

# Szénszálerősítésű kompozit lengőkar rétegrendjének optimalizálása verseny-motorkerékpárhoz

## Layer optimization of a carbon fiber reinforced composite swingarm for a racing motorcycle

KUN Krisztián<sup>1</sup>, SÁRKÁNY Tamás<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Neumann János Egyetem GAMF Kar  
Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék  
Kecskemét Izsáki út 10.

### Abstract

*Due to their many favorable properties, fiber-reinforced composite materials receive special attention in motorsports. Cause the inhomogeneous material properties, the constructions require more complex sizing procedures in several aspects. In our research, we provide a brief insight into the sizing methods of a carbon fiber-reinforced swingarm for an electric racing motorcycle. The main strength and elastic properties of the material structure are determined by the characteristics of the components and their proportions. The optimization of the layer order was performed by integrating analytical and empirical methods. During the simulation process, the loads was performed according to the requirements of the competition rules. At the end of the design process, we presented the process of product creation, keeping in mind the specifics of the applied manufacturing technology.*

Keywords: composite, carbon fiber, layer order, optimization, swingarm

### Összefoglaló

*Számos kedvező tulajdonságaiknak köszönhetően a versenysportban kiemelt figyelmet kapnak a szálerősített polimer ágyazású kompozit alapanyagok. A konstrukciók inhomogén anyagtulajdonságaik miatt több szempontból komplexebb méretezési eljárásokat igényelnek. Kutatásunkban egy elektromos hajtású versenymotor szénszál erősítésű lengőkar alkatrészének méretezési módszereibe enged rövid betekintést. Az anyagszerkezet fő szilárdsági és rugalmassági tulajdonságait az összetevők jellemzői és azok arányai határozzák meg. A rétegrend optimalizálását analitikus és empirikus eljárások integrációjában hajtottuk végre. A szimulációs folyamat során a terhelések felvételét a versenyszabályzatban irányzott követelmények szerint végeztük. A tervezési folyamat végén az alkalmazott gyártástechnológia sajátosságait szem előtt tartva a termékalkotás folyamatát szemléltettük.*

**Kulcsszavak:** kompozit, szénszál, rétegrend, optimalizálás, lengőkar

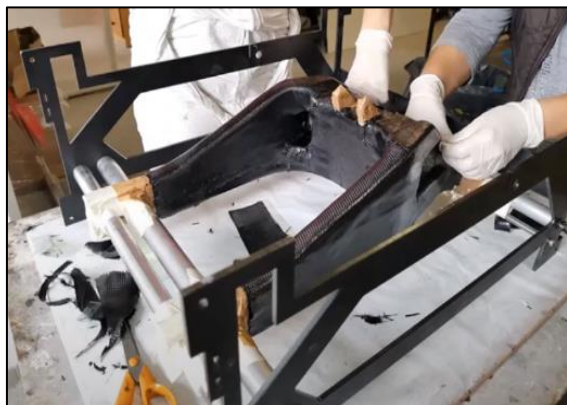
## 1. BEVEZETÉS

A MotoStudent egy hallgatók számára indított mérnöki és gazdasági verseny, melynek keretein belül megadott alkatrészek és az előteremtett erőforrások felhasználásával kell egy olyan motorkerékpárt megépíteni, amely a spanyolországi Motorland Aragon pályán vesz részt egy valós futamon a MotoGp szabályai szerint. Ezen a versenyen a Neumann János Egyetem hallgatói csapata, a Kenji Racing Team 2016 óta vesz részt. Ezen versenymotoroknál a legfőbb elvárás a minél kisebb tömeg elérése, kiváltképpen, ha a rugózatlan tömegről beszélünk. A motorkerékpár hátsó futóművének legnagyobb rugózatlan tömege a lengőkar, így ezen az alkatrészen lehet a legnagyobb súlycsökkentést megvalósítani, ami a motorkerékpár menetdinamikáját érdemben javítja. Az átlagos alumínium motorkerékpár lengőkarok 8-10 kilogramm tömeggel rendelkeznek, így célszerű más gyártási technológiát találni az alkatrész megvalósítására. Kézenfekvő megoldás a súlycsökkentésre egy kompozit szerkezet megalkotása.

## 2. A GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA KIDOLGOZÁSA [1]

A gyártástechnológia kidolgozása során két fő szempontot vettünk figyelembe. Az első a gyártandó darabszám, melynél prototípusterméket tekintve mindössze egy darabra van szükségünk. További kritérium a versenynaptár adta szűk határidő. Ezen feltételek miatt a lengőkar kompozit váza nem negatív szerszámban készült el, hanem egy magszerkezetre történt a laminálás. Ez a technológia nagyban meghatározza a rétegrend kialakítását. A gyártás során nincs lehetőség vákuumzsák használatára, mivel a zsák a laminált rétegeket meggyűri a mag felületén, ami esztétikailag rontja az alkatrész összképét. Azonban vákuum használata nélkül nem használható előre impregnált gyanta szerkezetű kompozit (*prepreg*<sup>1</sup>).

Kézenfekvő megoldás a folyékony gyantával történő kézi laminálás (*Wet-Layup Method*) A laminálás során a legnagyobb problémát a gyanta vázanyag optimális arányának biztosítása jelenti. Gyakorlati tapasztalat alapján az ideális arány 60% vázanyag, 40% gyanta [1]. Kézi laminálással ezt nem lehet egzaktul biztosítani. Amennyiben a gyanta arány magasabb az alkatrész tömege indokolatlanul növekszik, ha viszont 40%-ot nem éri el, akkor a kompozit „száraz”, a laminátum tapadása csökken a vázanyagon és a további rétegeken. Ez a kompozit termék szilárdságán jelentősen csökkenthet. A rétegrend meghatározásánál nagyobb biztonsági tényezőt kell alkalmazni a szimulált és számított értékek esetén.



1. ábra. A lengőkar gyártási folyamata

## 3. A SZILÁRDSÁGI SZÁMÍTÁSOK ÉS A VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓ KIÉRTÉKELÉSE

A végtelen szákkal erősített kompozitok szilárdsági méretezésénél fontos meghatározni a szerkezet szakítási szilárdságát és a rugalmassági modulusát. A következő módszerekkel meghatározott értékeket kell a szimulációs szoftverbe felvinni az anagykönyvtárba. A szakítószilárdságot, rugalmassági modulusát és fajlagos nyúlást a gyanta és a szövet gyártója által közölt értékek alapján határoztuk meg. Mátrixként 1070S jelű epoxi gyantát, míg szálerősítésként GG-206 T WF1 szénszövetet alkalmaztunk. A szál és a mátrix jellemzői és aránya alapján a Voigt szabály<sup>2</sup> segítségével a réteg hosszirányú rugalmassági modulusa számítható. (1) [1] [2] [3] [4]

<sup>1</sup> prepreg: Egy speciális gyantarendszerrel előre impregnált szálerősítésű szövet

<sup>2</sup> Voigt szabály: keverési szabály

$$E_{k1} = E_{sz}V_{sz} + E_mV_m \quad (1)$$

ahol:

- $E_{k1}$ : a kompozit rugalmassági modulusa
- $E_{sz}$ : a szálerősítés rugalmassági modulusa
- $E_m$ : a mátrix rugalmassági modulusa
- $V_{sz}$ : a szálerősítés térfogatszázaléka
- $V_m$ : a mátrix térfogatszázaléka

A keresztirányú rugalmassági modulus ( $E_{k2}$ ) az úgynevezett Reuss szabály<sup>3</sup> segítségével számítható: (2)

[1]

$$E_{k2} = \frac{E_{sz}E_m}{E_{sz}V_m + E_mV_{sz}} \quad (2)$$

A kompozit alkatrész hosszirányú megterhelése során a komponensek térfogatarányos összege adja meg a szilárdságot. A keresztmetszetek aránya az erőhatásra merőlegesen egyben az összetevők arányát is megmutatják. (3) [1]

$$\sigma_{k1} = \sigma_{sz}V_{sz} + \sigma_m(1 - V_{sz}) \quad (3)$$

ahol:

- $\sigma_{k1}$ : a hosszirányú kompozit szakítószilárdsága
- $\sigma_{sz}$ : a szálerősítés szakítószilárdsága
- $\sigma_m$ : a mátrix szakítószilárdsága

Keresztirányú terhelés esetén a szakító szilárdság számított értéke [2] (4):

$$\sigma_{k2} = \frac{E_{k2}\sigma_{sz}}{E_{sz}l_k} \cdot l_{sz} + \frac{E_{k2}\sigma_m}{E_m l_k} \cdot l_m \quad (4)$$

ahol:

- $\sigma_{k2}$ : a kompozit keresztirányú szakítószilárdsága
- $l_k$ : a kompozit fajlagos nyúlása
- $l_{sz}$ : a szálerősítés fajlagos nyúlása
- $l_m$ : a mátrix fajlagos nyúlása

Az általunk kiválasztott gyanta és szénszál tulajdonságait és térfogat arányait figyelembe véve a fenti összefüggések alapján meghatározható a kompozitunk mechanikai tulajdonságai (1. táblázat). Az alábbi táblázat foglalja össze a fentebb említett értékeket 54%-os szálerősítés térfogatarányánál.

1. táblázat. Kompozit szerkezetek tulajdonságai 54%-os gyantatartalom mellett.

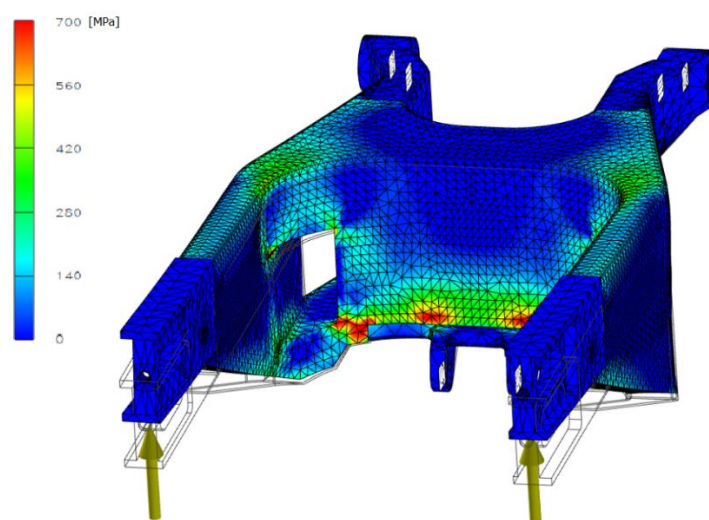
|  |            |
|--|------------|
| $E_{k1}$ : hosszirányú rugalmassági modulus      | 133,9 GPa  |
| $E_{k2}$ : keresztirányú rugalmassági modulus    | 14,71 GPa  |
| $\sigma_{k1}$ : hosszirányú szakító szilárdság   | 2107,2 MPa |
| $\sigma_{k2}$ : keresztirányú szakító szilárdság | 466,76 MPa |

A maximálisan megengedett feszültség mértéke az adatok segítségével számítható a lent látható képlet segítségével. Ez a maximális feszültségi érték az általunk meghatározott feltételek szerint 2374,6 MPa. (5) [2]

$$\sigma_{meg} \geq \sqrt{\sigma_{k1}^2 + \sigma_{k2}^2 + \sigma_{k1}\sigma_{k2}} \quad (5)$$

A végeelemes analízis során a héjszerkezet bemodellezése követően 3000N erővel terheltük meg az alkatrészt. A réteges kompozit CFRP [2] ortotróp anyagként definiálendő, ugyanis a három főkoordináta irányába más-más tulajdonságokkal rendelkezik az anyag. Az alumínium betétek (csatlakozó elemek) izotróp anyagjellemzőkkel definiálhatók. Az erő mértékét a verseny szervezősége határozza meg. Ekkora az erővel kell a validáció során megterhelni azt alkatrészt. A lengőkarban fellépő maximális feszültség 632,7 MPa. A szénkompozitok folyáshatára megközelíti a szakító szilárdságot, az üvegszerű tönkremeneteli görbéjük végett. A szimuláció alapján a biztonsági tényezőnk 3,75, ami egy versenymotor alkatrészhez mérten nagy érték, de figyelembe kell venni a kézi laminálás miatt létrejövő tökéletlen adhéziós kapcsolatot is a tervezés során, ami jelentősen gyengítheti a megalkotott szerkezetet a számításokhoz képest. [7] [8] [9] [10]

<sup>3</sup> Reuss szabály: reciprok keverési szabály



2. ábra. A végelelemes szimuláció eredménye Von Mises analízis szerint.

#### 4. SZÉNSZÁLERŐSÍTÉSŰ KOMPOZIT LENGŐKAR RÉTEGRENDJÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA

Az analízis alapján, az alapanyag anizotróp tulajdonságából eredő irányok szerinti feszültség és deformációs különbségek elemzésével kialakíthatóvá vált az 5 rétegű héjelemből felépített, kritikus terheléseknek megfelelő szerkezet.

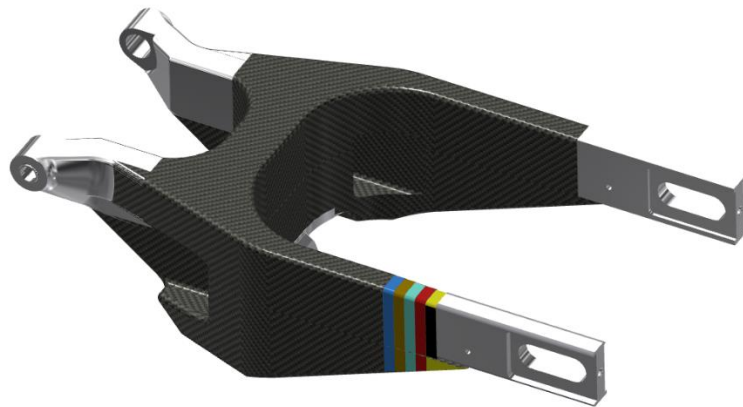
A szimulációk alapján jól látható, hogy hol találhatóak terhelés szempontjából kritikus felületek. Ezen felületeket irányított rétegrenddel kell ellátni. Mivel ezen területek húzó és nyomó terheléseket kapnak célszerű speciális, egy irányba szőtt szövettel, úgynevezett UD<sup>4</sup>-val megerősíteni őket. Ennek a szövetnek a használata csak akkor célszerű, ha ismerjük a feszültségek irányát. [5] [6]



3. ábra. Az UD rétegek elhelyezése a kiforgácsolt habra

A fedőréteg rétegrendjének összeállítása során törekedni kell a szimmetrikus elrendezésre, fontos, hogy a szövetszerkezet azonos anyagú és tulajdonságú rétegekből épüljön fel. A hőkezelés alatt feszültségek lépnek fel az alkatrészben, ami lehűlés közben vetemedéshez vezet, ha az említett kritériumok nem teljesülnek. Emelet figyelembe kell venni, hogy a mátrix térhálósodása során a gyanta zsugorodik, ez a folyamat belső feszültségeket hoz létre az alkatrészben. Az epoxi gyanta használata esetén az említett zsugorodás mértéke jóval kisebb, mint például egy észter gyanta alkalmazása során.

<sup>4</sup> UD: Unidirekcionális, (egyirányú) szövésű szövet



4. ábra. A lengőkar fedő rétegrendje

A 2. táblázat összefoglalja a gyártás során alkalmazott 5 réteget és azok irányultságát. A héjelemek szálrendeződési módjának megválasztásánál a 1. táblázatban összefoglalt igénybevételek szerinti irányfüggő tulajdonságok mérlegelésével a legkedvezőbb feszültségi állapotú és deformációs jellemzőkkel rendelkező rétegek kerültek nagyobb mennyiségben alkalmazásra. A  $0^\circ$ -os réteg párhuzamosan fut a lengőkar szimmetria síkjával. Éppen ezért a szálak elrendeződése főleg hosszirányúak, ugyanis a lengőkar főleg hajlítási igénybevételt kap. a csavarodás ellen egy réteg  $90^\circ$ -os irányultságú szövet is került a rétegrendbe.

2.táblázat. Kompozit szerkezetek tulajdonságai 54%-os gyantatartalom mellett.

| Réteg | Irányultság |
|-------|-------------|
| 1.    | $0^\circ$   |
| 2.    | $30^\circ$  |
| 3.    | $-30^\circ$ |
| 4.    | $90^\circ$  |
| 5.    | $0^\circ$   |

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A lengőkar teljes tömege az alumínium inzeretekkel együttvéve 2,97 kilogramm (5. ábra). A tervezési folyamat megoldása során fény derült arra, hogy az anyagszerkezet fő szilárdsági és rugalmassági tulajdonságait az összetevők jellemzői és aránya határozzák meg. A hosszirányú mechanikai és alakváltozási jellemzőket a szálirányoknak megfelelően elsősorban a szál paraméterei jellemzik, azonban keresztirányú és nyíró igénybevételek esetén a mátrix fázis játszik jelentős szerepet az együttes tulajdonságok kialakításában.



5. ábra. Az elkészült lengőkar

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## 7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János: A polimertechnika alapjai (2007) ISBN 963 420 855 X
- [2] Dr. Kovács György: Szálerősítéses műanyag profilos tartók és cellalemezek vizsgálata, optimális méretezése, PhD értekezés, Miskolc, 2004
- [3] Dr. Szabó Ferenc János, Sarka Ferenc, Tóbis Zsolt, Bihari Zoltán: Numerikus analízis, szimuláció, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2009
- [4] Carl Hanser Verlag, P. K. Mallick and S. Newman: Composite materials technology. Processes and properties, Munich, 1990. pp. ISBN 3-446-15684-4 1991. DOI: 10.1002/pi.4990250316
- [5] William F. Milliken, Douglas L. Milliken: Race Car Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers Publications Group, United States, 2012.
- [6] Song, Z., & Zhao, X. (2017). Research on lightweight design of automobile lower arm based on carbon fiber materials. *World Journal of Engineering and Technology*, 5(4), 730-742. DOI: 10.4236/wjet.2017.54061
- [7] Maheshbabu, P., Ramkumar, R., & Ajay, D. (2021). Design and Analysis of Swing Arm Using Carbon Fiber Composite by Using Creo 2.0 and ANSYS. In *Recent Trends in Mechanical Engineering* (pp. 531-544). Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-7557-0\_44
- [8] Airoidi, A., Bertoli, S., Lanzi, L., Sirna, M., & Sala, G. (2012). Design of a motorcycle composite swing-arm by means of multi-objective optimisation. *Applied Composite Materials*, 19(3-4), 599-618
- [9] Schüppel, D., & von Reden, T. (2018). CFRP Motorcycle Rear Swing Arm. *Lightweight Design worldwide*, 11(6), 38-41. DOI: 10.1007/s41777-018-0054-4
- [10] Smith, B., & Kienhöfer, F. (2015). A carbon fibre swingarm design case study. *JS Afr. Inst. Mech. Eng*, 31, 1-11.