



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

POLIMER KOMPOZIT HÉJ- ÉS SZENDVICSSZERKEZETEK
KÖLTSÉGHATÉKONY RÉSZEKRE BONTÁSA ÉS MODELLEZÉSE A
TERVEZÉS KONCEPCIÓFÁZISÁBAN

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZET

KÉSZÍTETTE:

TAKÁCS LÁSZLÓ

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

Témavezető:

Dr. Szabó Ferenc

Adjunktus

BUDAPEST, 2025

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki
Karának Dékáni Hivatalában megtekinthető

1. A téma ismertetése

A járműipar jövője számos kihívással néz szembe a károsanyag kibocsátásra, az energiafelhasználásra és az alkatrészek újrahasznosíthatóságára vonatkozó egyre szigorúbb előírások, valamint a költséghatékonyság fenntartásának szükségessége miatt. A tömegcsökkentés a fő hajtóerő, amely az alkatrészek innovatív tervezésén és a megfelelő anyag kiválasztáson keresztül nagy hatással lehet e célok elérésére, mivel a gépjármű életciklusában az energia-felhasználás mintegy 85%-a az üzemeltetési szakaszban történik. Az elektromos és hibrid járműveknél a tömegcsökkentésnek egy másik fontos hatása, hogy növeli a hatótávolságot a kényeszerű megállások között vagy, hogy belsőégésű üzemmódra kellene váltani. Ezek mellett a járműveknek egyre szigorúbb biztonsági előírásoknak és ütközésállósági feltételeknek is eleget kell tenniük, valamint kielégíteni az ügyfelek igényeit, a megfizethető árat és kényelmi funkciókat (esztétika, ergonómia, zaj, rezgések) illetően. A célok teljesítése komoly kihívást jelent és nem megy kompromisszumok nélkül. A tömegcsökkentés megközelítései a következőkre oszthatók: a) járműalkatrészek optimalizált szerkezeti felépítése és topológiája, b) fejlett könnyűszerkezetű kompozitanyagok beépítése. A polimer kompozit anyagok kis sűrűségük, de nagy merevségüknek és szilárdságuknak köszönhetően egyre növekvő mennyiségben vannak jelen járműipari alkalmazásokban a repülőgépiparon kívül is. A repülőgépipar ugyan több évtizedes előnyt élvez szálerősített polimerek tervezési módszereinek tekintetében, de ezeknek a módszereknek az alkalmazása az járműiparban problémás lehet a jelentősen eltérő termelési volumen, az alkalmazott technológia és a fejlesztési idő miatt. A repülőgépiparban az átmenetet a fémes anyagoktól a szálerősített polimerekig megkönnyítette az alacsonyabb termelési mennyiség, és az a piaci környezet, amely a könnyűszerkezetű megoldásokat részesíti előnyben az üzemanyagköltségek és a szállítható hasznosteher miatt. A járműipar a ciklusidő, az ismételhetőség és az anyag-költségek magas szintje miatt sokáig vonakodott felhasználni ezeket az anyagokat, jóllehet kiemelkedő előnyöket, tervezési szabadságot és alkatrész integrációs potenciált mutatnak.

Vizsgálva a járművázfejlesztés tervezési láncolatát kijelenthető, hogy a koncepció fázis jelenti az első és legfontosabb szakaszt az alapanyagokat és gyártási folyamatokat illetően. A koncepció fázis peremfeltételeket szab a későbbi tervezési szakaszoknak és behatárolja a későbbi döntési lehetőségeket. Általánosságban a késztermék árának kb. 80%-a korai koncepció-fázisban dől el és ugyanez igaz a szerkezet tömegére is. A koncepciófázisban a következő kérdések merülnek fel a tömeg- és költségoptimalizált szerkezet kialakításának érdekében: Milyen gyártási eljárást alkalmazzunk? Legyen-e cél a minél inkább homogenizált anyagfelhasználás, vagy legyen a szerkezetben magasfokú anyagi sokféleség? Hol van az optimum az integráló – minél nagyobb, komplexebb alkatrészek – és a differenciáló – alkatrészekre bontott – tervezési stratégia között? Ilyen fontos kérdéseket megválaszolni a korai koncepció fázisban limitált tapasztalattal a nagyvolumenű kompozitgyártás területén növeli a kockázatot a szerkezet tömegét és költségét illetően. Ezért nagy igény van az olyan tervezési módszerekre, amelyek segítenek anyagféléseget,

gyártási eljárást választani vagy éppen útmutatást adnak az optimális alkatrésze-bontás tekintetében.

A kezelhető részegységekre bontás mindig is a mérnöki tervezés egyik alapvető koncepciója volt, azonban a kompozit szerkezetek megjelenése az autóiiparban előtérbe helyezte ezt, a nagysorozatú gyártás és az autóiipar költségérzékenysége miatt. Az utóbbi néhány évben születtek olyan publikációk, melyekben kimutatták, hogy a kompozit szerkezet felosztása előnyös lehet az összköltség tekintetében, mivel a nagyvolumenű kompozitgyártás fő költségeleme az alapanyag költsége. A költséghatékonyság kulcsa a jobb anyagfelhasználás elérése a szerkezet darabolásával és így az anyagfelesleg, a kivágásokból adódó maradékanyag csökkentése. Kimutatták, hogy a magasfokú költségérzékenység és a szálerősített polimer kompozitok kiemelkedő tömegcsökkentési potenciálja miatt kis többlet az össztömegben a darabolások miatt elfogadható, amennyiben az az összköltség szempontjából előnyös.

Azonban, ha kötéseket teszünk a szerkezetbe, azok befolyásolják a mechanikai viselkedést is. Járműipari polimer kompozitok esetében a legelterjedtebb kötési mód a ragasztás. Dolgozatomban gyantainjektálás technológiával gyártott ragasztott kötéseket tartalmazó kompozit szerkezeteket vizsgálók.

A kutatás célja egy összetett geometriájú kompozit héjszerkezet gyártási költség minimumát kereső tervezési módszer fejlesztése, valamint a kompozit héjazat és ragasztott kötéseinek koncepciófázisban történő megbízható modellezésére vonatkozó módszerfejlesztés, a különböző részekre bontási tervek hatékony elemzéséhez. Ennek része a kompozit héjgeometria összetettségét, komplexitását jellemző mértékek meghatározása és ezek alkalmazása. A tervezési módszer fejlesztésével célom, hogy olyan, a gyakorlatban használható segítséget adjak vázszerkezet tervezéssel foglalkozó szakembereknek, amivel megkönnyíthető a ragasztási vonalak pozíciójának meghatározása a szerkezetben. Ilyen alkalmazás jelenleg nem létezik, de hatékony eszköz lenne a tervezőmérnökök kezében, különösen akkor, amikor a belsőégésű motoros hajtásról az elektromos, vagy más alternatív üzemanyagú hajtásra történő átállás miatt új járműarchitektúrára van szükség.

2. Szakirodalom áttekintése és célkitűzés

A kompozit anyagok tömeggyártásban történő alkalmazásának fő problémája a magasabb gyártási költségek a hagyományos fémszerkezetekhez képest, ezért az anyagtudományi innovációk mellett más megközelítések is vannak a termék gyártási költségeinek optimalizálására.

A szakirodalomban jellemzően az alulról felfelé építkező költségbecslési megközelítést alkalmazva kimutatták, hogy a nagyobb és összetettebb kompozit alkatrészek gyártása költséghatékonyabbá válhat, ha több részre osztják őket, majd az egyes részeket egy alkalmas kötési móddal, pl.: ragasztás, összekötik. Kimutatták, hogy a ragasztási költség, csak kisebb mértékben befolyásolja a teljes gyártási költséget, és az alkatrész felosztása

csökkentheti a gyártandó részek geometriai komplexitását, és ezáltal csökkentheti a selejt mennyiségét és a szerszámköltséget. A szerszámköltséget egy geometriai komplexitási tényezővel arányosították. Ezt a módszert később a részekre bontás és az anyagválasztás kombinálásával fejlesztették. Emellett egy elemzési módszert is bemutatnak egy héjszerkezet részekre bontásának vizsgálatára a költségek és a mechanikai teljesítmény szempontjából. Ezek a módszerek a gyártási irány előzetes ismeretében számítják ki az alkatrészek komplexitását, mivel a részekre bontást manuálisan kell elvégezni. Ennek automatizálásához egy optimalizálási keretrendszerben egy tetszőleges héjszerkezet optimális gyártási irányát is automatikusan szükséges meghatározni.

Céлом egy olyan módszer kidolgozása, amely képes automatikusan meghatározni egy kompozit héjszerkezet optimális gyártási irányát. Ez lehetővé teszi egy tetszőleges héjszerkezet komplexitási tényezőjének automatikus kiszámítását, ami további lépést jelent egy olyan módszer felé, amelynek célja a költséghatékony részekre bontás.

A szakirodalomban egy kompozit szerkezet részekre bontásának hatását is vizsgálták a szerkezet mechanikai teljesítményére és a gyártási költségekre. Különböző részekre bontási koncepciók elemzéséről léteznek publikációk, de ezeket a koncepciókat mérnöki megfontolások mentén, manuálisan alkották.

A szakirodalomban nem találtam kompozit héjgeometria részekre bontására vonatkozó optimalizációs módszert, ezért céлом egy olyan módszer fejlesztése, ami általánosítva, tetszőleges héjgeometriára működőképes és keresi a héjgeometria költséghatékony részekre bontását.

Polimer kompozit járművázszerkezetek mechanikai modellezését illetően az irodalom áttekintése azt mutatja, hogy kiterjedt tanulmányok állnak rendelkezésre analitikai modellekkel és szimulációs módszerekkel a szendvicsszerkezetek és a ragasztott kötések mechanikai viselkedésének megértésére. Az analitikai módszerek gyakran csak gerenda- vagy lemezgeometriákkal, idealizált peremfeltételekkel működnek. Ugyanakkor a végeleemes modellek viszont túl részletesek és csak próbatest léptékben használhatók hatékonyan. Az elmúlt években a termékfejlesztés célja a virtualizáció maximalizálása, így a prototípusgyártás minimalizálása, ezáltal csökkentve a tervezési költségeket. Ez azt jelzi, hogy szükség van egy olyan modellezési módszer kidolgozására a szendvicspanelekre és azok ragasztott kötéseire, amely segíti a tervezési folyamatot a koncepciófázisban olyan módon, hogy a szerkezet teljesjármű léptékben modellezhető, de megbízható eredményeket ad.

Céлом egy új hatékony modellezési módszert fejleszteni, amely teljes járműléptékben alkalmazható heterogén, gyantafalakat tartalmazó szendvicsanyagok esetén is, továbbá szendvicsanyagok ragasztott kötéseinek deformációs viselkedésének elemzésére is. Ezzel az új módszerrel gyorsan és egyszerűen, megfelelő pontossággal tesztelhetünk különböző részekre bontási koncepciókat és kötésgeometriákat, így egy hatékony eszköz lehet a szimulációvezérelt termékfejlesztésben.

3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések

Ebben a fejezetben bemutatom az általam felhasznált anyagokat és az alkalmazott vizsgálati módszereket. A különböző próbatesteken elvégzett mérések eredményei a későbbiekben a numerikus számításokhoz adnak bemenő adatokat, illetve a számítási modellek validálására szolgálnak.

3.1 Felhasznált alapanyagok

Szendvicsszerkezet kompozit borítólemezei

- QE-1232 quadriaxiális üvegszál kelme, felületi tömeg 1232 g/m^2 (Saertex GmbH),
- Distitron VE220, viszkozitás szobahőmérsékleten 270-380 mPas (Polynt Group S.p.A.),
- Rétegfelépítés: $3 \times [-45/90/45/0]$,
- Rétegvastagság: 2,5 mm.

Szendvicsszerkezet maganyaga

- Airex T90.100 irdalt, zártcellás PET hab (3A Composites Core Materials – Airex AG),
- Maganyag vastagsága: 25 mm,
- Szendvicsszerkezet vastagsága: 30 mm.

Gyártástechnológia

- vákuuminfúzió,
- vákuumnyomás: 0,8 bar.

Ragasztott kötések ragasztóanyaga

- AcraLock SA 10-100A kétkomponensű ragasztó, fazékidő 70 perc (Engineered Bonding Solutions LLC)

3.2 Vizsgálati módszerek

Az alábbiakban ismertetem a kísérletek során alkalmazott vizsgálati módszereket, az alkalmazott berendezéseket és a fontosabb gépbeállítási paramétereket. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten ($22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) és $46 \pm 2\%$ relatív légnedvesség mellett végeztem el. A mérések a BME Polimertechnika Tanszék laborjában lévő Zwick Z020 univerzális anyagvizsgáló gépen készültek, amelynek maximális terhelhetősége 20 kN.

Kompozitlemez szakítóvizsgálata

A kompozitlemez rétegeinek síkbeli húzórugalmassági modulusait és Poisson-tényezőjét elmozdulásvezérelt húzóvizsgálattal határoztam meg. Az erő és a keresztfej elmozdulás rögzítése mellett a próbatest nyúlását is mértem két egytengelyű nyúlásmérő bélyeggel a próbatest egyik felületén a mérőhosszon belül elhelyezve egymás felett. A vizsgálati sebesség 2 mm/perc volt. A mérés tönkremenetelig zajlott. A próbatest típus az ISO 527 - 4 szabványban bemutatott Type 2 típusú, végfülek nélküli próbatest, mérete 250x25 mm.

Ragasztóanyag és vinilészter gyanta szakítóvizsgálata

A későbbi számításokhoz szükséges a vinilészter és a metakrilát ragasztó rugalmassági modulusa és húzószilárdsága is, ezeket is szakítóvizsgálattal határoztam meg. Ezen anyagokra vonatkozóan a próbatest típusa az ISO 527 - 2 szabványban előírt 5A jelű típus. A próbatest vastagsága 2 mm. A vizsgálati sebesség 1 mm/perc volt.

Kompozitlemez nyíróvizsgálata

A kompozitlemez rétegeinek síkbeli nyírórugalmassági modulusát V-bemetszésű próbatest nyíróvizsgálatával, ún. Iosipescu-tesztel határoztam meg. A mérést az ASTM - D5379 szabvány szerint végeztem, a vizsgálati sebesség 2 mm/perc volt. A mérés tönkremenetelig zajlott.

Szendvicsszerkezet hajlítóvizsgálata

A szendvicsszerkezet merevségének meghatározásához négyponos hajlítóvizsgálatot végeztem az ASTM - D7249 szabvány ajánlásai szerint, a vizsgálati sebesség 6 mm/perc volt. A mérés tönkremenetelig zajlott. A próbatest hossza 660 mm, szélessége 60 mm, a hajlítás külső támaszköze 500 mm, a négyponos hajlítás esetén a belső támaszköz 166 mm.

A szendvicspanel tönkremenetelének vizsgálatához háromponos hajlítóvizsgálatot is végeztem. A mérés az ASTM – C393 szabvány ajánlásai szerint történt. A próbatest méretei, a külső támaszköz és a vizsgálati sebesség is megegyezik a négyponos hajlítás esetével.

4. A kutatási munka összegzése

Ebben a fejezetben bemutatom a kísérleti vizsgálatokkal és végeeselemes szimulációkkal végzett kutatómunkám eredményeit.

4.1 Kompozit alkatrész optimális gyártási irányának meghatározása

A gyártástechnológia szempontjából releváns geometriai jellemzők meghatározásához egy alkalmazást fejlesztettem Python környezetben, amelynek bemenete egy végeeselemes hálóval ellátott héjgeometria.

Olyan kompozit héjszerkezetek gyártási irányát keresem, amelyek hagyományos, tehát mozgóbetét nélküli szerszámmal egy lépésben gyárthatóak. A mozgóbetét nélküli szerszámmal egy lépésben gyártható alkatrész azt jelenti, hogy mindenképpen létezik olyan iránya, amely irányból nézve a héjgeometria alámetszésmentes. Az ilyen alkatrészek kézi laminálás, vákuuminfúzió, gyantainjektálás (RTM) vagy akár lágy szerszámmal végzett gyantainjektálás (Light-RTM) technológiákkal is gyárthatók. Természetesen a különböző gyártástechnológiák esetén a gyártási költségfüggvény paraméterei, illetve a ciklusidő is

különbözőek, azonban a geometria jellemzése és az optimális irány meghatározása azonos módon történik.

A kompozit szerkezetek vizsgálata során a C_c komplexitási tényezőt alkalmaztam fő mérőszámként, amely számszerűsíti a geometria síklemeztől való eltérését, amely az alkatrész teljes felületi területének és egy adott síkra vetített területének hányadosa.

Esetemben az alkatrész teljes felületi területe (A_c), a geometriai modellt alkotó egyes háromszögelemek területének összege; a nevezőben pedig (A_p) a geometria gyártási irányában vett merőleges vetületének területe ("árnyék"). A definícióból világosan látszik, hogy $C_c \geq 1$, egyenlőség pedig $A_c = A_p$ esetén adódik, amely egy teljesen sík alkatrészt jelent. Minél kisebb C_c értéke, annál kevésbé tér el egy síklaptól az alkatrész alakja, és annál kevésbé lesz komplex és költséges a gyártáshoz szükséges szerszám és kevesebb a gyártási hulladék. A módszer a komplexitási tényező értékét a lehetséges 3D-s irányok függvényében egy gömbi koordináta-rendszerben ábrázolja tetszőleges héjgeometriára az általam kidolgozott ágdiagrammban.

A hagyományos tervezési folyamat során a gyártási irányt a szakértő technológus jelöli ki. Ha automatikusan szeretnénk számszerűsíteni egy alkatrész komplexitását a komponensekre bontás folyamatában, elengedhetetlen ezen irány automatizált meghatározása. Ehhez vezettem be egy alámetszettséget jellemző mérőszámot, amelyet U_s -sel jelöltem. A módszer alapja, hogy a tér különböző irányából vetítősugarakat vetítek a vizsgált héjgeometriára, majd számolom, hogy a vetítősugarak hányszor metszik át a felületmodellt. A módszer lekezezi az olyan elfajzott eseteket is, amikor egy adott vetítési irányból látszik a felületmodell külső- és belső felülete. A C_c értékhez hasonlóan tetszőleges geometriára $U_s \geq 1$.

A gyártási irány megválasztásának módja az eddig meghatározott mérőszámok minimumához tartozó irány kiválasztása. Megvizsgáltam, hogy a $C_c \cdot U_s$ szorzat minimalizálása milyen eredményeket ad különböző geometriák esetén és arra jutottam, hogy ez a mérőszám általánosítható módon a mérnöki megfontolásoknak megfelelő helyes irányt adja.

Esettanulmányt végeztem egy ülés kompozit héjazatán. Ez egy üvegszál erősítésű, telítetlen poliészter gyanta (UP gyanta) mátrixú kompozit, amelyet RTM (Resin Transfer Molding) technológiával gyártanak.

A héjat egyetlen alkatrészként is kiértékeltem, és két különböző részekre bontott változattal is. A C_c értékeket minden alkatrészre az eredeti héj optimális irányából és maguknak a kisebb alkatrészeknek az optimális irányából is számítottam. a gyártási költségek becslésére az alulról felfelé építkező költségbecslést alkalmaztam az alapanyagköltségre és a szerszámköltségre. A költségmodellben az alapanyagköltség függ a geometriai komplexitástól, mert az hatással van a gyártási hulladék mennyiségére, a szerszámköltség pedig a szerszám térfogatától függ, amit meghatároz az alkatrész gyártási irányú síkra vetített felülete és az abban az irányban értelmezett magasságának szorzata.

Az eredmények azt mutatják, hogy a héjgeometria felosztása kisebb bonyolultságú részeket eredményez, ami kisebb anyagköltségeket jelent, továbbá az egyes részek optimális gyártási irányából szintén kisebb anyagköltséget kapunk, mint az egy alkatrészként kezelt ülés saját gyártási irányából. A szerszámköltségeket vizsgálva pedig azt kaptam, hogy létezik olyan részekre bontás, amelyben az egyes részek szerszámköltségeinek összege kisebb, mint az egy alkatrészként kezelt ülés szerszámköltsége.

4.2 Kompozit járművázszerkezet optimális részekre bontása

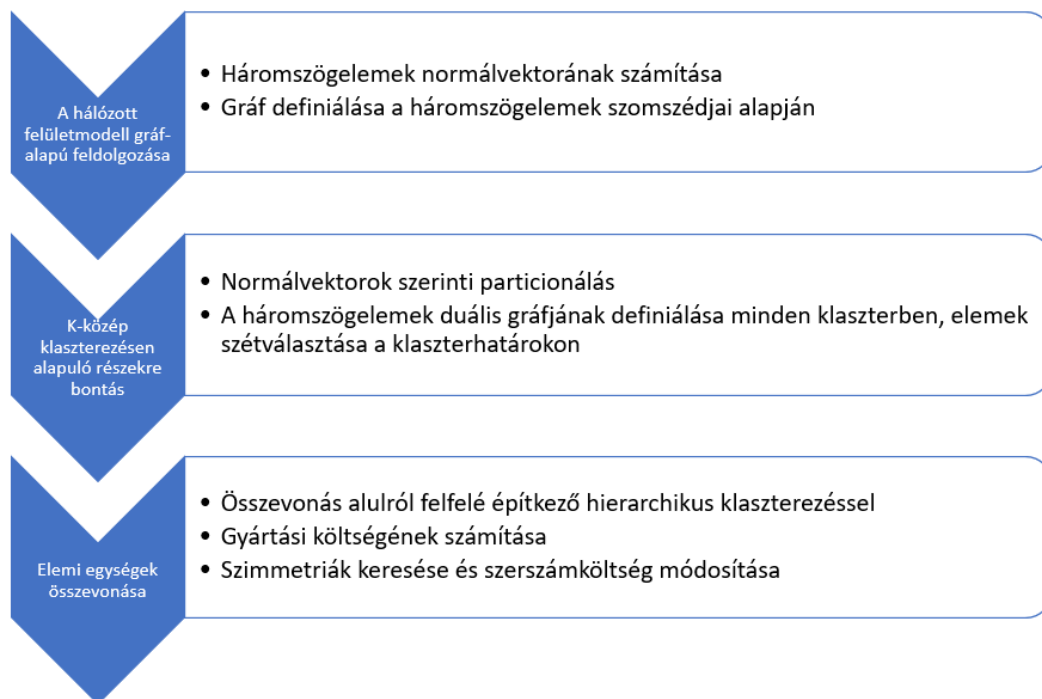
Mivel a nagyméretű, komplex geometriájú héjszerkezetek részekre osztása előnyös lehet a gyártási költségeket tekintve, módszert fejlesztettem a költséghatékony részekre bontás meghatározására.

A héjszerkezetek elemzése elemi komponenseiken keresztül lehetséges. A hatékony kombinációk megtalálásához először a héjazatot részekre kell osztani. A részekre bontás kezelésére alkalmas algoritmus a K-közép klaszterező algoritmus. Az elemi részekre osztás után, ezek kombinálhatók egy következő lépésben, így gyártásra alkalmas alkatrészeket kapunk. Munkámban hierarchikus, alulról felfelé építkező klaszterezést alkalmaztam, amely különböző korlátozó feltételeket vesz figyelembe úgy mint, gyárthatóság, méret, gyártási költség. A héjszerkezet 3D-s geometriájának jellemzésére egy háromszögelemekkel hálózott héjgeometriát vizsgállok.

Az 1. ábra a módszer lépéseit szemlélteti. Először a hálót definiálom, majd gráf-alapú ábrázolássá alakítom. Ebben a lépésben kiszámítom a háromszögelemek normálvektorait. A geometriát a háromszögelemek normálvektora alapján K-közép klaszterezéssel szegmentálom, a klaszterezésben a normálvektorok hasonlóságának mértéke koszinusztávolság. A kapott klaszterelemekből összefüggő geometriai komponenseket alkotok. A komponenseket elemi részekre bontom, majd egy alulról felfelé építkező hierarchikus klaszterező algoritmussal egyesítem a komponenseket, ha az egyesítés kisebb gyártási költségeket eredményez. Az algoritmus figyelembe veszi a különféle költségfüggvényeket és azok korlátait is. Ezenkívül hasonlósági elemzést végzek annak meghatározására, hogy mely alkatrészek gyárthatók ugyanazzal a szerszámmal. A hasonlósági elemzés az ICP (Iterative Closest Point) algoritmus alkalmazásával történik.

A módszert egy kompozit autóbusz vázszerkezeten mutatom be az RTM gyártástechnológia költségfüggvényét alkalmazva. Az alkalmazott költségmodell egy alulról felfelé építkező modell, amelyben figyelembe vettem a gyártási folyamat minden egyes szakaszának költségeit: a beruházási-, anyag-, szerszám- és üzemeltetési költségeket.

A gyártási költségfüggvény alkalmazása egy szükséges bemenet a költséghatékony részekre bontás meghatározásához. A kifejlesztett módszerből a későbbiekben kereskedelmi szoftvertermék piaci bevezetése esetén az ipari alkalmazásokban természetesen minden kompozitgyárnak a saját költségmodelljét célszerű megadnia az optimális eredmény eléréséhez.



1. ábra Folyamatábra a kompozit héjszerkezetek költséghatékony részekre bontásának lépéseivel

A költségek egyes típusait vizsgálva azt kaptam, hogy a teljes gyártási költség az elemi egységek összevonásának hatására monoton csökken, majd az egyes részek további összevonásával újra növekedni kezd. Ez a növekedés a szerszámköltségek jelentős növekedésével magyarázható. Így a módszer alkalmas arra, hogy meghatározzuk a minimum költséghez tartozó részekre bontást.

A módszerben alkalmaztam még az ICP algoritmust (Iterative Closest Point), amellyel lehetőség van azonosítani azokat a részeket, amelyek azonos szerszámokkal gyárthatók, így az algoritmus ezen kiterjesztésével a szimmetrikus alkatrészek figyelembevehetőek, ami a szerszámköltségek szempontjából további megtakarítást eredményeznek.

4.3 Járműipari polimer szendvicsszerkezet mechanikai jellemzése koncepciófázisban

A tervezés koncepciófázisában a költséghatékony részekre bontás vizsgálata mellett fontos a vázszerkezet mechanikai teljesítményének ellenőrzése is, amelynek hatékony eszköze a végelelemes számítás. Ahhoz azonban, hogy a különböző tervváltozatokat hatékonyan tudjuk értékelni, szükség van egy olyan modellezési módszerre, amely teljes járműléptékben alkalmazható módon megbízható eredményeket ad, de kis számítási kapacitásigénye van. Egy buszipari polimer szendvicsszerkezetet vizsgálva módszert fejlesztettem a deformációs viselkedés jellemzésére és a tönkremenetel előrejelzésére.

A vizsgált szendvicspanel borítólemezeének húzó- és nyíróvizsgálata, valamint a gyanta szakítóvizsgálata alapján meghatározott anyagparaméterekkel, továbbá a hab gyártói adatlapi rugalmassági modulusának felhasználásával készítettem egy végeselemes modellt, amely térfogati elemekből épül fel és a hab tartalmazza a gyantafalakat is. A modell ASTM - D7249 szabvány szerinti 4-pontos hajlítóvizsgálatával kimutattam, hogy a gyantafalak jelenléte 16%-os merevségnövekedést okoz. A borítólemezek nélküli, de gyantafalakat tartalmazó hab virtuális húzó- és nyíróvizsgálatával meghatároztam a heterogén habszerkezetre vonatkozó egyenértékű húzó- és nyírórugalmassági modulusokat, továbbá kimutattam, hogy a heterogén hab egyenértékű húzórugalmassági modulusa meghatározható az egyenes és fordított keverékszabályok kombinálásával.

A következő lépésben a teljes szendvicspanelt rétegelt héjelemekkel modelleztem, a heterogén habmagot homogenizálva, az előzőekben meghatározott egyenértékű rugalmassági jellemzőkkel figyelembe véve a rétegelt héjmodellen is elvégeztem a 4-pontos hajlítást és a számított deformációt illetően 3% eltérést kaptam a részletes referenciamodellhez képest, miközben a számítás két nagyságrenddel kisebb szimulációs időt igényelt.

A tönkremenetel vizsgálatára a részletes végeselemes modell alapján dinamikai szimulációs modellt fejlesztettem, amelyben a habmagra és a gyantafalakra maximum feszültség alapú tönkremeneteli modellt alkalmaztam. A modell ASTM – C393 szabvány szerinti 3-pontos hajlítóvizsgálatának eredményét összehasonlítottam a kísérleti vizsgálat eredményével, amellyel jó egyezést értem el, és a tönkremeneteli erő és lehajlásérték felhasználásával a rétegelt héjmodell 3-pontos hajlítóvizsgálatával meghatároztam a tönkremenetel előrejelzéséhez alkalmazható nyírószilárdságot a homogenizált habmagra vonatkozóan. Ezzel megkaptam a gyantafalak szilárdságmódosító hatását, és így egy olyan módszert fejlesztettem, amellyel hatékonyan, gyorsan elemezhetők a különböző tervváltozatok a fejlesztés koncepciófázisában.

Összefoglalva a modellezési módszer, amelynek célja, hogy egyszerűen és hatékonyan lehessen komplex magszerkezetű szendvicspanelekből álló szerkezetet teljesjármű léptékben elemezni, az alábbi lépésekből áll:

1. borítólemezek merevségi paramétereinek meghatározása méréssel,
2. végeselemes modellezése rétegelt héjelemmel,
 - a. gyantafalakat tartalmazó inhomogén maganyag homogenizálásával, ortotróp anyagmodellel,
3. részletes, térfogati elemekből felépülő végeselemes modell hajlítóvizsgálata próbatest léptékben, tönkremeneteli erő és lehajlás meghatározása,
 - a. mag heterogén szerkezetű, gyantafalakat is tartalmazza,
 - b. hab és gyanta anyagára tönkremeneteli modell alkalmazása,
4. a tönkremeneteli lehajláshoz tartozó nyírófeszültség meghatározása a 2. pontban felépített modellben.

A fenti eljárással kifejlesztett héjmodellel gyors és egyszerű modellezéssel, kis számítási kapacitásigénnyel lehet teljes járműléptékben különböző tervváltozatokat vizsgálni úgy,

hogy közben a mechanikai viselkedés jellemzésére nagy megbízhatóságú eredményeket kapunk.

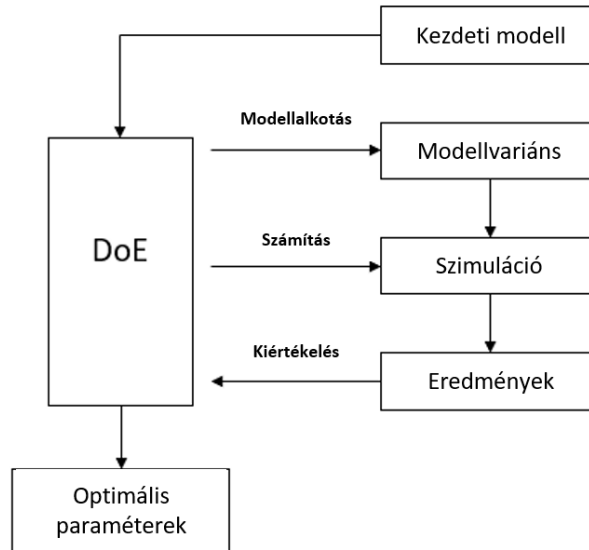
4.4 Szendvicspanelek ragasztott kötéseinek hatékony modellezése koncepció fázisban

A polimer szendvicspanelekből felépülő járművázszerkezet részekre bontási tervváltozatainak vizsgálatához elengedhetetlen, hogy különböző ragasztott kötés konstrukciók mechanikai viselkedését teljesjármű léptékben is hatékonyan tudjuk modellezni. A ragasztott kötéseket tartalmazó szendvicspanelek deformációs viselkedésének hatékony modellezésére módszert fejlesztettem.

Az alkalmazott megoldás alapelve, hogy az egyes alkatrészeket reprezentáló, a valóságban ragasztással kapcsolódó héjmodellek élén a geometriailag egybeeső csomópont-párokat egy általános, merevséget leíró elemmel kapcsolom össze.

A merevségi mátrix elemeinek meghatározása virtuális tesztekkel történhet, egyes jellemző ragasztási geometriák esetén külön-külön. A referenciamodell egy egyszerűbb geometria mechanikai vizsgálatokkal validált, részletes (térfogati elemekből álló) végeelemes modellje. A referenciához hasonló geometriát ki kell alakítani héjmodellként is, és a mátrix elemeket egy paraméterkereséssel úgy kell meghatározni, hogy a jellemző terhelések (például 3 irányú húzás és 3 irányú hajlítás) esetén a szerkezet válaszai – tehát egy reprezentatív ponton mért elmozdulások – a lehető legjobban egyezzenek a referenciával.

A paraméterek keresésére a statisztikai kísérlettervezés módszerét alkalmaztam (Design of Experiments, DoE). Ekkor a lehetségesnek tartott paramétermező pontjait egy megfelelő véletlenszerű eloszlás szerint kiértékelem. A Modified Extensible Lattice Sequence (MELS) algoritmus szerint határoztam meg a bemeneti paraméter kombinációkat. A MELS egy olyan kvázi-véletlenszerű kombináció sorozatot hoz létre, ami átlagosan egyenletesen fedi le a paramétermezőt, minimalizálva a torlódásokat és üres térrészeket. Ezen tulajdonsága miatt a módszer jó térkitöltő és jól használható a teljes paraméterter lefedésére és közelítő összefüggések kialakítására. A bővíthetőség (Extensible tulajdonság) azt jelenti, hogy a módszer képes egy meglévő adatcsoportot úgy kiegészíteni, hogy a tér egyenletesen legyen lefedve, optimálisan korábbi MELS szerint generált adatok esetén. Ezen tulajdonságai ideálissá teszik a jelenlegi alkalmazás számára. A folyamatot a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra Merevségi paraméterek keresése statisztikai kísérlettervezéssel

A vizsgálatot az előző fejezetben alkalmazott szendvicspanel két különböző ragasztott kötés konstrukciójával végeztem el, három különböző referencia-geometrián: rúd, lemez és dobozgeometria, ami egy egyszerűsített busz vázrészét modellezi.

Kimutattam, hogy a merevségi mátrix paramétereinek hangolásával nem lehet figyelembe venni a kötések merevségnövelő hatását, ezért bevezettem egy E_{aux} nevű paramétert, ami a végeelemes szimulációban a kötések szélességében modellezett izotróp elemsor rugalmassági modulusa. Így 5 paraméter – az S_x , S_y , S_z x , y és z irány menti merevségek, az S_{xz} y tengely körüli rotációs merevség, valamint egy E_{aux} -szal jelölt további, a kötést homogenizáló merevségi paraméter – alkalmazásával 3% alá csökkenthető a deformációs viselkedés hibája a részletes referenciamodellhez képest, de egy nagyságrenddel kisebb számítási kapacitást igényel egy elemzés, amelyet egy autóbussz vázszerkezet csavarómerevségi vizsgálatával szemléltettem.

5. Tézisek

Gyantainjektálással, vákuuminfúzióval vagy kézi laminálással hagyományos, tehát mozgóbetét nélküli szerszámmal gyártott polimer kompozit alkatrészek gyártási iránya, tehát a szerszám osztósíkjának iránya befolyásolja a szerszám- és az anyagköltségeket. A gyártási költségek minimalizálásához meg kell határozni az alkatrész optimális gyártási irányát. Az optimális gyártási irány meghatározására módszert fejlesztettem, amelyet az alábbi tézisben fogalmaztam meg.

1. tézis

Mozgóbetét nélküli szerszámmal egy lépésben gyártható, héjgeometriájú polimer kompozit alkatrészek gyártási költségek szerinti optimális gyártási iránya meghatározható az alábbi eljárással, amennyiben a gyártási költségekre az alulról felfelé építkező költségmodellt alkalmazzuk:

- diszkretizált – végeselemes hálóval ellátott – geometria feldolgozása, csomóponti koordináták és elemdefiníciók beolvasása,
- a szakirodalmi geometriai komplexitási tényező meghatározása az alkatrésze a lehetséges 3D-s irányok függvényében,
- az általam kidolgozott alámetszettségi tényező meghatározása az alkatrésze a lehetséges 3D-s irányok függvényében,
- a két tényező szorzatának minimumkeresésével az optimális irány meghatározása [1].

Nagy méretű és komplex geometriájú, gyantainjektálással gyártott polimer kompozit járművázszerkezetek gyártási költségeinek csökkentése lehetséges a szerkezet részekre bontásával és az egyes részek között szerkezeti kötések alkalmazásával, mert a kisebb méretű és kisebb komplexitású alkatrészek gyártószerszám- és alapanyagköltségeket csökkentő hatása nagyobb, mint a ragasztott kötések alkalmazásából eredő költségnövekedés. A gyártási költségek szempontjából optimális részekre bontás meghatározására elsőként módszert fejlesztettem, amelyet az alábbi tézisben fogalmaztam meg.

2. tézis

Polimer kompozit járművázszerkezet költséghatékony részekre bontása meghatározható az alábbi eljárással:

- diszkretizált – háromszögelemekből álló – héjgeometria gráf alapú feldolgozása: duális gráf előállítás a háromszögelemek és azok kapcsolatai alapján,
- K-közép klaszterezés alkalmazásával a geometria elemi egységekre bontása a háromszögelemek normálvektorai és a háromszögcsoportok kapcsolatai alapján,
- az elemi egységek hierarchikus klaszterezéssel történő összevonása több lépésben olyan módon, hogy a gyártási költségfüggvény az összevonás lépéseiben csökkenjen,
- az összevonás során az ICP (Iterative Closest Point) algoritmus alkalmazásával a szimmetriák azonosítása, a szimmetrikus részek azonos szerszámmal történő gyártásának további költségcsökkentő hatása miatt.

A módszer tetszőleges héjszerkezetet mozgóbetét nélküli szerszámmal egy lépésben gyártható alkatrészekre bont és az alulról felfelé építkező gyártási költségfüggvény minimumát keresi [2].

Járművázszerkezet tervezésének koncepciófázisában nagy jelentősége van, hogy a tervváltozatok szilárdsági ellenőrzését gyorsan, kis számítási kapacitással, de megfelelő pontossággal elvégezhesük. Polimer szendvicsszerkezetű járművázak esetében a habmagban lévő, a gyártási folyamat következtében létrejövő gyantafalak jelentősen befolyásolják a szendvicsszerkezet merevségi és szilárdsági tulajdonságait, de ezek vége-selemes modellezése csak olyan módon lehetséges, ha a habmagot térfogati elemekkel modellezzük, ami a teljes járműváz szilárdsági ellenőrzését nagymértékben lassítja a modellezés munkaigénye és a számítási idő jelentős növekedése miatt. Polimer szendvicsszerkezetű járművázszerkezet hatékony – teljes járműléptékben alkalmazható – modellezésére módszert fejlesztettem, amelyet az alábbi tézisben fogalmaztam meg.

3. tézis

Polimer kompozit szendvicspanelek gyantafalakat tartalmazó, heterogén szerkezetű magjának mechanikai viselkedése hatékonyan modellezhető rétegelt héjelemmel, homogén ortotróp anyagmodellel, amelynek merevségi paraméterei a heterogén maganyag homogenizálásával határozhatók meg: a húzórugalmassági modulusa az egyenes és fordított keverékszabályok kombinációjával, a nyírórugalmassági modulusa a gyantafalakat tartalmazó részletes vége-selemes modell nyíróvizsgálatával. A tönkremenetel előrejelzéséhez alkalmazható határfeszültség pedig a heterogén magszerkezetű szendvicspanel elemtönkremenetelt tartalmazó dinamikai szimulációjával határozható meg, amelyből a gyantafal magtönkremenetelre vonatkozó szilárdságmódosító tényezője előállítható. Ezzel a modellezési módszerrel két nagyságrenddel kevesebb időt igényel egy vége-selemes számítás, miközben a pontossága a számított deformációt illetően csak 3%-kal tér el egy részletes vége-selemes modellhez képest. A részletes vége-selemes modellben az irdalt habot és benne lévő gyantafalakat is a geometriájuknak megfelelően térfogati elemekkel modellezzük és külön-külön lineáris, izotróp anyagmodellel vesszük figyelembe, amely a járművázszerkezet normál üzemi terhelésének tartományában érvényes.

Állításomat QE-1232 üvegszálerősítésű, Distitron VE220 vinilészter mátrixú borítólemezekből és Airex T90.100 irdalt, zártcellás PET habból álló szendvicspanel hajlítóvizsgálataival és vége-selemes szimulációival igazoltam [3, 4].

Járművázszerkezet tervezésének koncepciófázisában fontos, hogy a különböző részekre bontást megvalósító tervváltozatok mechanikai viselkedését különböző kötéstípusok figyelembevételével gyorsan, kis számítási kapacitással, de megfelelő pontossággal elemezni lehessen. Ragasztott kötéseket tartalmazó polimer szendvicsszerkezetű járműváz

teljes járműléptékben történő hatékony modellezésére módszert fejlesztettem, amelyet az alábbi tézisben fogalmaztam meg.

4. tézis

Ragasztott kötéseket tartalmazó polimer szendvicsszerkezetű járművázak deformációs viselkedése hatékonyan modellezhető az alábbi módszer szerint: a szendvicspanelt rétegelt héjelemekkel a kötéseket pedig általános merevséget leíró mátrixelemmel jellemezzük, aminek a paramétereit a statisztikai kísérlettervezés MELS (Modified Extensible Lattice Sequence) módszerével határozzuk meg, amihez a referenciát egy mechanikai vizsgálatokkal validált 3D-s végeselemes modell adja. A kötést reprezentáló merevségi mátrix 21 független paramétere helyett az alábbi 5 paraméter alkalmazásával a pontosság a számított deformációt illetően kevesebb, mint 3%-kal tér el a 3D-s végeselemes modellhez képest, miközben egy nagyságrenddel kevesebb számítási időt igényel: az S_x , S_y , S_z x , y és z irány menti merevségek, az S_{xz} y tengely körüli rotációs merevség, valamint egy E_{aux} -szal jelölt további, a kötést homogenizáló merevségi paraméter. A módszer olyan konstrukciókra és alapanyagokra alkalmazható, amelyek deformációs viselkedése a járművázszerkezet normál üzemi terhelésének tartományában lineárisan modellezhető [5-9].

Állításomat Acralock SA 10 HV ragasztóanyagú kötéseket tartalmazó QE-1232 üvegszálerősítésű, Distitron VE220 vinilészter mátrixú borítólemezekből és Airex T90.100 irdalt, zártcellás PET habból álló szendvicspanel kísérleti vizsgálataival és végeselemes szimulációival igazoltam. A szendvicsszerkezetet alkotó alapanyagok paramétereit húzó- és nyíróvizsgálattal határoztam meg, a teljes szendvicspanel deformációs viselkedését hajlítóvizsgálatokkal elemeztem.

6. Dolgozat témájához kapcsolódó saját publikációk

- [1] **Takács L.**, Szabó F.: Automated determination of the optimal manufacturing direction of polymer composite shell structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **1246**, 012026 (2022).
- [2] **Takács L.**, Szabó F.: Kompozit szerkezetek optimális részekre bontása a gyártási költségek minimalizálására. Polimerek, **10**, 362-368 (2024).
- [3] **Takács L.**, Kovács L., Olajos T.: Numerical tool with mean-stress correction for fatigue life estimation of composite plates. Engineering Failure Analysis, **111**, 104456 (2020). IF=2,203; Q2
- [4] **Takács L.**, Szabó F.: Modeling the deformation behavior of polymer sandwich structures with inhomogenous core. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **903**, 012024 (2020).
- [5] Kovács L., **Takács L.**, Romhány G., Kiss Z.: Polimer kompozit szerkezetek és kötéseinek mechanikai jellemzése. in 'Erősített Műanyagok 2018 - Nemzetközi Konferencia. Balatonkenese', Vol. 12, 23-31 (2018).
- [6] **Takács L.**, Kiss Z.: Cost-effective partitioning of a composite bus structure from the perspective of adhesive joints. in '18th European Conference on Composite Materials. Athens', Vol. 18, (2018).
- [7] **Takács L.**, Szabó F.: Vinilészter mátrixú kompozit ragasztott kötésének törésmechanikai jellemzői. Polimerek, **9**, 661-665 (2019).
- [8] **Takács L.**, Szabó F.: Experimental and numerical failure analysis of adhesive joint of glass fiber reinforced polymer composite. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, **64**, 88-95 (2020).
- [9] **Takács L.**, Szabó F.: An effective method of modeling the deformation behavior of polymer sandwich structures with adhesive joints. Applied Composite Materials, **28**, 1959-1978 (2021). IF=2,199; Q2