



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék

Gyors prototípus numerikus és kísérleti szilárdsági analízise

Ph.D. TÉZISFÜZET

Ficzere Péter

okleveles gépészmérnök

Tudományos vezető:

Dr. Borbás Lajos

c. egyetemi tanár

Budapest

2014

1. Bevezetés

1.1. A témaválasztás indoklása, aktualitása

Egy termék életciklusának első fázisai az ötletek, tervek döntő mértékben határozzák meg a későbbi sorsát. [Ming13] Ezért már a megfelelő ötlet, terv kiválasztása is hangsúlyos szerepet kell, hogy kapjon. A gyors prototípusok használatával, több koncepció is rövid idő alatt megvalósítható, segítve azok közül a legjobb kiválasztását. Fontos szempont továbbá, hogy egy újdonsággal mielőbb a piacra léphessünk, ezáltal versenyelőnyt szereztve. Az ötlettől a megvalósulásig eltelt idő ezért minél rövidebb kell, hogy legyen. Sok esetben csak az első darab – a prototípus – legyártása után szembesülünk a darab problémáival, amiket aztán áttervezéssel tudunk csak módosítani [Sass06]. A prototípusok legyártásához a legtöbb esetben még nem állnak rendelkezésre a szerszámok, így az első darab mindig rendkívül drága. Általában csak a prototípus tesztelése után szoktuk kezdeni a gyártástervezést, ami csak a végső, megfelelő prototípus elkészítése után kezdődhet. A tervezés ezen területein jelent nagy újítást a gyors prototípusgyártó eljárás, melynek lényege, hogy a hagyományos lebontó (pl. forgácsoló) eljárások helyett additív módon rétegről rétegre építjük fel a geometriát [Gin13], [Her01]. Ezzel a módszerrel tetszőlegesen bonyolult geometriák gyárthatók szerszámok nélkül. A technológia terjedésének köszönhetően felhasználási területei is egyre bővülnek, így gyakran alkalmazzák pl. orvosi implantátumként [Bibb10], [Win05], [Pet99], [Bus13], [Wan10], vagy, ahol a kis darabszám miatt nem éri meg az alkatrész gyártásához szerszámot tervezni, készíteni. Ilyen esetekben viszont tudnunk kell, hogy az adott alkatrész – nem prototípusként – vajon elbírja-e a későbbi terheléseit. Ehhez általában valamilyen szimulációra van szükségünk. A disszertációmban a megfelelő eredményeket biztosító szimulációhoz szükséges paraméterek meghatározása volt a fő cél.

1.2. Célkitűzések

Disszertációm célja a következő hipotézisek tudományos igényességű vizsgálata. Hipotéziseim:

- Feltételezésem szerint a gyors prototípusgyártó eljárással a termék-előállítás folyamat során jelentős időmegtakarítás realizálható. Ennek, valamint a technológia további előnyeinek (nincs szükség szerszámra) köszönhetően a hagyományos prototípusgyártó eljárásokkal szemben gyártási költségek csökkenése érhető el.
- A gyorsprototípusok geometriai tulajdonságai (méretpontosság, felületi érdesség) nincsenek egységes rendszerben kezelve.
- A gyors prototípusgyártó eljárással készített munkadarabok a fellelhető adatokkal szemben nem izotrop, hanem ortotrop anyagtulajdonságokkal rendelkeznek.
- A nyomtatott rétegeken (egy síkban) belül az anyagtulajdonságok azonosak minden irányban.

- A rétegbevonatos fotoelasztikus vizsgálat és a végeselemes analízis együttes használata alkalmas az anyagtörvények és anyagtulajdonságok validálására.

1.3. A téma körülhatárolása, szűkítése

Az additív gyártástechnológiának sokféle megvalósulási lehetősége van. Az összes eljárás anyagtulajdonságait nem kívántam vizsgálni, mert egy megfelelő mérési módszer alkalmazásával ugyanazon analógiára az összes vizsgálat elvégezhető. Ezért szükséges volt kiválasztani egy eljárást és a továbbiakban annak vizsgálatait elvégezni. A kiválasztásnak sok szempontja lehet, ezért az irodalmi áttekintés ide vonatkozó részének elemzése, valamint a gyártóknál történt személyes konzultációk alapján hoztam meg a döntést.

A kiválasztásnál fontos szempont volt a várható kísérleti eredményeim további felhasználhatósága. A szűkítés első lépése volt, hogy olyan eljárás alkatrészeit vizsgáljam, amely felhasználható funkcionális prototípusként, esetleg kis szériás gyártásban, illetve orvosi alkalmazása is van. Ilyen alkalmazhatósághoz természetesen már megfelelő merevséggel, anyagtulajdonságokkal kell rendelkeznie egy alkatrésznek.

Lényeges volt ezen kívül az is, hogy megfelelő pontossággal lehessen az adott alkatrészeket gyártani.

Az eljárások létjogosultságát sok esetben az ár dönti el, ide tartozik mind a gyártó berendezés bekerülési ára, mind pedig a felhasznált alapanyagok ára, a működtetési és szervizköltségek.

Az egyes eljárások alkatrészeinek felhasználását azok elterjedtsége is befolyásolja. Az elterjedést pedig az áron és a gyártható modellek tulajdonságain túl meghatározza az adott gép kezelhetősége (milyen mértékű szakértelmet igényel), telepíthetősége (helyszükséglet, zajterhelés, stb.) is a korábban említetteken túl.

Ezeket a szempontokat figyelembe véve a gyors prototípusgyártó technológiák közül a legtöbb felhasználási lehetőséget kínáló OBJET technológia anyagának vizsgálatára szorítkoztam. Ezzel az eljárással többféle különböző merevséggel rendelkező alkatrészt lehet készíteni. Gyors, nagy pontosságot biztosító eljárás, tiszta, csendes üzemű berendezéssel, ami akár irodai alkalmazását is lehetővé teszi. [Gurr12] A funkcionális prototípusként való felhasználhatóságot döntő mértékben befolyásolja a merevség. További szűkítésként disszertációm céljaként e technológiák közül is a legnagyobb merevséggel rendelkező FullCure720 fantázia nevű anyagból előállítható anyagokkal foglalkoztam.

Az irodalmi áttekintés során, a gyors prototípusgyártással kapcsolatos tudományos művekből, cikkekből a gyors prototípusgyártás elvét, felhasználási területeit, valamint a legismertebb eljárásokat és az általuk elérhető tulajdonságokat, pontosságot, szilárdságot, vizsgáltam, elemeztem.

A következő lépésben a numerikus szimulációhoz szükséges anyagtulajdonságok meghatározásával és a szükséges anyagvizsgálati módszerek vizsgálatával foglalkoztam.

Ezután az anyagtulajdonságok lehetséges validálási módszereinek elemzését végeztem el, majd ennek eredményeképpen az általam meghatározott anyagjellemzők validálását mutatom be rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat segítségével. Egy

bonyolult geometriával rendelkező alkatrészen, ismert terhelési feltételek mellett megmutatom, hogy a valóságos alkatrészen mért feszültség és nyúlásértékek összevethetők a numerikus számítás eredményeivel. Kifejtem továbbá, hogy a különböző irányokban gyártott alkatrészek azonos igénybevételek hatására hogyan deformálódnak.

Végül összefoglalom új tudományos eredményeimet, valamint az alkalmazási lehetőségeket, illetve utalok a továbbfejlesztés lehetséges irányaira.

Disszertációmban célul tűztem ki a gyors prototípusgyártási eljárásokkal készített alkatrészek numerikus szimulációjához szükséges vizsgálatok és vizsgálati módszerek meghatározását, amelyek segítségével tetszőleges additív gyártástechnológiával készült modellek szimulációja is elvégezhető.

1.4. A feldolgozás módszerei

A rendelkezésemre álló műhely, a BME Járműelemek és Hajtások Tanszéke (mai nevén Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék), valamint témavezetőm, Dr. Borbás Lajos, mind hazai, mind nemzetközi viszonylatban kedvező feltételeket teremtett a kutatási téma kidolgozásához. A disszertációban a célokkal összhangban a klasszikus kutatási módszerek széles választékát használtam fel. Ezek közül kiemelem a gyakorlati tapasztalatok feldolgozására alkalmazott strukturált szöveges elemzéseket, az anyagok viselkedését leíró szilárdsági összefüggéseket, különösen a rétegelt gyártáshoz igen közel álló kompozit anyagok mechanikai modellezésével kapcsolatos irodalmat [Sasson14].

A nemzetközi és a hazai szakirodalom alapján feltártam és értékeltem a gyors prototípusgyártás termékeinek numerikus szimulációjához szükséges információkat. Ezután az ismert anyagvizsgálati módszerek közül hipotéziseim igazolásához szükséges vizsgálatokra koncentráltam. Különös figyelmet fordítottam arra, hogy a mérésekhez általam használt berendezések az iparban is nagy gyakorisággal fellelhetők legyenek [Has12], biztosítva ezáltal a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát. A szakítóvizsgálatokat a BME Biomechanikai Kooperációs Kutatóközpontjának jól felszerelt, akkreditált anyagvizsgáló laboratóriumában végeztem Dr. Borbás Lajos irányításával és Dr. Szabó Gábor segítségével. A mérésekhez szükséges próbatesteket, próbadarabokat a Varinex Zrt. biztosította számomra. Bizonyos paraméterek meghatározásához új vizsgálati módszer kifejlesztésére volt szükség, amelynek megfelelőségét numerikus szimulációval is igazoltam. A mérési eredményekről, módszerekről, azok fejlesztési lehetőségeiről rendszeresen konzultáltam. Az eredményeket folyamatosan publikáltam nemzetközi folyóiratokban és konferenciákon (kísérleti mechanika). A meghatározásra került anyagtulajdonságok validálására alkalmas hibrid (rétegbevonatos feszültségoptika [Koc82], [Franz01] és végeeselemes analízis együttes használata) módszert dolgoztam ki. A szükséges méréseket a BME Járműelemek és Hajtások Tanszék laboratóriumában végeztem. A megfelelő módszer kidolgozásához sok segítséget jelentettek a BME-JHT-en végzett munkák. A numerikus szimulációs lehetőségek megismerése érdekében a szoftverfejlesztőkkel szoros kapcsolatot építettem ki.

2. A kutatási tevékenység összefoglalása – új tudományos eredmények

Munkámban a gyors prototípusgyártással előállított funkcionális termék-modellek mechanikai vizsgálatával foglalkoztam. Megállapítottam a gyártástechnológiák elemzése következtében milyen módon lehet gazdasági előnyökhöz jutni. Vizsgálataim során nehézséget okozott, hogy valószínűleg az eljárás újszerűsége és még kiforratlansága miatt a különböző gyártók adatai csak bizonyos átalakítások után vehetők össze. Hipotézisemmel (ortotrop anyagtulajdonsággal rendelkeznek az additív technológiával gyártó eljárásokkal készült alkatrészek) szemben a gyártók jelenleg nem foglalkoznak megfelelő szinten az anyagtulajdonságok pontos megadásával.

Vizsgálataimmal bebizonyítottam, hogy a gyors prototípusgyártás termékeinek mechanikai tulajdonságai irányfüggőek, azaz a gyártási irány, elrendezés meghatározza a későbbi termék mechanikai viselkedését.

Az ortotrop anyagtulajdonságokkal rendelkező anyagok összes anyagállandójának meghatározásához szükségem volt új mérési eljárások kidolgozására majd azok igazolására.

A meghatározott anyagállandók alapján fontosnak tartottam azok validálását szolgáló vizsgálatokat. Kidolgoztam egy hibrid módszert, mely két ismert vizsgálati eljárás (rétegebevonatos feszültségoptika és numerikus analízis) együttes alkalmazásával használható az anyagtulajdonságok validálására.

Kutatási eredményeimnek köszönhetően az egyedi alkatrészek esetében jelentős súllyal bíró optimalás már megfelelő pontossággal elvégezhető.

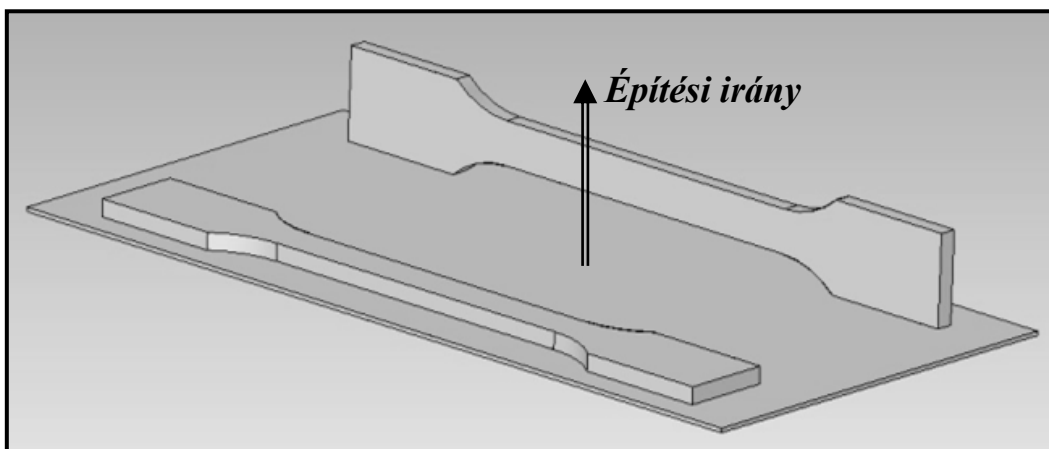
Számos kérdés fogalmazható meg a fentiekkel összefüggésben. Meghatározandó lenne az additív gyártástechnológiával készült modellek, hogy viselik el a dinamikus terheléseket, milyen a kifáradással szembeni viselkedésük. Jelentős részük speciális polimerekből készül, így a műanyagokra jellemző időfüggő kúszási paraméterek is hiányoznak. Vizsgálni kellene az anyagtulajdonságok hőmérséklet függését, valamint foglalkozni lehetne az anyagok öregedési hajlamával is.

2.1. Új tudományos eredmények

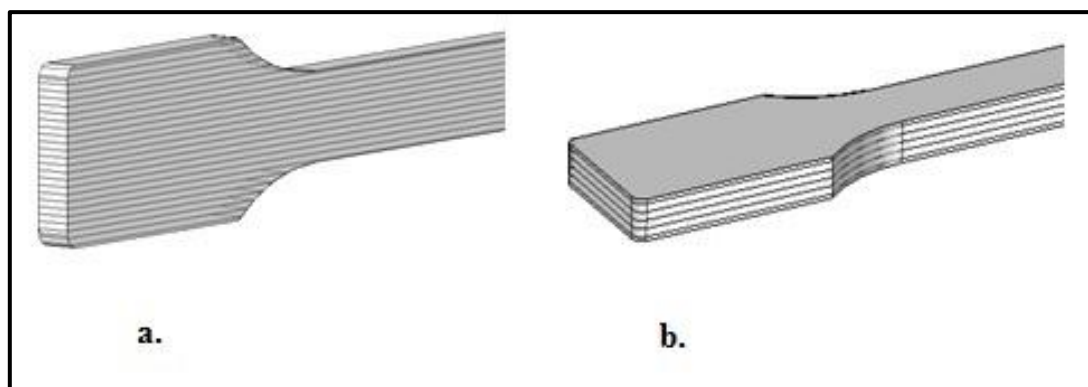
2.1.1. Bebizonyítottam, hogy az OBJET technológiával előállított darabok anyagtulajdonságai a nyomtatás irányától nem függetlenek, tehát ezen eljárás ortotrop anyagtulajdonságokat eredményez.

A gyorsprototípus gyártás során rétegről rétegre készítjük el a munkadarabokat. Ez a rétegenkénti gyártás egy mérnökben felveti a kérdést, vajon az egyes rétegeken belül és a rétegek közt azonosak-e az összetartó erők. Amennyiben nem, akkor az anyagtulajdonságok is eltérőek lesznek a különböző irányokban. Ilyen jellegű problémára utaló jeleket egyetlen gyártónál és forgalmazónál fellelhető anyag adatbázisban sem lehet találni. Ugyanígy a szakirodalomban is csak annyit találunk, hogy ma már az additív gyártástechnológia elvén készített alkatrészek nem maradnak el mechanikai jellemzőik tekintetében hagyományos társaiktól. **[Hat10]** Még az ún. rétegelt darabgyártásnak nevezett (LOM, Laminated Object Manufacturing) eljárás esetében sem, ahol pedig ez nyilvánvalónak tűnik, hiszen kész rétegeket (papír, műanyag, fém) ragasztunk egymásra. Itt ugyanis nem feltételezhető, hogy a ragasztó és pl. egy fém anyagtulajdonságai megegyezzenek. Mivel a legelterjedtebb és legtöbb felhasználási lehetőséget biztosító eljárás az OBJET, ezért a továbbiakban csak ezzel az eljárással foglalkozom, ennek indoklása a téma szűkítésénél megtalálható.

Az OBJET eljárás elve: Az alapanyag fényérzékeny műgyanta (akrilbázisú fotopolimer). A nyomtatófej fotopolimer cseppeket lövell, amit UV fényvel szilárdítanak meg. A technológiából adódóan itt feltételezni lehetett az izotrop anyagtulajdonságokat. Ezt a feltételezést támasztja alá a gyártó által közzétett anyag adatbázis is. Az anyagtulajdonságok meghatározására a legelterjedtebb módszer a szakítóvizsgálat. Első lépésben a szabványos próbatesteket - melyeknek anyaga a fent említett akrilbázisú fotopolimer - két, a hossz tengellyel párhuzamos, de egymásra merőleges építési irányban (*1. ábra*), két különböző rétegvastagsággal (16 és 30 μm) (*2. ábra*) gyártotta le a Varinex Zrt. Célunk annak eldöntése volt, hogy az anyagtulajdonságok valóban megfelelnek-e az izotrop anyagtörvénynek.



1. ábra Próbatestek építése álló és fekvő pozícióban



2. ábra Álló (a) és fekvő (b) helyzetben épített próbatestek rétegződése

A mérési eredmények az 1. táblázatban megtalálhatók. A szakítóvizsgálatok eredményeiből egyértelműen kimutatható, hogy az álló és fekvő elrendezés között szignifikáns eltérés van.

1. táblázat A szakítóvizsgálat eredményei

	Átlagos rugalmassági modulus (MPa)	Átlagos szakító-szilárdság (MPa)	Átlagos szakadási nyúlás (%)
álló 16 μm	2302 \pm 32	57 \pm 0,3	8,4 \pm 0,7
álló 30 μm	2376 \pm 41	60 \pm 0,6	5,8 \pm 0,3
fekvő 16 μm	2095 \pm 74	49 \pm 2,5	11,1 \pm 4,5
fekvő 30 μm	2068 \pm 19	48 \pm 0,8	12,6 \pm 5

Ezzel bebizonyítottam, hogy az OBJET technológiával előállított darabok anyagtulajdonságai nem iránytól függetlenek, tehát ez az eljárás ortotrop anyagtulajdonságokat eredményez.

A témakörben megjelent publikációim: [Ficz09], [Ficz10b], [Ficz11c], [Ficz11b]

2.1.2. Megállapítottam, hogy az OBJET technológiával nyomtatott rétegen belül (egy síkban) az anyagtulajdonságok azonosak minden irányban.

Abban az esetben amennyiben megadható 2, vagy 3 irány (akár a Descartes-féle derékszögű koordináta-rendszerben (kompozitok), akár henger koordináta-rendszerben (pl. élő fa)), amelyekben az anyagtulajdonságok megegyeznek, akkor ortotrop anyagról beszélünk. Az ortotrop anyagmodell tehát egy speciális fajtája az anizotropiának, ahol egyértelműen meghatározható két vagy három fő iránnyal jellemezhetők az anyagjellemzők. [Jon75], [Lov98]

Ilyen esetben alkalmazandó az ortotrop anyagokra érvényes Hooke-törvény:

$$(1) \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

S_{ij} pedig a kiegészítő, vagy komplementer mátrix,

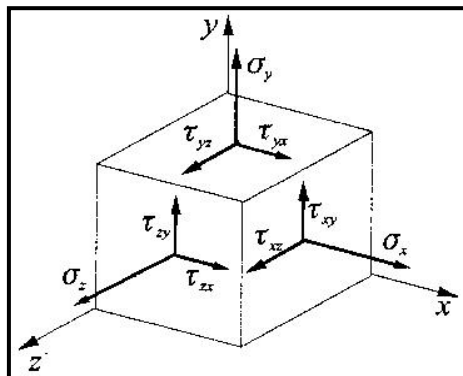
$$(2) \quad [S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

A kiegészítő mátrixban E_1, E_2, E_3 a rugalmassági modulusok
 ν_{ij} a Poisson-tényező: a keresztirányú nyúlások (j -irányban) és a hosszirányú nyúlások (i - irányban) aránya, $i, j=1,2,3$ ($i \neq j$)

G_{ij} a nyíró rugalmassági modulus, ($i, j=1,2,3$) ($i \neq j$)

továbbá a szimmetria következtében: $S_{ij}=S_{ji}$ ($i, j=1,2,3$),

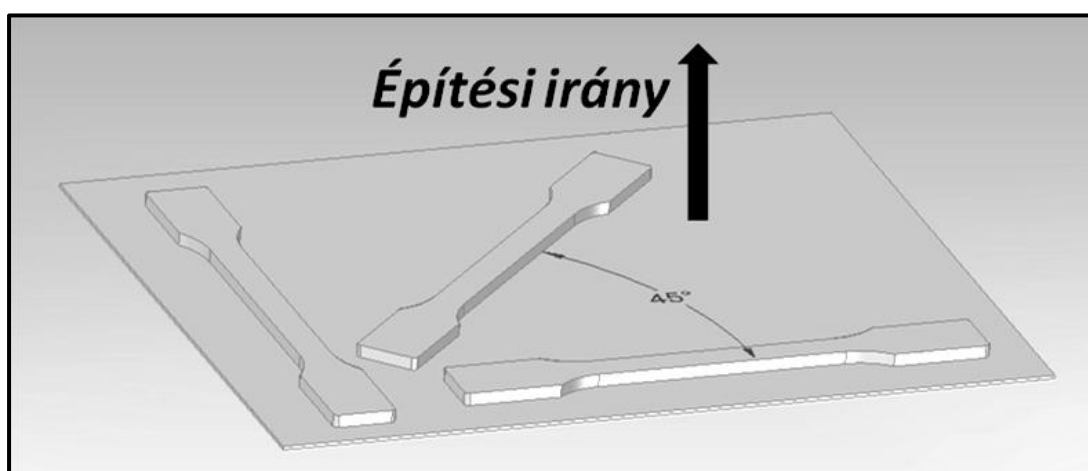
Ezekből az összefüggésekből jól látható, hogy az ortotrop anyagtulajdonságok egzakt definiálásához 9 független anyagállandóra van szükségünk. Ennek további megértését segíti a 3. ábra.



3. ábra Feszültségi irányok [Bha80]

Mivel az előző fejezetben a szakítás iránya mind a két építési irányra merőleges volt, feltételezhető, hogy az anyag egy, a másik két irányra merőleges irányban építve is eltérő eredményt fog adni.

A rétegelt gyártás miatt feltételezhettük, hogy egy rétegen belül (síkban) az anyagtulajdonságok megegyeznek. Ez azt jelentené, hogy egyes anyagállandók kitüntetett irányokban megegyeznek, ezzel pedig a modellt leíró független ismeretlenek száma csökkenthető. Vizsgálatára (2D vagy 3D ortotrop) egymásra merőlegesen, de mindkét esetben fekvő helyzetben gyártattunk le próbatesteket, melyeken azután a vizsgálatokat elvégeztük. Ezen kívül egy harmadik irányt is vizsgáltunk, amikor is a próbatest a gyártás során a hosszában és kersztben elhelyezett irányok között átlósan, azokkal 45°-ot bezárva helyezkedik el (4. ábra). Minden irányban 5-5 próbatestet szakítottunk el.



4. ábra Fekvő próbatestek különböző irányban legyártva

A mérési eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat A szakítóvizsgálat eredményei keresztben és hosszában fekvő helyzetben készített próbatestek esetén

	Rugalmassági modulus keresztben nyomtatva {Mpa}	Rugalmassági modulus hosszában nyomtatva {Mpa}	Rugalmassági modulus átlósan nyomtatva {Mpa}	Eltérés (%)
Átlag	2288±60	2370±25	2250±45	±3%

Az eredmények alapján nem mutatható ki szignifikáns különbség a már korábban ismertetett különböző irányban legyártott próbatestek szakítóvizsgálatai alapján.

Az eredmények átlagértékei közt igen kicsiny, kb. 3%-os eltérés mutatkozik. Ekkora eltérés akár a mérésekből, akár az anyagtulajdonságok szóródásából is adódhat [Ficz11d].

Méréseink alapján megállapíthatjuk, hogy egy nyomtatott rétegen (egy síkban) belül az anyagtulajdonságok azonosak minden irányban.

Ez azt jelenti, hogy a korábban ismertetett ortotrop anyagokra vonatkoztatott Hooke törvényből adódó 9 független anyagállandó közül néhány azonos.

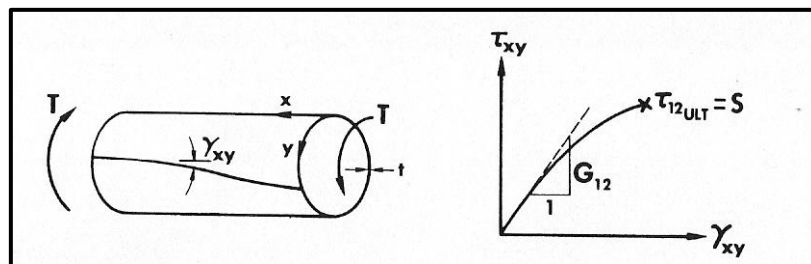
A témakörben megjelent publikációim: [Ficz11c], [Ficz11d]

2.1.3. Új mérési eljárást dolgoztam ki, amely alkalmas a G nyíró rugalmassági modulus meghatározására tiszta húzó igénybevétel alkalmazásával, anélkül, hogy a tiszta csavaró igénybevételt kellene előállítani.

Izotrop esetben az alapvető anyagtulajdonságok (E , ν) 2 független anyagállandóval adhatók meg. Ortotrop esetben viszont a G nyíró rugalmassági modulus már nem számítható a fent említett állandók segítségével. Alapvetően tiszta nyírás, vagy csavarás állapotának előállítása mellett, a következő összefüggés segítségével lehet a G értékét meghatározni:

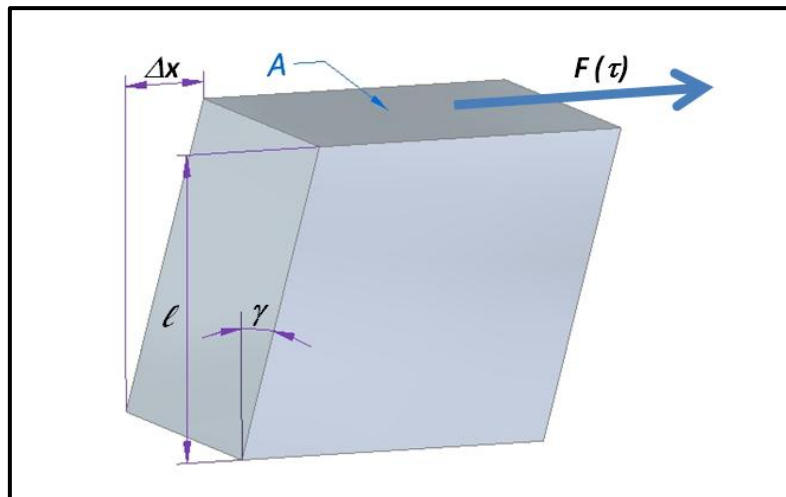
$$(3) \quad \tau = G\gamma$$

Az összefüggés értelmezését segíti a következő, 5. ábra:



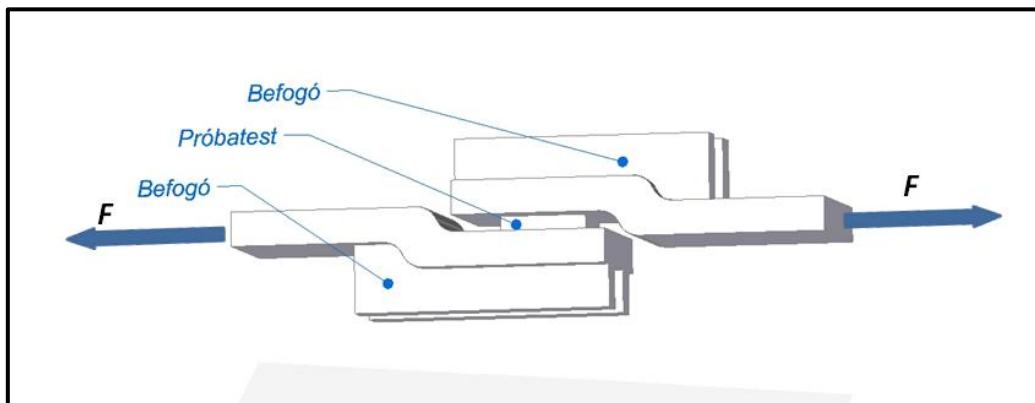
5. ábra Csúsztató rugalmassági modulus értelmezése [Jon75]

Mivel csavaróberendezés nem állt rendelkezésünkre, maradt a nyírt állapottal való meghatározás lehetősége. Elvileg a γ szögtorzulás meghatározható úgy is, ha egy kockának az alsó lapját rögzítjük, ezzel ellentétes oldalát pedig azzal párhuzamosan egy adott τ feszültséget előidéző F erővel terheljük, úgy, hogy biztosítjuk, hogy minden pontja kizárólag a terheléssel párhuzamosan mozdulhat csak el, ahogyan ez a 6. ábrán is látható. [Leg11], [Tóth]



6. ábra Kocka terhelése és alakváltozása tisztán τ feszültségek esetén

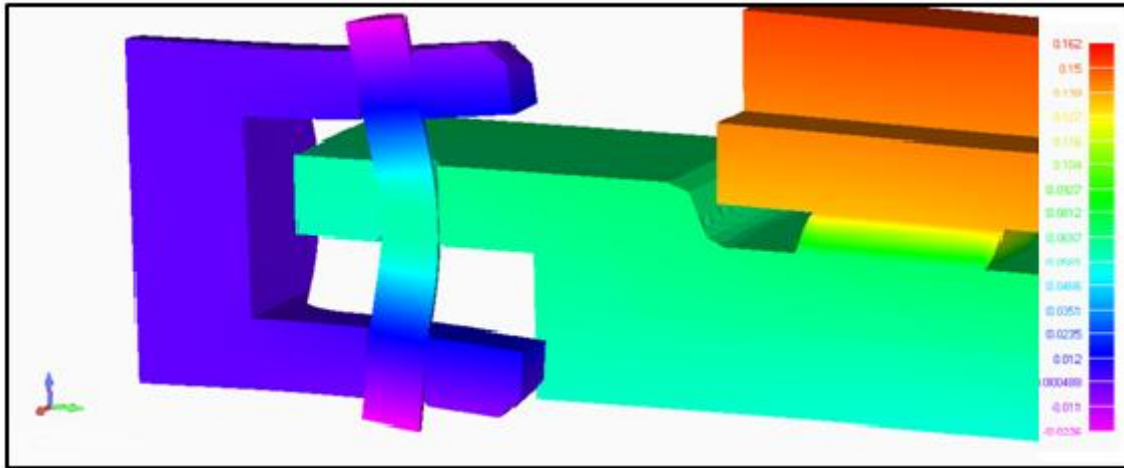
Létezik több ismert és szabványosított síkbeli nyíróvizsgálat is, de ezeket megvizsgálva egyik sem alkalmas a nyíró rugalmassági modulus egzakt meghatározására. Ezért szükségszerűen ki kellett fejleszteni egy módszert, melynek segítségével a G nyíró rugalmassági modulus mérhető. Az eredmény látható a következő ábrán.



7. ábra A mérési elrendezés összeállítása

A próbadarab egy 20x20x4 mm méretű négyzet alapú hasáb a vizsgált anyagból. Ezt kell a 7. ábrán befogó névvel jelölt darabokhoz rögzíteni. A rögzítést egy speciális fémekhez és műanyagokhoz kifejlesztett kétkomponensű ragasztóval oldottuk meg. [Loctite] Ezek a befogók lesznek a szakítógépre befogva.

A vizsgálat elve a 6. ábrán látott állapotot szeretné közelíteni. Bár a tisztán nyírt állapotot ezzel a módszerrel sem lehet megvalósítani, de a mérő elrendezés adott terhelés hatására létrejövő deformációval (karakterisztika), korrigálva a G nyíró rugalmassági modulus mérhetővé válik. Mértékük pontosan meghatározható, így a korrekciós tényezők a mért és az elméleti értékek segítségével számíthatók.



8. ábra Befogók deformációja (A deformációk 40-szeres mértékben felnagyítva a jobb láthatóság érdekében. A színskálán az y-irányú elmozdulások láthatóak, az értékek mm-ben értendők)

$$(4) \quad G = \kappa \frac{Fl}{A(\Delta x_m - \Delta x_{bef})}$$

ahol κ a próbatest alaktényezője [-], F a terhelő erő [N], l a próbatest vastagsága [mm], A a próbatest erővel terhelt felülete [mm²], Δx_m a mért elmozdulás [mm], Δx_{bef} a befogás (befogó+csap+villás befogó) deformációjából származó elmozdulás. Δx_{bef} értéke a terhelés függvényében változik, a befogó elrendezés karakterisztikájából pontosan számítható az adott terhelési esetre.

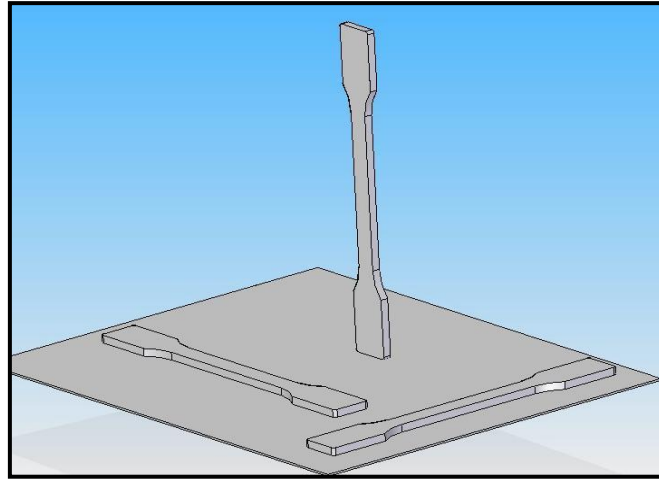
Így a módszerrel a G nyíró rugalmassági modulus univerzális vizsgálóberendezés segítségével meghatározható.

A témakörben megjelent publikációim: [Ficz12d], [Ficz14]

2.1.4. Meghatároztam az OBJET eljárással, FullCure720 alapanyagból készíthető alkatrészekre jellemző statikus, szilárdsági analízishez szükséges anyagtulajdonságokat (E_1 , E_2 , E_3 , ν_{12} , ν_{23} , ν_{13} , G_{12} , G_{23} , G_{13}).

Ahhoz tehát, hogy egy ortotrop anyagtulajdonságokkal rendelkező alkatrész adott igénybevételre adott válaszát számítani tudjuk, a kiegészítő mátrixban (2.1.2. fejezet) szereplő anyagtulajdonságok mindegyikét ismernünk kell.

A rugalmassági modulusokat (E) különböző pozícióban gyártott próbatesteken (9. ábra) végzett szakítóvizsgálattal határoztuk meg. A Poisson-tényezőket (ν) szintén szakítógéppel segítségével nyúlásmérő bélyegek felhelyezésével határoztuk meg.



9. ábra 3 irányban legyártott szakító próbatestek

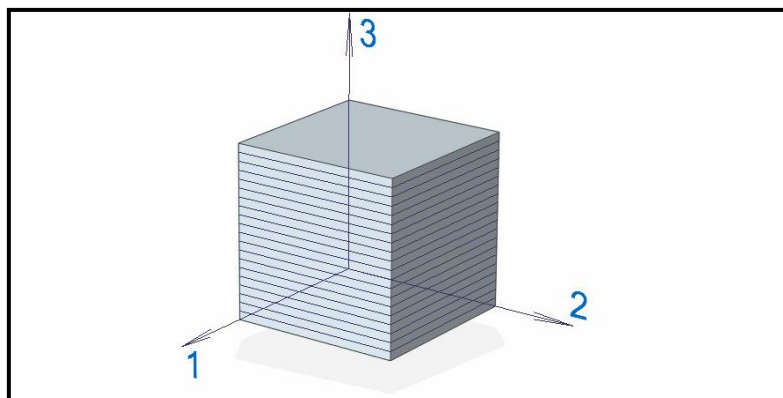
A nyíró rugalmassági modulust (G) saját fejlesztésű síkbeli nyíróvizsgálattal, szakítógéppel, anyagtól, technológiától és alaktól függő korrekciós tényezők használatával határoztuk meg.

A kimért anyagállandók a következőképpen alakultak:

3. táblázat A FullCure720 anyagtulajdonságai

$E_1=2350$ MPa	$\nu_{12}=0,39$	$G_{12}=221$ MPa
$E_2=2350$ MPa	$\nu_{23}=0,4465$	$G_{23}=65$ MPa
$E_3=2000$ MPa	$\nu_{13}=0,4465$	$G_{13}=65$ MPa

Az egyes irányok beazonosíthatók a következő ábrából:



10. ábra Az ortotrop anyagtulajdonságok főirányai

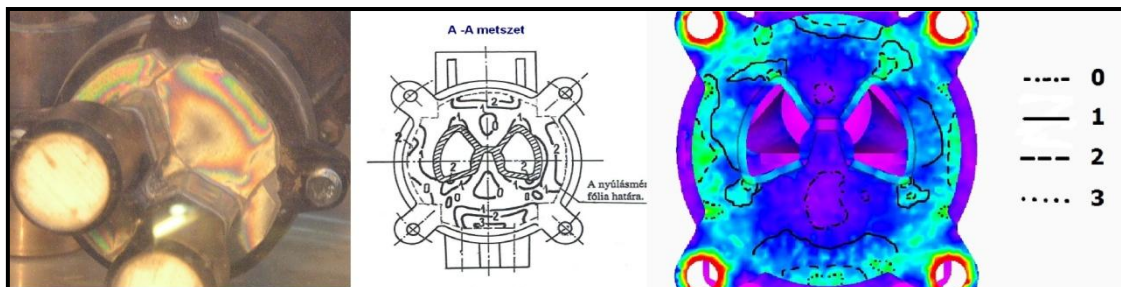
A témakörben megjelent publikációim: [Ficz13c], [Ficz14]

2.1.5. Megállapítottam, hogy a kísérleti mechanika rétegbevonatos feszültségoptikai vizsgálatának és a numerikus analízis végeselemes eljárásának együttes használata alkalmas vizsgálati úton meghatározott, korábban ismeretlen anyagok statikus szilárdsági tulajdonságainak (E, ν , G) validálására.

Az anyagtulajdonságok meghatározása után, de még felhasználásuk előtt, azok valóságosságát is igazolni kell.

Az igazolás mindig valamilyen valós modellkísérlettel kell, hogy történjen, nem elég csak egy-egy irányban megvizsgálni az adott terhelésekre adott választ. Egy kiválasztott, bonyolult geometriával rendelkező modellen végeselemes analízist végeztünk. A terhelést, hogy ne vigyen a rendszerbe modellezési hibát, egzaktul belső nyomásként választottuk. Ilyen terhelési esetben biztosak lehetünk az összetett igénybevétel kialakulásában, tehát minden feszültség összetevő megjelenik.

Ugyanezen geometriát ismert anyagtulajdonságokkal rendelkező anyagból legyártottuk. A darabot rétegbevonatos feszültségoptikai vizsgálatához szükséges bevonattal láttuk el. A méréshez előkészített alaktrészt ezután belső nyomással terheltük, és a terhelés hatására kialakuló színsávabrákat polarizációs szűrőkön keresztül figyeltük meg. A színsávabrákhoz a vizsgálati rétegtől függően feszültségértékeket lehet rendelni. Így az adott belső nyomáshoz tartozó feszültségértékek a numerikus szimuláció eredményeivel összevethetők.



11. ábra A rétegbevonatos feszültségoptika és a numerikus analízis eredménye ($m=1$ esetén $\sigma_1-\sigma_2=8.1\text{MPa}$)

Eredményeinkből kiindulva, ha a két eljárás által kapott feszültségeloszlások mértéke és jellege is összevág, akkor a szimulációhoz felhasznált anyagtulajdonság megfelelőnek tekinthető. Ezen elv szerint, ha egy új, eddig validálatlan anyagtulajdonságokkal rendelkező alkatrészt kell méretezni, akkor azt az új anyagból legyártva feszültségoptikai vizsgálatnak kell alávetni, majd annak eredményeit összevetni a végeselemes szimuláció eredményeivel. Amennyiben jó egyezőséget találunk, akkor az anyagtulajdonságokat validáltnak tekinthetjük.

A témakörben megjelent publikációim: [Ficz12f], [Ficz13c] [Ficz14]

Hivatkozások

A disszertációval kapcsolatos saját publikációk:

- [Ficz09] Ficzere Péter, Borbás Lajos; Gyors-prototípus készítő eljárással gyártott termékek anyagtulajdonságainak meghatározása végelelemes analízis számára. GÉP 60:(10-11) pp. 36-39. (2009)
- [Ficz10b] Ficzere P, Borbás B, The specification of the material properties of products made by rapid prototyping to be used in final element analysis. In: 27th DANUBIA - ADRIA Symposium. Wroclaw, Lengyelország, 2010.09.22-2010.09.25. Wroclaw: pp. 51-52.
- [Ficz11b] Péter FICZERE; Lajos BORBÁS; Ádám TÖRÖK: Resource analysis of rapid prototyping, Production Improvement, Trnava: Tripsoft, pp. 160-172. (ISBN:978-80-89291-45-8) (2011)
- [Ficz11c] Ficzere Péter Gyors prototípus termékek tulajdonságainak meghatározása numerikus vizsgálatokhoz. 21 p. 60 éves a Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Rohács József (szerk.), CD kiadvány, ISBN 978-963-313-040-7 (2011)
- [Ficz11d] Péter Ficzere, Lajos Borbás, THEORETICAL AND PRACTICAL ANALYSIS OF MATERIAL LAW SIMPLIFICATION POSSIBILITIES. In: Borbás Lajos (szerk.), 28th Danubia - Adria - Symposium on Advances in Experimental Mechanics. Siófok, Magyarország, 2011.09.28-2011.10.01. pp. 235-236. ISBN: 978-963-9058-32-3
- [Ficz12d] Ficzere Péter, Borbás Lajos, Török Ádám, Műanyag közüti gépjárműelemek anyagmodelljének definiálása és validálása végelelemes módszerrel. A JÖVŐ JÁRMŰVE 6:(3) pp. 16-19. (2012)
- [Ficz12f] Ficzere P, Borbás L, VALIDATION OF NUMARICAL ANALYSIS RESULTS IN CASE OF RAPID PROTOTYPING BY EXPERIMENTS USING OPTICAL TECHNIQUES. In: 29th Danubia-Adria Symposium on advances in experimental mechanics. Beograd, Szerbia, 2012.09.26-2012.09.28. Beograd: pp. 68-69. ISBN: 978-86-7083-762-1
- [Ficz13c] Peter Ficzere, Lajos Borbas, Rapid prototyping products material law validation by optical photoelastic coating method. In: Ivo Alfredic, Damir Semerski (szerk.), 30th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics. Primosten Horvátország, 2013.09.25-2013.09.28. pp. 51-52.
- [Ficz14] Peter FICZERE, Lajos BORBAS, Adam TOROK, Validation of numerically simulated rapid-prototype model by photoelastic coating, Acta Mechanica Slovaca, 2014. (megjelenés alatt)

Felhasznált irodalom:

- [Bibb10] A review of the issues surrounding three-dimensional computed tomography for medical modelling using rapid prototyping techniques, Radiography, Volume 16, Issue 1, February 2010, Pages 78-83, Richard Bibb, John Winder
- [Bus13] Novel Application of Rapid Prototyping for Simulation of Bronchoscopic Anatomy Review Article, Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia, In Press, Corrected Proof, Available online 13 December 2013, Sergio Bustamante, Somnath Bose, Paul Bishop, Ryan Klatter, Frederick Norris
- [Franz01] Photoelastic study of the mechanic behaviour of orthotropic composite plates subjected to impact Original Research Article Composite Structures, Volume 54, Issues 2-3, November-December 2001, Pages 169-178, T. Franz
- [Gin13] An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing Original Research Article, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 29, Issue 1, February 2013, Pages 23-38, G.Q. Jin, W.D. Li, L. Gao
- [Gurr12] 8.04 - Rapid Prototyping, Polymer Science: A Comprehensive

- [Has12] Reference, Volume 8, 2012, Pages 77-99, M. Gurr, R. Mülhaupt
Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) Original Research Article Construction and Building Materials, Volume 37, December 2012, Pages 874-882, A.M.T. Hassan, S.W. Jones, G.H. Mahmud
- [Hat10] Hatos I, Zsoldos I: Fémporok lézeres szinterézése, A jövő járműve ¾:19-24, 2010.
- [Her01] Takács J., Herczeg Sz.: Gyors prototípusgyártás növekvő versenyképesség, Gépgyártás XLI. évf. 7-8. szám, 2001. július augusztus, pp. 11-18, ISSN 1587-4648
- [Jon75] Robert M. Jones Mechanics of Composite Materials, SCRIPTA BOOK COMPANY, Washington, D.C., 1975, ISBN 0-07-032790-4
- [Koc82] The use of photoelastic foils for stress and strain investigation of concrete beams Original Research Article Cement and Concrete Research, Volume 12, Issue 4, July 1982, Pages 497-510, Vlademir Kocian, Vladimir Weiss
- [Leg11] Mechanika II. SZILÁRDSÁGTAN, Dr. Legeza László - Dr. Goda Tibor, Gépszerkezettani és Biztonságtechnikai Intézet, 2011.
- [Loctite] <http://tds.loctite.com/tds5/docs/9466-EN.PDF>
- [Lov98] Analysis of contact between transversely isotropic coated surfaces: development of stress and displacement relationships using FEM, Wear 214 (1998) 165-174, Michael Lovell
- [Ming13] Ming C. Leu, Hoda A. ElMaraghy, Andrew Y.C. Nee, Soh Khim Ong, Michele Lanzetta, Matthias Putz, Wenjuan Zhu, Alain Bernard, CAD model based virtual assembly simulation, planning and training, CIRP Annals - Manufacturing Technology 62 (2013) 799–822
- [Pet99] Rapid prototyping technology in medicine—basics and applications Original Research Article, Computerized Medical Imaging and Graphics, Volume 23, Issue 5, October 1999, Pages 277-284 R. Petzold, H.-F. Zeilhofer, W.A. Kalender
- [Sass06] Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design, Design Studies, Volume 27, Issue 3, May 2006, Pages 325-355 Larry Sass, Rivka Oxman
- [Sasson14] Experimental determination of linear and nonlinear mechanical properties of laminated soft composite material system Original Research Article, Composites Part B: Engineering, Volume 57, February 2014, Pages 96-104, Aviad Levi-Sasson, Ido meshi, Shaul Mustacchi, Iris Amarilio, Dana Benes, Vadim Favorsky, Rami Eliasy, Jacob Aboudi, Rami Haj-Ali
- [Tóth] Rugalmas alakváltozás (kibővített óravázlat), Szilárd testek alakváltozása, TÓTH ANDRÁS
http://goliat.eik.bme.hu/~tothaf/Tananyagok/Letoltesek/rugtest_BSc.pdf
- [Wan10] STL rapid prototyping bio-CAD model for CT medical image segmentation Original Research Article Computers in Industry, Volume 61, Issue 3, April 2010, Pages 187-197, Chung-Shing Wang, Wei-Hua A. Wang, Man-Ching Lin
- [Win05] Medical Rapid Prototyping Technologies: State of the Art and Current Limitations for Application in Oral and Maxillofacial Surgery, Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Volume 63, Issue 7, July 2005, Pages 1006-1015, John Winder, Richard Bibb