

CFRP kompozitok forgácsolásának heurisztikus optimalizálása

Heuristic optimisation of CFRP composite machining

BUKOR Levente¹, Dr. GEIER Norbert¹

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3, T épület 4. em., Tel.: 06/1-463-2515, Fax: 06/1-463-3176, E-mail:
info@manuf.bme.hu, Honlap: http://manuf.bme.hu

Abstract

This research aims to minimise machining defects in carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites by optimising the local translation and rotation of the contour. Using a custom virtual plate generator and a fibre cutting angle-based penalty function, Brute Force and Monte Carlo algorithms were evaluated. Results show that the MC method provides a threefold speed increase with a negligible (under 1%) quality loss.

Keywords: CFRP, Machining, Optimisation, Monte Carlo method

Kivonat

A kutatás célja a szénszál-erősítésű polimer (CFRP) kompozitok forgácsolási hibáinak minimalizálása a kontúr lokális eltolásának és elforgatásának optimalizálásával. Egyedi virtuális lemezgeneráló és szálvágási szögön alapuló büntetőfüggvény segítségével értékeltük a teljes keresés és a Monte Carlo algoritmusokat. A vizsgálatok igazolták, hogy a Monte Carlo módszer háromszoros sebességnövekedést biztosít elhanyagolható (1% alatti) minőségromlás mellett.

Kulcsszavak: CFRP, Forgácsolás, Optimalizálás, Monte Carlo szimuláció

BEVEZETÉS

A szénszál-erősítésű polimer (CFRP) kompozitok kiemelkedő fajlagos szilárdság-merevség mutatóik miatt széleskörűen elterjedtek a modern jármű- és repülőgépiparban [1]. Ezen anyagok alkalmazása azonban komoly gyártástechnológiai kihívásokat rejt magában. A kompozitok forgácsolása során a réteges felépítés és az anizotrópia miatt gyakoriak az olyan megmunkálási hibák, mint a száltörés, a mátrix-kenődés vagy a teherbírást kritikusan csökkentő delamináció [2]. Az alkatrészek alapvető formáját többnyire formába préseléssel vagy laminálással alakítják ki, ami durva tűréseket eredményezhet. A pontos illeszkedésű funkcionális felületek és kontúrok eléréséhez az utólagos forgácsolási műveletek egy gazdaságos megoldást tudnak nyújtani [3].

A CFRP lemezek élmarása és fúrása közben a forgácsolási folyamatokat döntően befolyásolja a szálvágási szög, azaz a forgácsolási sebességvektor iránya és a szénszálak orientációja által bezárt szög [4], [5]. A szakirodalom egybehangzóan rávilágít arra, hogy a 0° és 90° körüli szálvágási szögek esetén a megmunkálás kedvező, míg a 135° körüli tartomány a legkritikusabb, mivel itt kitépő mechanizmus érvényesül, ami kiterjedt felületi és felszín alatti károsodáshoz vezet [4–9]. A szálvágási szög mellett a megmunkálás minőségét jelentősen befolyásolják az olyan alapvető forgácsolási paraméterek is, mint az eltolás [7], a fogásszélesség [10] és a szerszámgeometria [11]. A forgácsolási hibák mérséklésének egyik hagyományos módja ezen technológiai paraméterek finomhangolása, melyekkel kiterjedt szakirodalom foglalkozik [3], így jelen kutatás ezekre nem tér ki, hanem kifejezetten az elhelyezés-optimalizáló keretrendszerre fókuszál.

A hibák mérséklésének egyik innovatív és ígéretes iránya nem csupán a szerszámhálya vagy a forgácsolási paraméterek hagyományos finomhangolása, hanem az alkatrész lokális pozíciójának optimalizálása az előgyártmányon belül [12]. Különösen igaz ez a nem-folytonos, aprított szálkötegekkel erősített (chopped) CFRP lemezekre. Ezen anyagoknál a néhány milliméter hosszúságú szénszálak kötegei véletlenszerűen helyezkednek el a mátrixban [13], [14]. Ha a megmunkálandó kontúrt a tűréseken és a ráhagyáson belül (a technológiai kereteket kihasználva) kis mértékben eltoljuk vagy elforgatjuk, elkerülhetők

a kritikus szálvágási szögek. Geier és Magyar korábban már bizonyították, hogy az előgyártmányon belüli lokális pozicionálás számottevően csökkentheti a sorjaképződés kockázatát furatok esetén [15].

A jelen kutatás célkitűzése és a probléma felvetése ezen a gondolatmeneten alapul: a szakirodalom eddig tipikusan rögzített orientációval vizsgálta az elrendezés hatását. Jelen munka célja egy olyan CFRP-specifikus elhelyezés-optimalizáló keretrendszer kifejlesztése és vizsgálata volt, amely a kontúr lokális eltolását és elforgatását együttesen kezeli. A cél a sorja és delamináció keletkezési kockázatának csökkentése volt a szálvágási szögek alapján felépített büntetőfüggvény minimalizálásával, ezáltal a selejtszám csökkentése és a gyártás gazdaságosabbá tétele. További célja volt a kutatásnak az optimális elhelyezés heurisztikus megközelítése a lehető leggyorsabban.

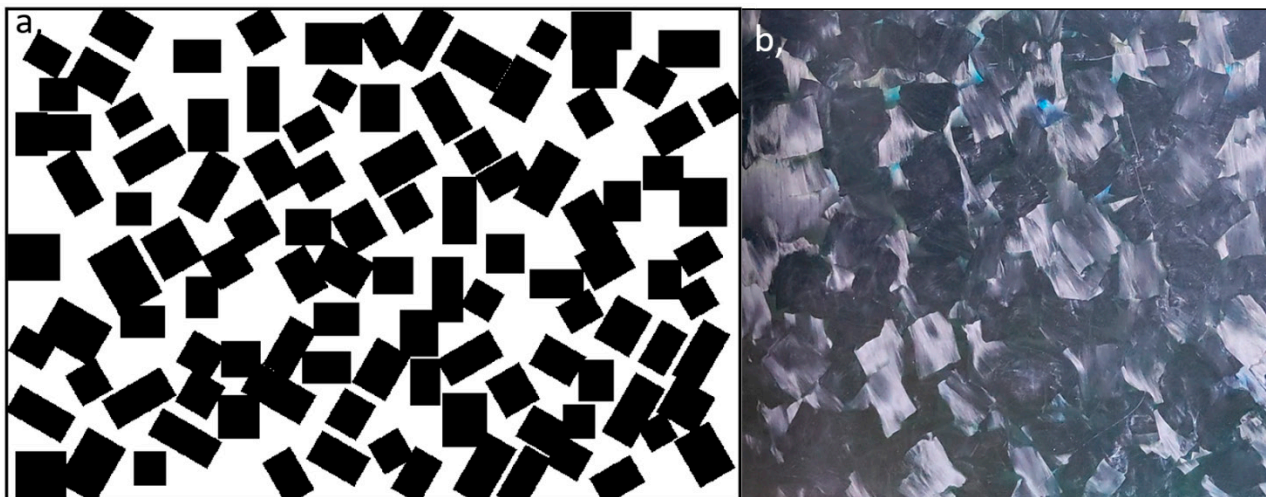
FEJLESZTETT ALGORITMUSOK

A probléma megoldásához és a nagyszámú teszteléshez elengedhetetlen volt egy megfelelő virtuális környezet és az arra optimalizált keresőalgoritmusok fejlesztése. Bár a teljes keresés és a Monte Carlo módszer elméleti alapjai ismertek, a konkrét geometriai-technológiai problémára történő implementálása, valamint a szálvágási szög alapú minőségértékelés egyedi fejlesztést igényelt.

Virtuális CFRP lemezgeneráló algoritmus

A megfelelő mennyiségű és statisztikailag a valóságot közelítő tesztadat biztosítása érdekében egy egyedi virtuális CFRP lemezgeneráló algoritmust fejlesztettünk. A modell a lemez rétegeit bináris mátrixként kezeli, ahol az 1-es értékek szálcsoportot, a 0-s értékek mátrixot jelölnek. A generálás során a megadott mérettartományú (6-14 mm hosszú) szálkötegek véletlenszerűen kerülnek elhelyezésre. Az algoritmus iteratíván, egy véletlenszerűen kevert szöglistánból választva helyezi le a kötegeket, hogy elkerülje az eloszlási torzításokat. Minden elhelyezés előtt egy ütközésvizsgálat fut le: ha az új szálköteg a megengedett átfedésnél jobban takar egy már lent lévő, a program új pozíciót sorsol. A folyamat addig ismétlődik, amíg az előírt célkötegszám rétegenként teljesül.

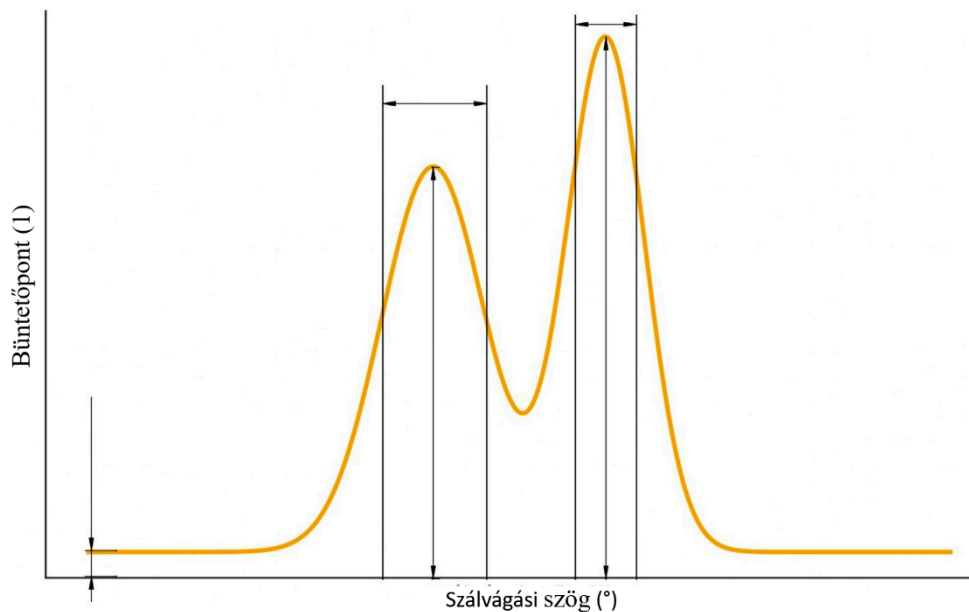
Az eredmény (1.a ábra) egy olyan digitális orientációterkép, amely tökéletes bemenetet biztosít a keresőalgoritmusok számára.



1. ábra. a) az algoritmus által generált CFRP lemez b) egy valós CFRP lemez

A minőségértékelés (Büntetőfüggvény)

Minden keresőalgoritmus egy közös, a problémára specifikusan megírt minőségértékelő modult használ. A kontúr mentén a szálvágási szögeket (a szálirány és a kontúr tangensének hajlásszögét) egy folytonos, „dupla csúcsú” Gauss-görbén alapuló büntetőfüggvénnyel értékeljük (2. ábra). A 135°-os kritikus szálvágási szög adja a legmagasabb büntetést, míg a 0°/90° alacsonyabbat. Számítási könnyítésként a mátrixba eső vágások büntetőpontja 0, amit az algoritmus egy gyors bináris maszkolással azonosít, így drasztikusan csökkentve a futási időt.



2. ábra. Folytonos büntetőpont függvény Gauss eloszlás alapján

Teljes keresés (Brute force – BF)

Az alapvető etalont a teljes keresés algoritmus biztosítja, amelyet arra fejlesztettünk ki, hogy a megengedett eltolási (N_x , N_y) és elforgatási (N_r) tartomány minden egyes diszkrét rácspontját szisztematikusan megvizsgálja. Az algoritmus három egymásba ágyazott cikluson keresztül végigpróbálja a keresési teret. Nincs megszakítási feltétel; a futás során folyamatosan frissíti a legkisebb büntetőponthoz tartozó (x, y, α) koordinátahármaszt. Előnye a determinisztikus teljesség és a garantált globális optimum megtalálása a felbontáson belül, hátránya azonban az $O(N_x \cdot N_y \cdot N_r \cdot E)$ komplexitásból fakadó rendkívül magas számítási idő. (Ahol E a keresési költség)

Monte Carlo szimulációs keresés (MC)

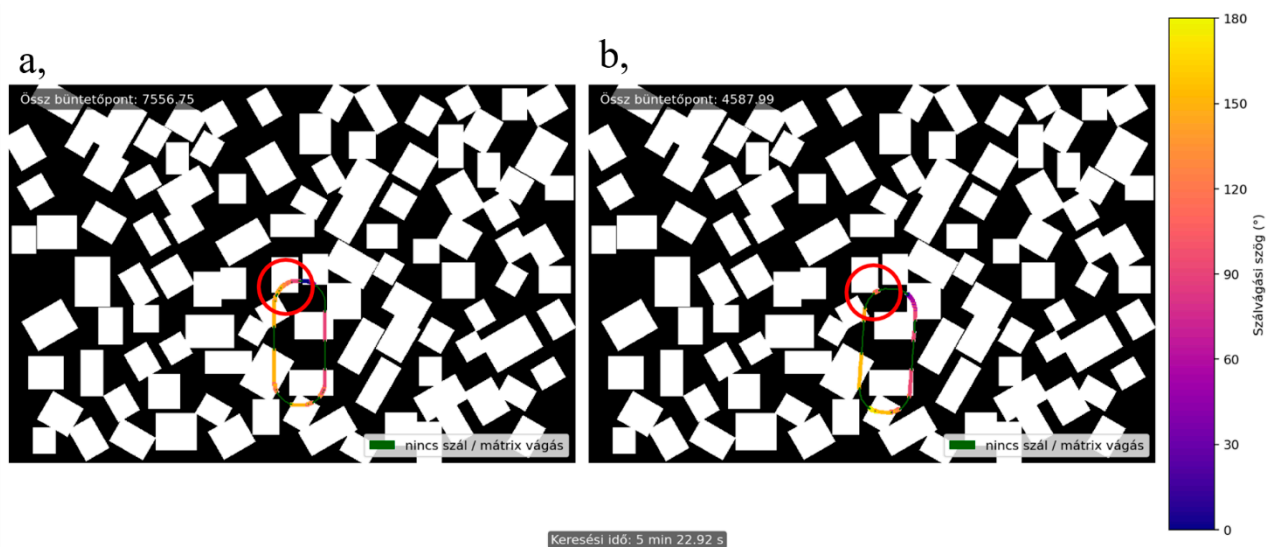
A számítási idő csökkentése érdekében a problémára implementáltuk a Monte Carlo alapú heurisztikus keresést is. Az eljárás a rácspontok szisztematikusan bejárása helyett véletlenszerű mintavételezést alkalmaz a keresési téren belül. Annak érdekében, hogy a véletlenszerűség ne vezessen felesleges redundanciához, az algoritmus egy "látogatott listát" tart fenn. Egy generált pozíció-orientáció kombináció csak akkor kerül a költséges büntetőpont-kiértékelésbe, ha korábban még nem vizsgáltuk. Az algoritmus futása egy előre megadott maximális lépésszám (K) elérésekor áll le. Bár az MC nem garantálja a globális optimum megtalálását, a viszonylag nagy próbálkozásszám miatt jó eséllyel talál magas minőségű (azaz kis büntetőpontszámmal jellemzett), lokális vagy közel-globális optimumot, jóval rövidebb futási idő alatt ($O(K \cdot E)$).

EREDMÉNYEK ÉS ÉRTELMEZÉSÜK

A fejlesztett algoritmusok teljesítményét 100 darab, statisztikailag egyedi virtuális CFRP lemezen értékeltük. A keresési feladat a kontúr $[-2; 2]$ mm-es (0,1 mm lépésköz) eltolását és $[-4; 4]$ fokos (1 fokos lépésköz) forgatását foglalta magában.

Az alaphelyzet és a teljes keresés (BF) összehasonlítása

Az elsődleges kérdés az volt, hogy a véletlenszerűen lehelyezett alaphelyzet képest van-e egyáltalán értelme az optimalizációs feladatnak. A mérések egyértelműen igazolták az eljárás létjogosultságát: a teljes keresés mind a 100 vizsgált lemez esetén alacsonyabb büntetőpontot eredményezett, mint az eredeti, optimalizálatlan pozíció. Az átlagos büntetőpont-csökkenés ≈ 1870 pont volt, ami azt jelenti, hogy a BF átlagosan 35%-kal jobb (kedvezőbb szálvágási szögekkel rendelkező) elhelyezést talált. A javulás mértéke erősen lemezfüggő volt: azokon a lemezeken, ahol az alaphelyzet „nehéz” volt (sok kritikus szálvágás), a BF ezres nagyságrendű pontcsökkenést ért el. Ez bizonyítja, hogy a kontúr kis mértékű, ráhagyáson belüli mozgatása drasztikusan javíthatja a forgácsolási feltételeket (3. ábra).

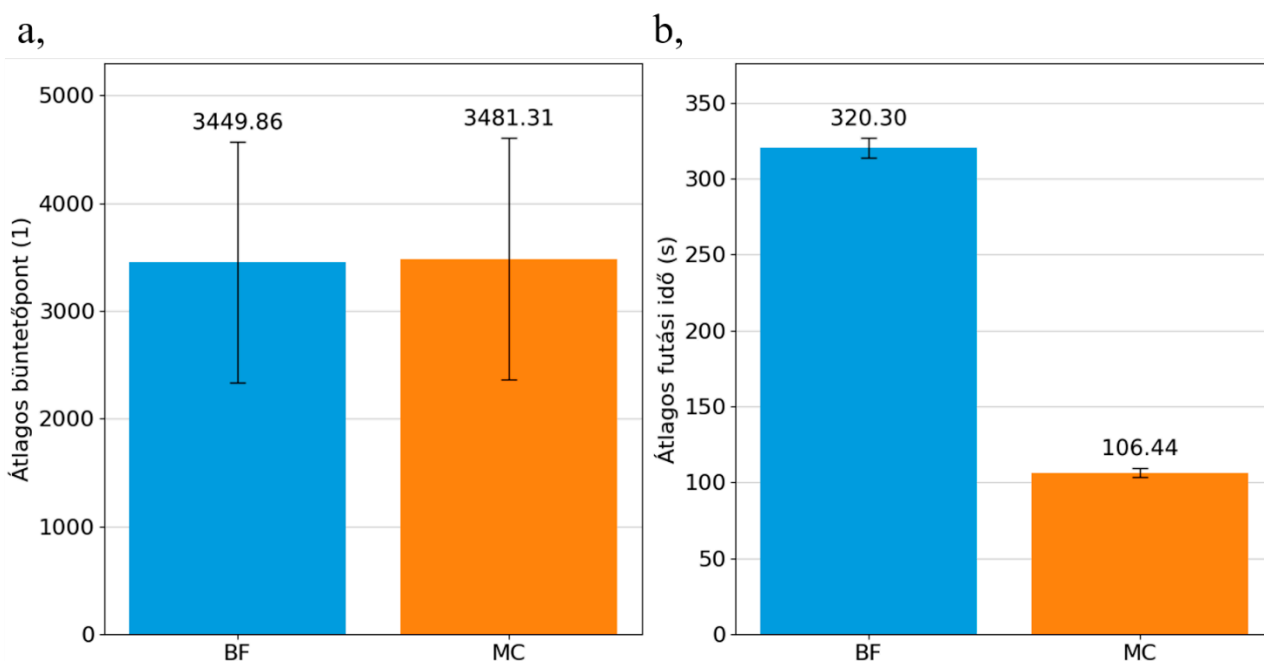


3. ábra. Szögtérképek
a) eredeti lehelyezés b) optimalizált lehelyezés

A BF és az MC módszer összehasonlítása

A gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából kulcsfontosságú a keresési pontosság és a futási idő egyensúlya. A BF algoritmus átlagos futási ideje lemezenként megközelítőleg 320 másodperc volt (i5 processzor, 8 GB DDR4 RAM, Visual Studio Code környezet), ami ipari környezetben, valós idejű adaptív rendszereknél korlátozó tényező lehet. Ezzel szemben a Monte Carlo keresés futási ideje átlagosan mindössze 106 másodperc volt ($K = 5000$), ami mintegy háromszoros gyorsulást jelent az etalonhoz képest.

A felgyorsult futásért cserébe az MC algoritmus minimális pontosságvesztést szenvedett el. Az MC által talált legjobb pozíciók büntetőpontja átlagosan csupán ≈ 31 ponttal (relatív értelemben 0,9%-kal) maradt el a BF által garantált globális optimumtól. Bár az MC tisztán véletlenszerű mintavételezése miatt csak ritkábban (a tesztek során kb. harmadrészt) találta meg a pontos globális optimumot, a pozíciók eltérése a legtöbb esetben elhanyagolható volt. Bebizonyosodott, hogy a robusztus, egyszerűen implementálható MC módszer kiváló kompromisszumot nyújt, ha a számítási idő kritikus tényező.

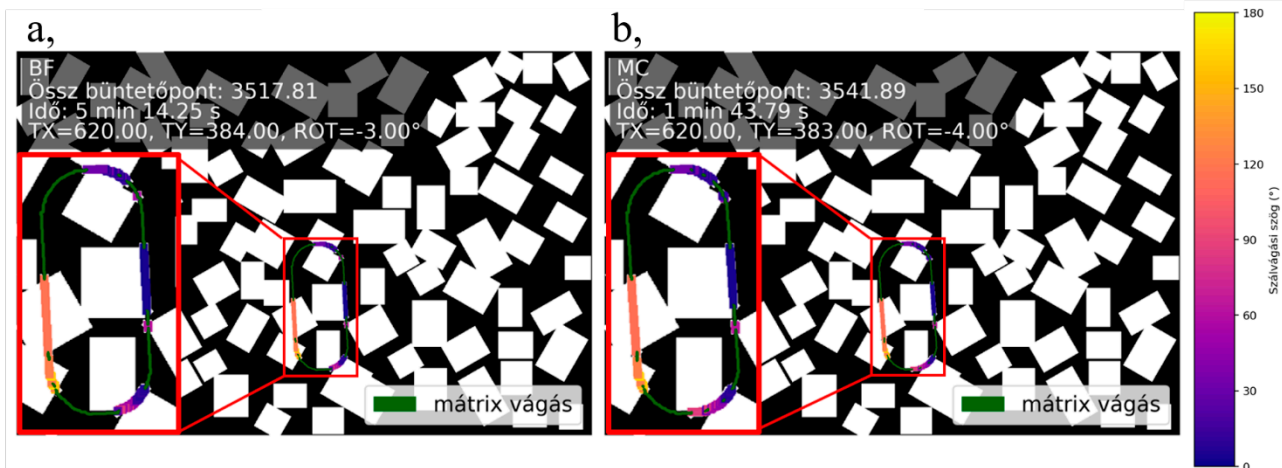


4. ábra. a) átlagosan elért büntető pontok b) átlagos futási idők

Orientáció változtatásának jelentősége és vizuális igazolása

Az eredmények feldolgozása során egyértelművé vált a forgatási szabadságfok bevezetésének fontossága. A 100 vizsgált esetből mindössze 5 alkalommal fordult elő, hogy a globális optimum eléréséhez nem volt szükség a kontúr elforgatására. Ez azt jelenti, hogy a pusztán (x, y) irányú eltolást alkalmazó korábbi módszerekkel szemben az orientáció változtatása elengedhetetlen a maximális minőség növeléséhez.

Ezt a szögtérképek (kontúr menti szálvágási profilok) vizuális elemzése is alátámasztotta. A generált szögtérképeken jól látható (5. ábra), hogy a kontúr megfelelő, néhány fokok elforgatásával és milliméteres eltolásával a vágási zóna áthelyezhető a kritikus 135° -os tartományokból a biztonságos mátrixba, vagy a kedvezőbb $0^\circ/90^\circ$ -os szálkötegekhez. Az optimalizáció így valós, fizikai szinten képes mérsékelni a delamináció és a szálkihúzódas veszélyét.



5. ábra. Algoritmusok szögtérképei az 5. lemezen a) BF b) MC

ÖSSZEFOGLALÁS

A szénszál-erősítésű polimer kompozitok utólagos alakadó forgácsolása során a szálvágási szög kritikus paramétere a megmunkálás minőségének. A kutatásunkban egy olyan szoftveres megoldást dolgoztunk ki, amely az előgyártmány és a tűrések adta mozgásteret kihasználva, a szálmintázat ismeretében minimalizálja a megmunkálási hibák kockázatát.

A kifejlesztett minőségértékelő rendszer és a köré épített keresőalgoritmusok (Teljes keresés és Monte Carlo) tesztelése virtuálisan generált CFRP lemezekon történt. Az eredmények rávilágítottak arra, hogy az alkatrészek tudatos, algoritmusvezérelt elhelyezése minden esetben számottevően jobb vágási feltételeket teremt a véletlenszerű elhelyezéshez képest. A teljes keresés (BF) garantálja a lokális tartomány optimumát, de számításigényes, míg a bevezetett Monte Carlo (MC) algoritmus háromszoros sebességnövekedést biztosít elhanyagolható (1% alatti) minőségromlás mellett.

A kutatás egyik legfontosabb mérnöki tanulsága, hogy az elrendezés optimalizálása során nem elegendő pusztán a pozíciót (eltolást) változtatni; a kontúr orientációjának bevonása szinte minden esetben elengedhetetlen a legkedvezőbb szálvágási feltételek eléréséhez. Ezen algoritmusok ipari alkalmazása a jövőben jelentősen csökkentheti a selejtszámot, fenntarthatóbbá és gazdaságosabbá téve a kompozitalkatrészek gyártását.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal finanszírozta a 2021-1.2.4-TÉT-2021-00054 számú projekt keretében, „Mikromegmunkálás gépi tanulással támogatott folyamatfelügyelete az Ipar 4.0 keretén belül” címmel. Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2024-1.2.5-TÉT-2024-00032 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] BAI, QINGYUN ; HAO, QIN ; DAI, HONGQING ; CHEN, YIWEN ; DAI, NING: A review on integrated design and manufacturing technologies for continuous fiber-reinforced polymer composite lightweight structures in aerospace. In: *Thin-Walled Structures* Bd. 217 (2025), S. 113750

- [2] GEIER, NORBERT ; XU, JINYANG ; PERESZLAI, CSONGOR ; POÓR, DÁNIEL ISTVÁN ; DAVIM, J. PAULO: Drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations. In: *Procedia Manufacturing* Bd. 54 (2021), S. 284–289
- [3] GEIER, NORBERT ; XU, JINYANG ; POÓR, DÁNIEL ISTVÁN ; DEGE, JAN HENDRIK ; DAVIM, J. PAULO: A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 266 (2023), S. 111037
- [4] HINTZE, WOLFGANG ; HARTMANN, DIRK ; SCHÜTTE, CHRISTOPH: Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. In: *Composites Science and Technology* Bd. 71 (2011), Nr. 15, S. 1719–1726
- [5] WANG, CHANGYING ; LIU, GONGYU ; AN, QINGLONG ; CHEN, MING: Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 109 (2017), S. 10–22
- [6] AHMAD, JAMAL: *Machining of Polymer Composites*. Boston, MA : Springer US, 2009 — ISBN 978-0-387-35539-9
- [7] VOSS, ROBERT ; SEEHOLZER, LUKAS ; KUSTER, FRIEDRICH ; WEGENER, KONRAD: Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Bd. 18 (2017), S. 75–91
- [8] GEIER, NORBERT: Influence of fibre orientation on cutting force in up and down milling of UD-CFRP composites. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 111 (2020), Nr. 3, S. 881–893
- [9] LI, HAO ; QIN, XUDA ; HE, GAIYUN ; JIN, YAN ; SUN, DAN ; PRICE, MARK: Investigation of chip formation and fracture toughness in orthogonal cutting of UD-CFRP. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 82 (2016), Nr. 5, S. 1079–1088
- [10] LIU, CONGLE ; REN, JUNXUE ; SHI, KAINING ; ZHANG, YALI: Investigation of fracture mechanism evolution model for UD-CFRP and MD-CFRP during the milling process. In: *Composite Structures* Bd. 306 (2023), S. 116585
- [11] SUNDI, S. A. ; IZAMSHAH, R. ; KASIM, M. S. ; JAAFAR, M. F. ; HASSAN, M. H.: Milling/Trimming of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP): Recent Advances in Tool Geometrical Design. In: HAMEED SULTAN, M. T. ; AZMI, A. I. ; MAJID, M. S. A. ; JAMIR, M. R. M. ; SABA, N. (Hrsg.): *Machining and Machinability of Fiber Reinforced Polymer Composites*. Singapore : Springer, 2021 — ISBN 978-981-334-153-1, S. 101–128
- [12] GEIER, NORBERT ; PÓKA, GYÖRGY ; JACSÓ, ÁDÁM ; PERESZLAI, CSONGOR: A method to predict drilling-induced burr occurrence in chopped carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites based on digital image processing. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 242 (2022), S. 110054
- [13] GERMAN, RANDALL M.: *Particulate Composites*. Cham : Springer International Publishing, 2016 — ISBN 978-3-319-29915-0
- [14] MUSSATTO, ANDRE ; AHAD, INAM UI ; MOUSAVIAN, REZA TAHERZADEH ; DELAURE, YAN ; BRABAZON, DERMOT: Advanced production routes for metal matrix composites. In: *Engineering Reports* Bd. 3 (2021), Nr. 5, S. e12330
- [15] GEIER, NORBERT ; MAGYAR, GERGELY: Advanced allowance planning of CFRP composites exploiting the pattern of chopped carbon fibre reinforcement clusters. In: *Procedia CIRP, 3rd CIRP Conference on Composite Material Parts Manufacturing (CCMPM2024)*. Bd. 131 (2025), S. 130–135