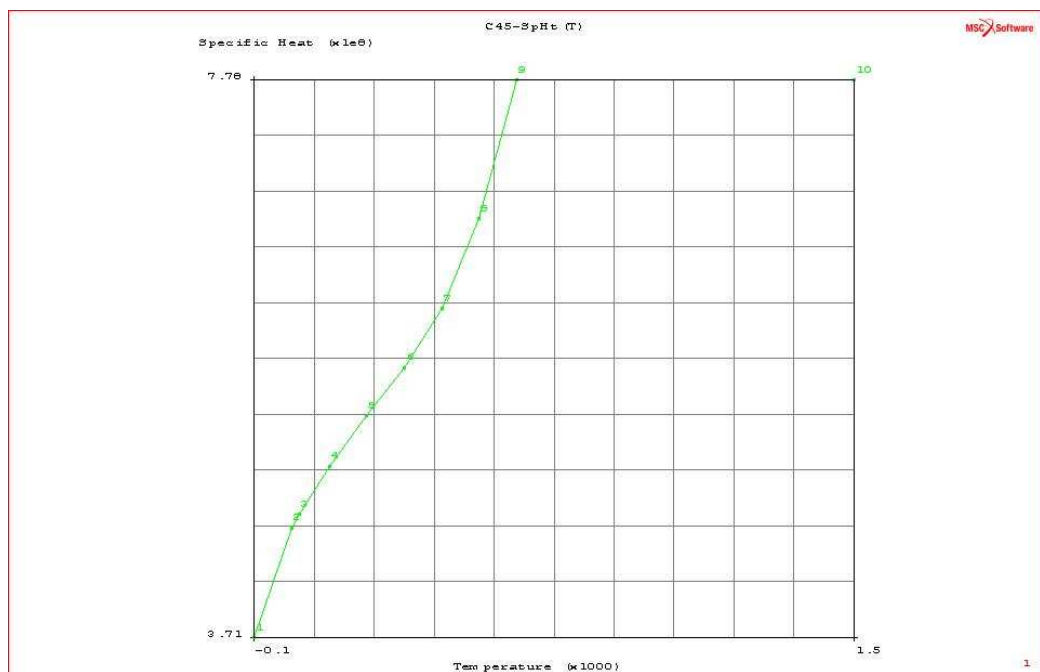
A munkadarab anyaga C45-ös acél. Ennek adatait megtaláltuk a MENTAT adatbázisában, aminek igen nagy előnye, hogy nem csak az anyagállandók, hanem azok hőmérsékletfüggése is rendelkezésünkre állt, ezt mutatják be a 8.5-8.8 ábrák. Ezeken az ábrákon normál alakban láthatjuk a függvényértékeket, csak a mantissza szerepel a tengelyen, a karakterisztika a tengely feliratában található. A mennyiségek mértékegysége mm, t, s, N rendszerben értendő, azaz a feszültség MPa, a hőátadási együttható $\text{mJ}/\text{mm}^2\text{K}$, a fajhő mJ/tK egységekben adottak. Ennek oka, hogy a MARC dimenziótlanított mennyiségekkel dolgozik, a felhasználónak kell választania mértékegység rendszert, és ezzel minden mennyiség mértékszámát összhangba kell hozni. A beépített anyagkönyvtár a fentebb említett mértékegység rendszert használja, ezért ehhez igazodtunk.



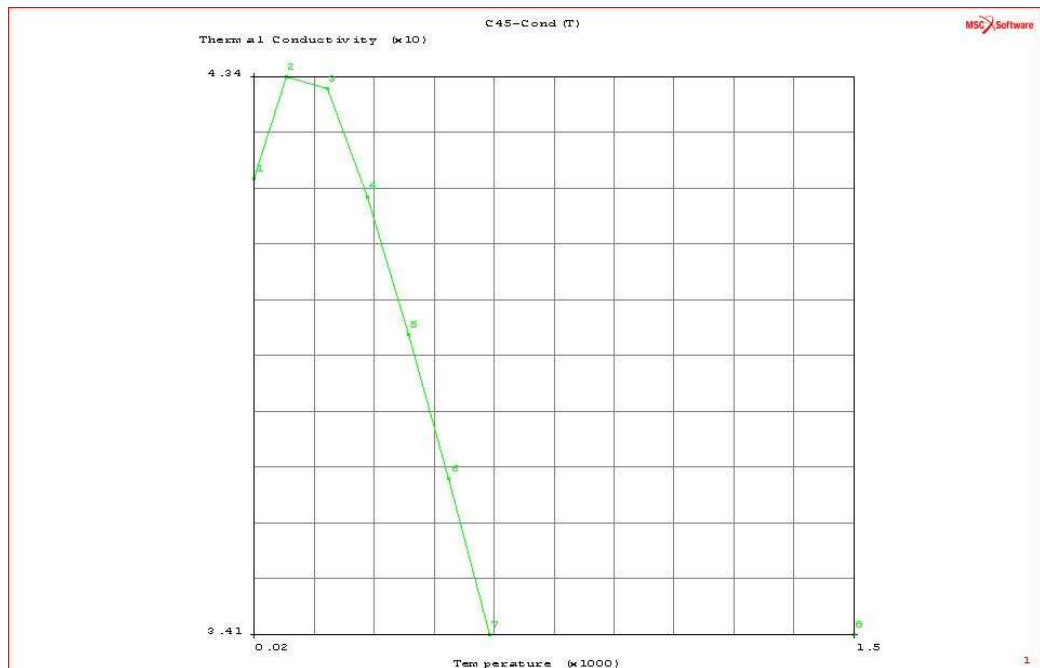
8.5. ábra A C45 anyag hőtágulási együtthatója 1/K egységekben



8.6. ábra A C45 anyag rugalmassági együtthatója MPa egységekben



8.7. ábra A C45 anyag fajhője mJ/tK egységekben



8.8. ábra A C45 anyag hővezetési tényezője $\text{mJ/mm}^2\text{K}$ egységekben

A szerszám anyaga keményfém. Ennek adatait azonban nem találtuk meg a MENTAT anyagkönyvtárában, és a szakirodalomban sem. Annyit tudunk róla, hogy a rugalmassági együtthatója 500000MPa körüli. Ezért az anyagi tulajdonságait egy szerkezeti acél tulajdonságaival közelítettük, megnövelt (skálázott) rugalmassági együtthatóval.

8.4. A végelem modell globális újragenerálása

Mivel a feladatban nagy elmozdulások jelennek meg, szükséges a munkadarab globális újrahálózása. Ez azt jelenti, hogy előre adott feltételek teljesülése esetén a munkadarab végelem felosztását újra létrehozza a megoldó eljárás, a korábbi felosztáson elért eredményeket arra átviszi (rezoning), és úgy folytatja a számítást. Ha ezt nem tennénk meg, akkor néhány iteráció után annyira torzult elemek jönnének létre a nagy elmozdulás miatt, amelyek nem alkalmasak már a fizikai mennyiségek közelítésére. Minden második iterációs lépésben újra generáltuk a végelem felosztást.

8.5. A megoldó eljárás beállításai

Tranziens feladatként oldottuk meg a modellt. Ez azt jelenti, hogy a dinamikai hatások is szerepelnek benne.

Az analízis teljes időtartama 2 másodperc. Az első másodpercben felfut a szerszám sebessége, a második másodpercben állandó marad (8.4 ábra).

Automatikus lépésköz változtatást használtunk.

Az adatokat a modellben mért idő minden századmásodpercében írtuk ki. Ennek oka az volt, hogy a lépésköz ennél lényegesen kisebb lévén, kezelhetetlenül nagy adatmennyiséget jelentett volna minden egyes iterációs lépés eredményeinek a kiírása.

A modell 2x3GHz-es processzorral és 3GB RAM-mal rendelkező számítógépen hozzávetőlegesen 4 órahossza alatt futott le.

9. Az eredmények kiértékelése

Ebben a fejezetben bemutatjuk a modell megoldását és értékeljük azt. Szó esik majd a feszültségállapotról, a sebességállapotról, a hőmérséklet eloszlásról, és a kopási indexről. A $t=1,658s$ időpontot és ennek környezetét választottuk az értékeléshez, mert ekkor már a szerszám ($t=1s$ óta) az előírt sebességgel mozog (ld. 8.4 ábra).

9.1. A feszültségállapot

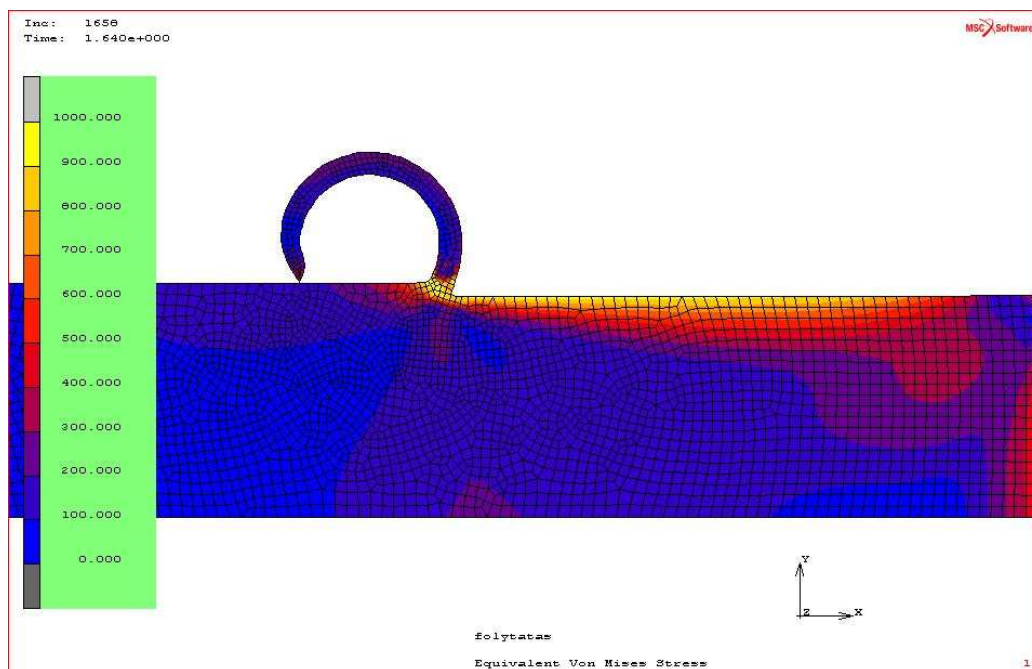
A Miseses szerinti egyenértékű feszültség

$$\sigma_{\text{Miseses}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2]} \quad (9.1.)$$

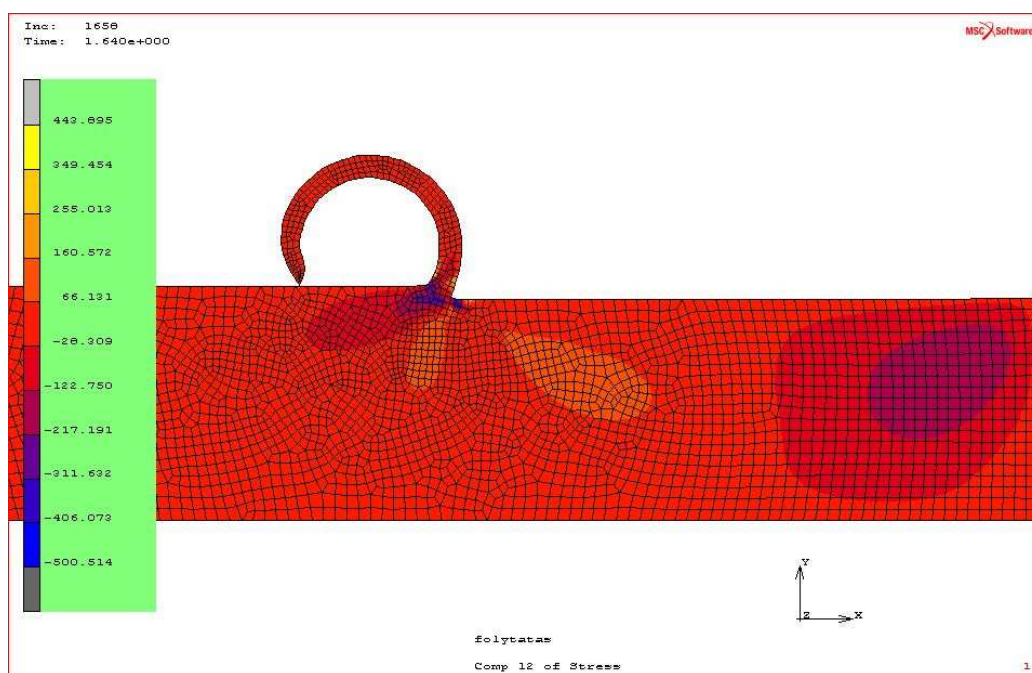
a tönkremenetel egyik elterjedten használt jelzőszáma. Ahol ez meghaladja a folyáshatárt, ott az anyag tönkremenetele, illetve rugalmatlan alakváltozása várható. A 9.1 ábra mutatja, hogy a nyírási zónában a várakozásnak megfelelően nagy a Miseses szerinti feszültség. Érdekes továbbá, hogy a megmunkált felületen hosszan elnyúlóan szintén nagy egyenértékű feszültségek figyelhetők meg.

A 9.10 ábra tanúsága szerint a megmunkált felületen a hőmérséklet gyorsan visszaesik 60°C körüli értékre. Ebből az következik, hogy ebben a zónában a nagy feszültségek megmaradnak. Vagyis számottevő megmaradó feszültséget mutat a számításunk.

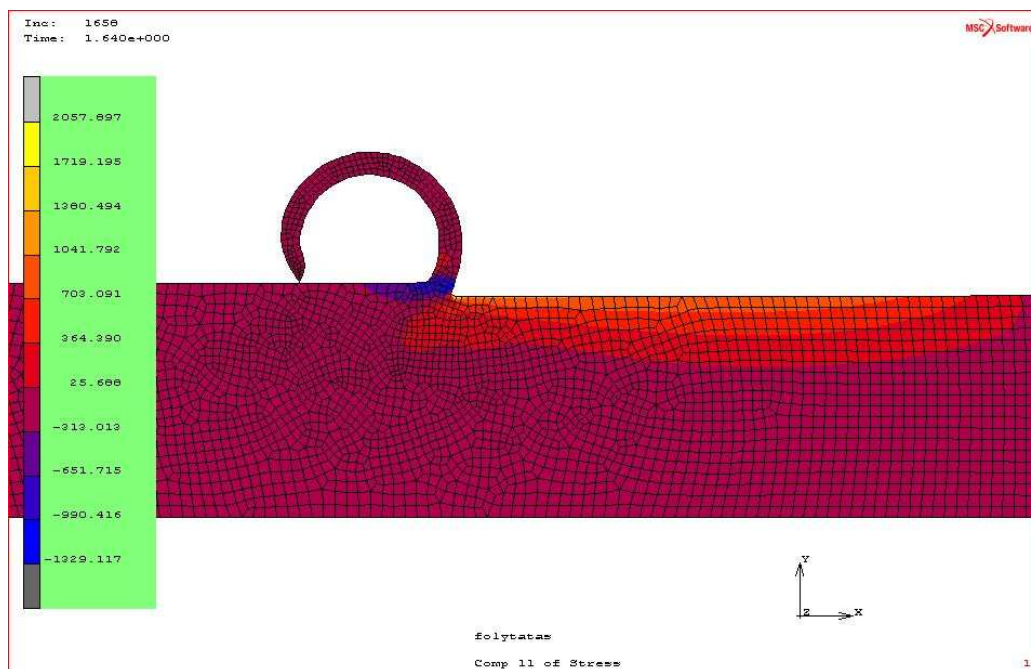
A 9.2 ábra a nyírási zónában ébredő nagy nyírófeszültségeket mutatja. A 9.3 és a 9.4 ábra a nyomófeszültségeket mutatja. A 9.1-9.4 ábrákról összességében leolvasható, hogy a nagy Miseses szerinti feszültséghez a nyírási zónában a nyírófeszültség és a z x irányú nyomófeszültség, a megmunkált felületen pedig az x irányú húzófeszültség ad jelentős járulékot.



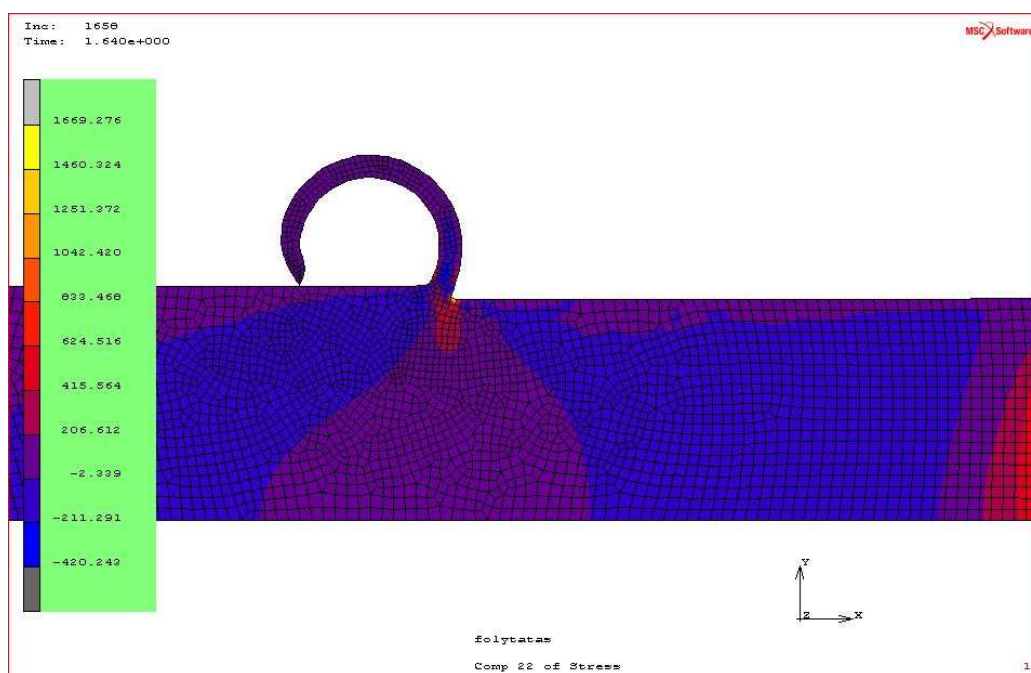
9.1. ábra A munkadarab Mises szerinti egyenértékű feszültsége



9.2. ábra A munkadarabban ébredő nyírófeszültség

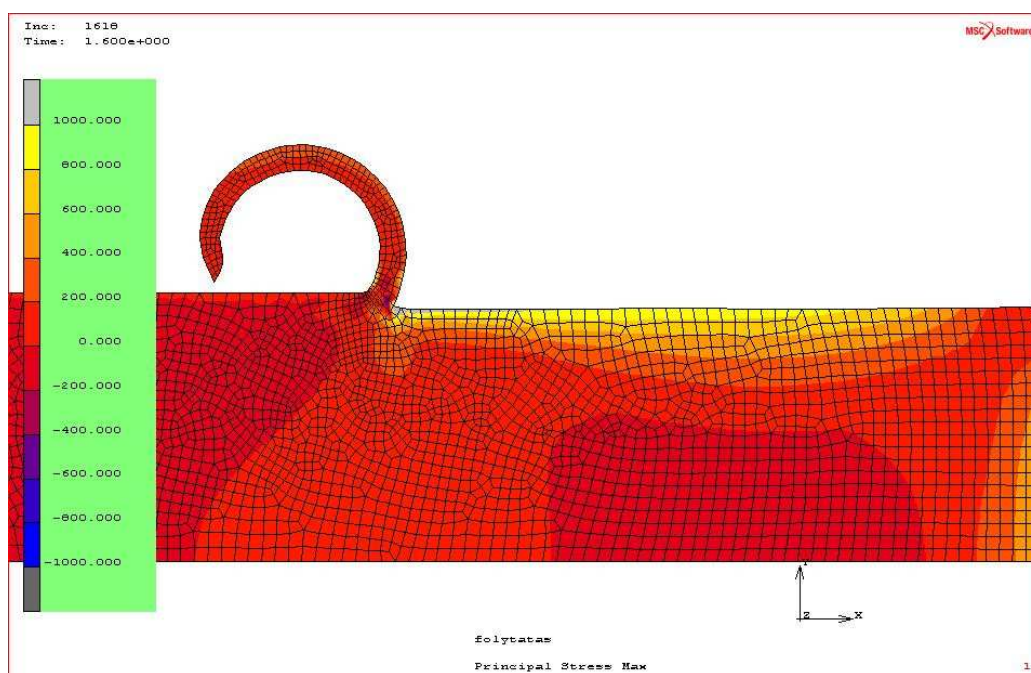


9.3. ábra A munkadarabban ébredő x irányú nyomó feszültség

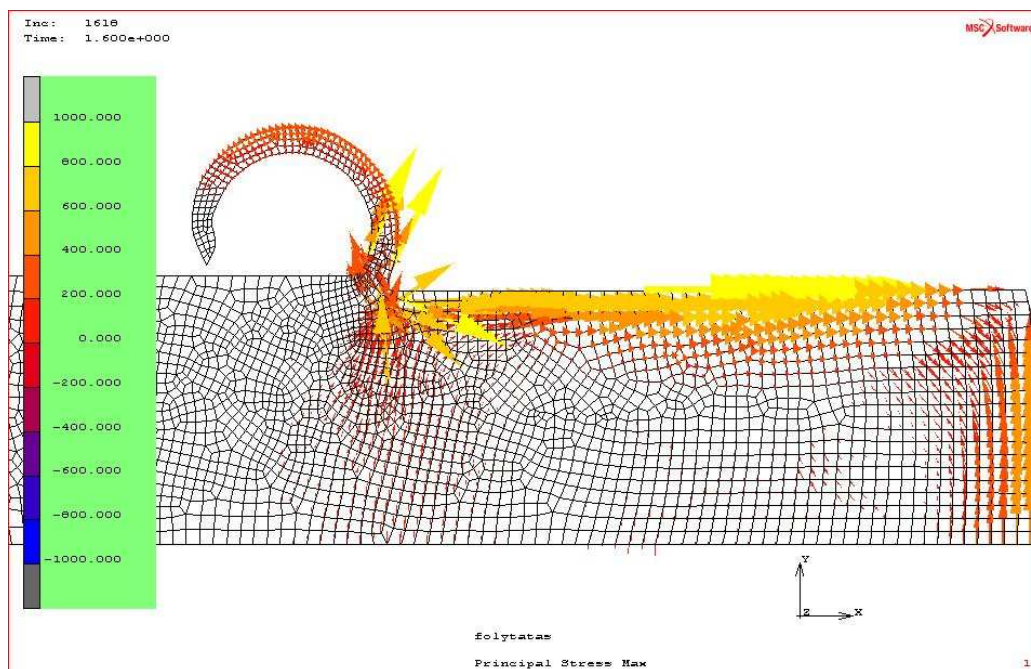


9.4. ábra A munkadarabban ébredő y irányú nyomó feszültség

A feszültségtenzor legnagyobb sajátértékét, és az ahhoz tartozó sajátvektor irányát mutatják a 9.5 és 9.6 ábrák. Ezek megerősítik a korábbi megállapításainkat. Itt érdemes felhívni a figyelmet a munkadarab jobb alsó szélén kialakult feszültségállapotra is. Ez feltehetően kapcsolatba hozható a forgácsolás megkezdésekor fellépő nagy, lökésszerű erőhatásokkal. Hasonló okokból alakulhat ki a jobb felső sarok erős deformációja.



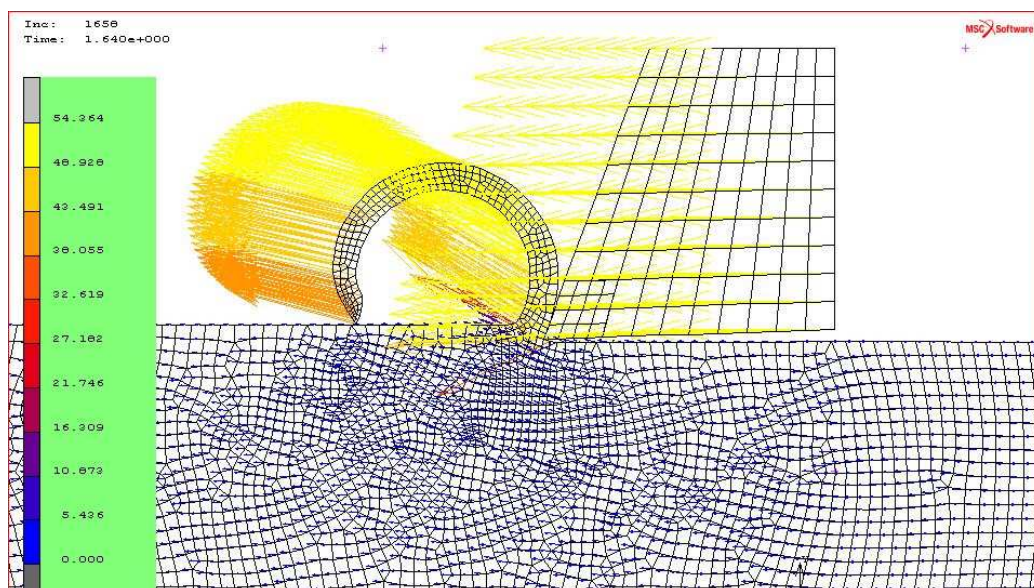
9.5. ábra A munkadarabban ébredő feszültségtenzor legnagyobb főfeszültsége



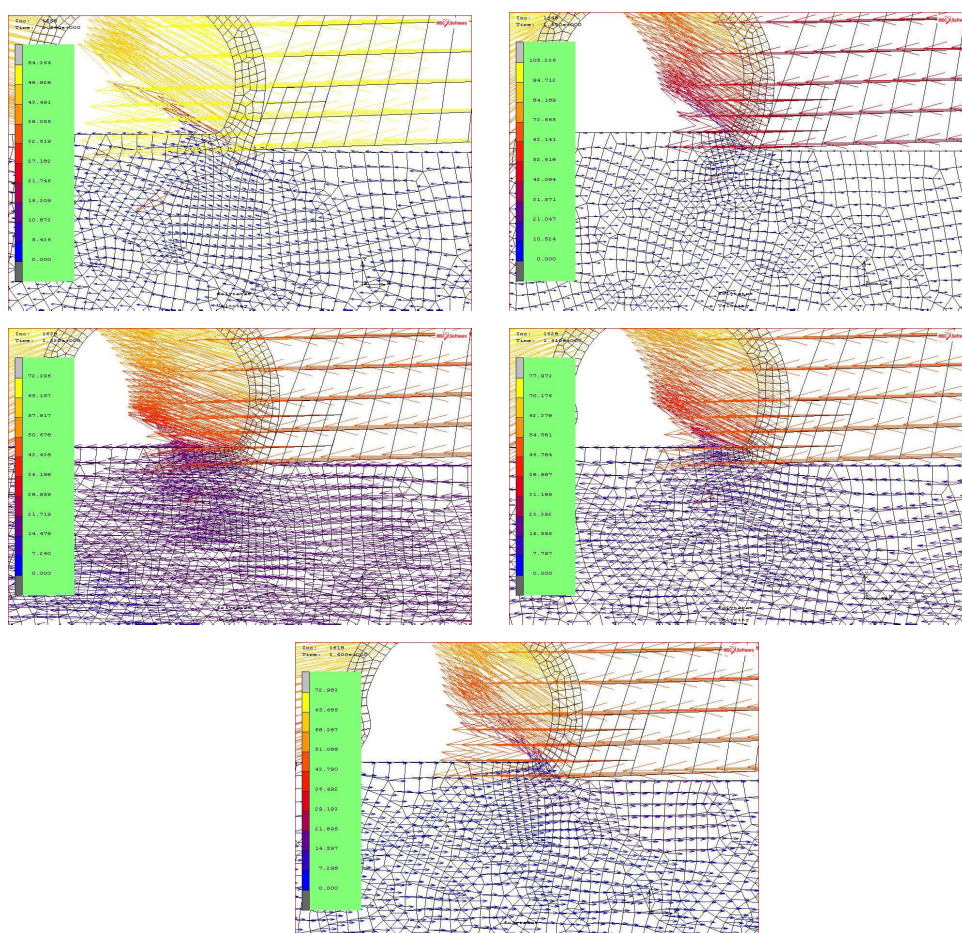
9.6. ábra A munkadarabban ébredő legnagyobb főfeszültség nagysága, és a hozzá tartozó sajátvektor iránya

9.2. A sebességállapot

A 9.7 ábra a rendszer sebességállapotát mutatja. Látható, hogy a szerszám 50 mm/s sebességgel mozog, ahogy azt előírtuk. A forgács hasonló sebességgel repül előre. A munkadarabban, a nyírási zóna alatt, és ennek környezetében szintén mozgás tapasztalható (kis kék nyilak a kép közepén). Néhány egymást 0.01s időközzel követő pillanatban vizsgálva a sebességállapotot azt vehetjük észre, hogy a munkadarab ezen pontjainak sebessége közel párhuzamos az x tengellyel, de ismétlődően irányt vált. Olyan, mintha rezgő mozgást végeznének ezek a pontok. Ezzel sikerült szimulálnunk a forgácsolás során ébredő rezgéseket. Ezzel kapcsolatos az a tapasztalatunk is, hogy a tarnziens szimuláció mindig a megengedett lehető legkisebb lépésközzel haladt előre annak ellenére, hogy a forgácsleválasztás jelenségét jellemző mennyiségek nem mutattak ilyen kis időskálán nagy változásokat. A rezgések tanulmányozása további vizsgálatok tárgya lehet.



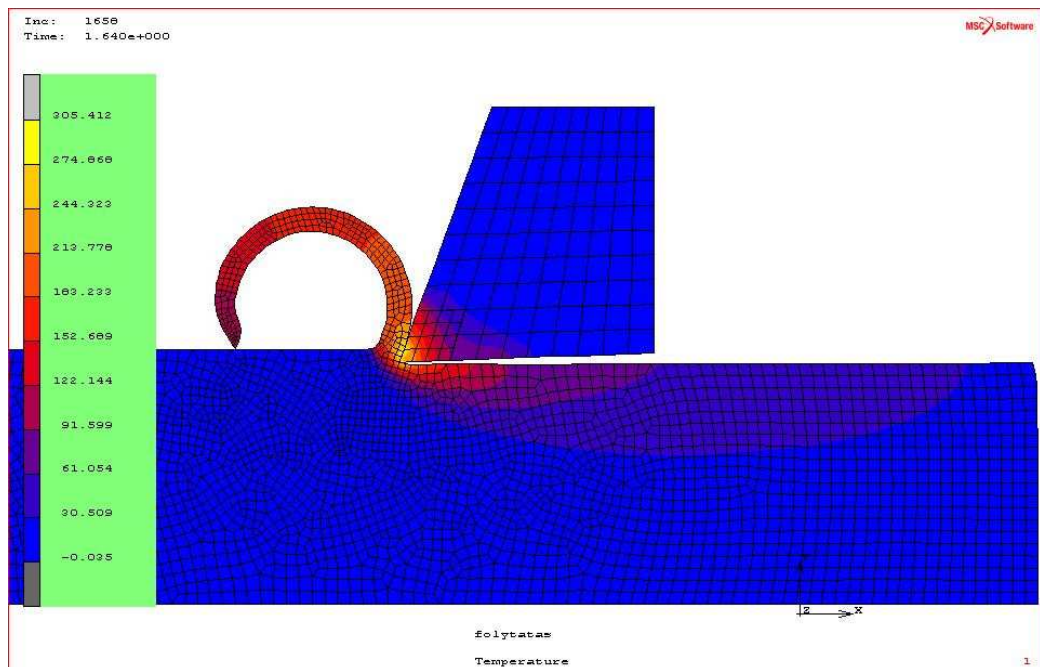
9.7. ábra A sebességállapot (mm/s egységekben)



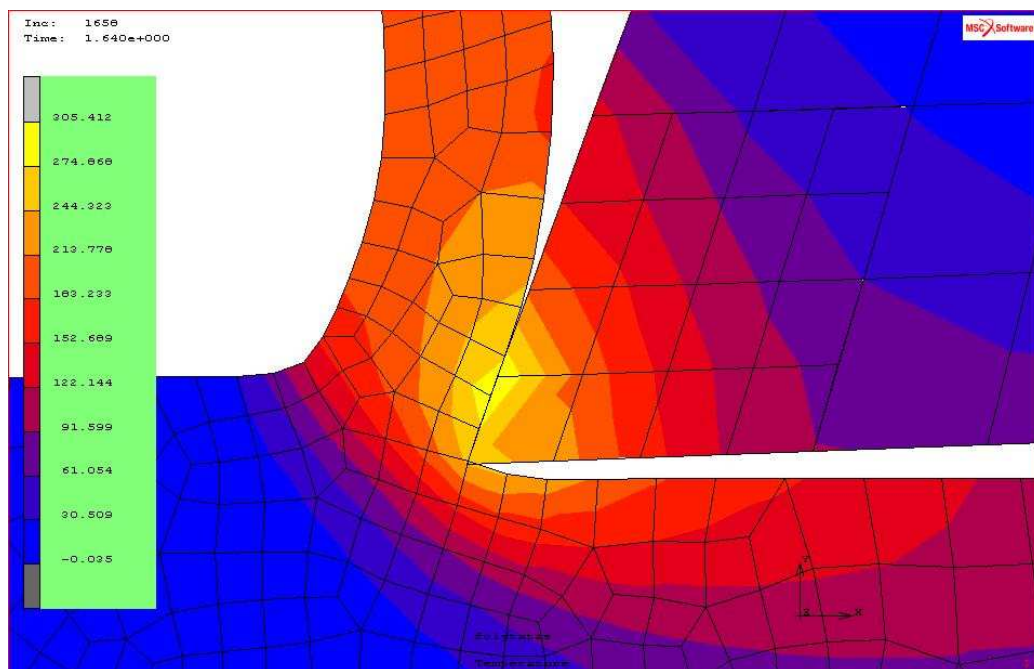
9.8. ábra A sebességállapot a nyírási zóna közelében, 5 egymást 0,01s időközzel követő pillanatban (mm/s)

9.3. A hőmérséklet eloszlás

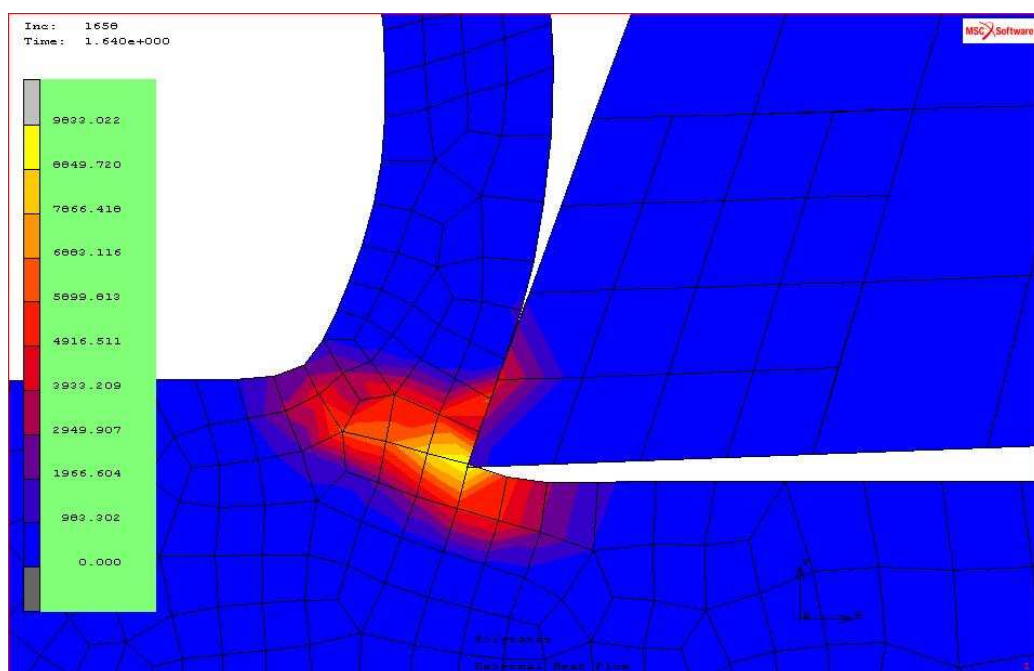
A 9.11 és 9.12 ábrák a hőmérséklet eloszlást mutatják. Megállapítható, hogy a szerszám felmelegedése nem közvetlenül az élnél, hanem a homlokfelületnek az él feletti részén a legnagyobb ($305\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ez összhangban van a forgácsolással kapcsolatos tapasztalatokkal. A 9.12 ábra a hőáramsűrűség forrásait mutatja be. Megállapítható, hogy a rendszerben a hő forrása a nyírási zónában, és annak környékén bekövetkező deformációs munka, valamint a forgács és a szerszám homlokfelülete közötti súrlódás.



9.10. ábra A hőmérséklet eloszlás a rendszerben



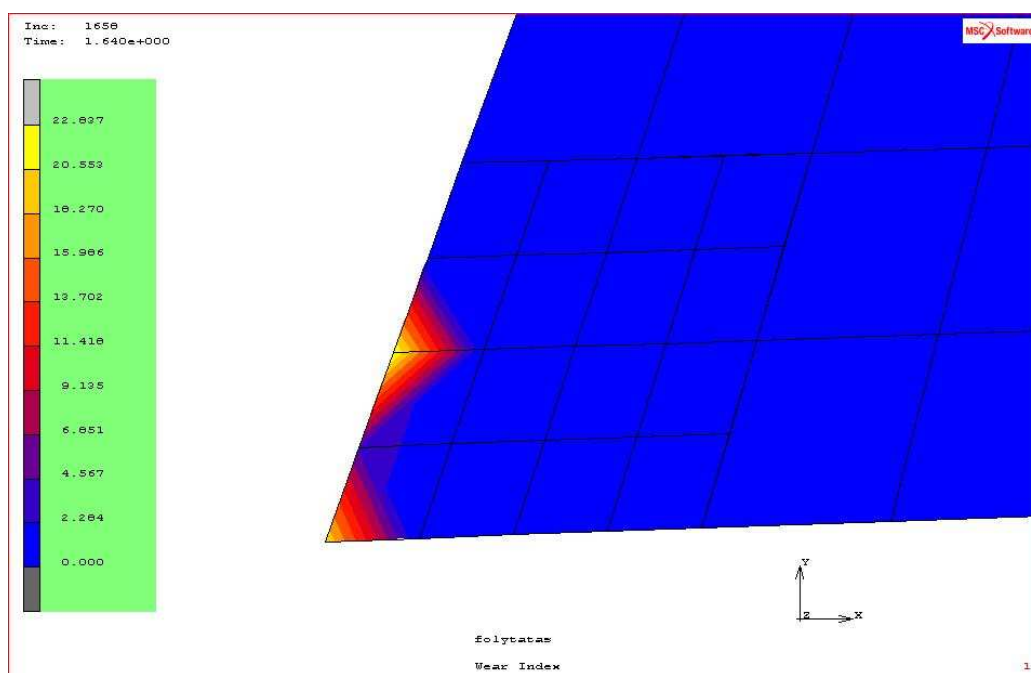
9.11. ábra A hőmérséklet eloszlás a nyírási zóna közelében



9.12. ábra A hőforrások a rendszerben

9.4. A kopás

A szimuláció során a kopási index kiszámítására is lehetőség van. Ez a mennyiség megmutatja, hogy a szerszám mely részein milyen sebességű a kopás az adott iterációs lépésben. Ennek elméleti háttéréről az 5.2 alfejezetben esett szó. Eredményeink számot adnak a szerszám sarokkopásáról és a homlokkfelület kopásáról.



9.13. ábra A szerszám kopási indexe

10. Összefoglalás

A Nyíregyházi Főiskola Műszaki és Mezőgazdasági Karának Műszaki Alapozó és Gépgyártástechnológiai Tanszékének egyik kutatási témája a környezetbarát megmunkálások vizsgálata. E témában már számos kísérlet folyt le, különösen a minimálkenéssel végzett fúrással kapcsolatban.

A fizikai modellszámítások kiegészítik a kísérleti munkát. Célunk olyan elméleti modell kidolgozása, amely a kísérleti tapasztalatokkal jól egyező eredményeket szolgáltat a forgácsolás szempontjából fontos és mérhető mennyiségekre, melyek a mechanikai mennyiségek, a hőmérséklet és a kopás.

Ebben a dolgozatban a forgácsoló ék működését vizsgáltam szerkezeti acél gyalulása során. Az volt a célom, hogy előtanulmányt végezzek más forgácsolási technológiák szimulációjának előkészítéséhez. Modelleztem a mechanikai, a hőtani folyamatokat és vizsgáltam a kopási indexet. A szimuláció során nem csak a munkadarab és a szerszám érintkezési feladatát oldottam meg, hanem a környezet hatásait is érintkező testek segítségével vettem figyelembe.

Eredményeim jó összhangban vannak a tapasztalatokkal. Kimutattam a jellegzetes hőmérsékleti maximumot a szerszám homlokfelületén, a megmaradó feszültségeket, a szerszámkopás jellegzetes helyeit.

11. Felhasznált irodalom

- [1] Dudás Illés: Gépgyártástechnológia I. Miskolci Egyetem, 2002 (ISBN 963 661 342 7)
- [2] Dr. Gyáni Károly: A forgácsolás alapjai, nemzeti Tankönyvkiadó, 1993
- [3] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu: The finite element method, its basis and fundamentals, Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Oxford, 2005, ISBN 0-7506-6320-0
- [4] Páczelt I.: A végelem-módszer alapjai. Miskolci Egyetem, 1993.
- [5] Carlos A. Felippa: Introduction to Finite Element Methods, University of Colorado, textbook assembled from lecture notes, 2004.
- [6] Páczelt István, Szabó Tamás, Baksa Attila: A végelem-módszer alapjai, elektronikus jegyzet, <http://www.mech.uni-miskolc.hu/~paczelt/notes/VEM-ME-jegyzet.pdf>
- [7] Marc Volume A, Theory and User Information, MSC Software Inc., 2010.
- [8] Igaz J., Pintér J., Kodácsy J.: Minimálkenés. Gépgyártás XLVII. évf. 2007. 4.sz pp.: 22-31
- [9] Dezső Gergely, Varga Gyula, Szigeti Ferenc, Péter László.: Csigafúró igénybevételeinek vizsgálata kísérleti úton és modellezéssel, GÉP, LX 9-14 (2009/12) ISSN 0016-8572