

1. ÁBRA. Közelkép az arapaima (*Arapaima gigas*) hal pikkelyeiről, amelyek ellenálló képességét a Bouligand-struktúra erősíti (Forrás: Shutterstock)

BUJTOR LÁSZLÓ* – REZSABEK NÁNDOR**

BOULIGAND-STRUKTÚRA A VÉDELMI IPARBAN

TERMÉSZETINSPIRÁLT STRUKTÚRÁK HADIIPARI ALKALMAZÁSAI

Összefoglalás: A bioinspirált szerkezetek közé tartozó Bouligand-struktúra (helikális, csavartfurnérlemez-mintázat) különleges előnyökhöz juttatja alkalmazóit az állat- és növényvilágban. A kutatása során szerzett ismeretek megjelennek a polgári repülőgépiparban, de alkalmazási területei továbbra mutatnak, és a védelmi ipar valamennyi területére kiterjednek (testpáncélok, kerek és láncaltalpas járművek, merev és forgószárnyas repülőeszközök). A struktúrát Európában fedezték fel, ám alkalmazott ipari kutatásában 2005 óta Kína vezet, komoly lemaradásba hozva a világ többi részét.

Kulcsszavak: Bouligand-struktúra, bioinspirált szerkezetek, mechanikai ellenállás, helikális csavartfurnérlemez-mintázat, természetes bőrpáncél, additív gyártástechnológia

Abstract: The Bouligand structure (helical, twisted plywood pattern) belongs to the bio-inspired constructions providing advantages to its applicants in the animal and plant world. Knowledge based on their research appeared in the civil aviation industry; however, the application is far beyond it. It covers all the fields of defence industry (body armours, wheeled and caterpillar vehicles, fixed winged and rotorcraft planes). The structure was discovered in Europe, but since 2005 China became the leader in the field of industrial applied research causing serious backlog to the rest of the world.

Keywords: Bouligand structure, bio-inspired structures, mechanical resistance, helicoidal twisted plywood pattern, natural dermal armour, additive manufacturing

* PhD, tanszékvezető egyetemi docens, Eszterházy Károly Katolikus Egyetem, TTK, Földrajz és Környezettudományi Intézet. ORCID: 0000-0001-9699-7711

** MSc, Nemzeti Községi Katonai Műszaki Doktori Iskola, doktorandusz. ORCID: 0009-0002-4885-4438

BEVEZETÉS

Az ízeltlábúak jelenleg Földünk legalkalozdagabb és legnagyobb fajszámú élőlénycsoportját alkotják. A legelfogadottabb becslések szerint [1] bolygónkon jelenleg 5–10 millió ízeltlábú faj élhet. Ezek közül 1 215 000 fajt írtak le tudományos igénnyel. [2] Az ízeltlábúak kiemelkedő sikerének titka sokrétű, fontos szerepet játszik benne változatos testfelépítésük, külső, kitines vázuk, alkalmazkodóképességük, gyors szaporodási ciklusuk, reprodukció stratégiájuk [3] és

testük rugalmas alapszerkezete, „body plan”-je. A külső, kitines váz nemcsak összetartja, védi, és merevíti az állatot, hanem különleges, összetett belső szerkezettel is rendelkezik. [4] A kitines külső váz mikroszkopikus vizsgálata során, már a múlt század elején megkezdődött [5], és különleges hiperszerkezete is csaknem 70 éve ismert. [6] A bonyolult, lamelláris felépítés, illetve a lamellák között furcsa, azokat metsző struktúrák magyarázatára azonban várni kellett egészen a pásztázó elektronmik-

roszkópos (Scanning Electron Microscope – SEM) technika megjelenéséig. A technika birtokában sokkal részletesebben tárult fel az ízeltlábúak kitines külső vázának felépítése. Elsők között a rákfélék (*Crustacea*) exoskeletonjának vizsgálatára összpontosítottak a kutatók, hiszen régóta ismert, hogy a rákfélék a vedlés után nem sokkal már képesek táplálkozni, prédát ejteni és azt feldarabolni. Ez azért figyelemre méltó, mert a vedlés utáni puha, ásványi anyaggal még nem teljesen megerősített rákolló képes egyéb, ugyancsak meszes vázú élőlény (akár puhatestűek, akár rákfélék) kemény páncélját áttörni, össze-úzni úgy, hogy a gazdaállatnak ez nem okoz sérülést vagy az ollók törését.

A vizsgálatok során a francia Yves Bouligand [7] tárta fel és adott magyarázatot a különleges hiperszerkezet valódi természetére: a kitines váz lamellás rétegeiben az állat által kiválasztott szerves kollagén irányítottan helyezkedik el, és ezen irányított elhelyezkedésű rétegekben-csővecskékben (vagy azok körül és között) irányítottan nő és alakul ki a szerves anyag, ami legtöbbször kalcitkristályok formájában jelenik meg. Az irányítottság azt jelenti, hogy minden rétegben a kollagén rostok iránya né-

hány fokkal ($5-30^\circ$ között) elfordul az alatta elhelyezkedőhöz képest, és az egyes rétegek mintegy spirálalakban forognak a váz felszínére merőleges orientációban, jellegzetes, helikális rétegrendet hozva létre. (2. ábra) Bármely metszetben vizsgáljuk a kitines vázat, ugyanazt fogjuk látni: jellegzetes, ritmusosan ismétlődő struktúrát, amelyek makroszkopikusan párhuzamos lamelláknak tűnnek és mintha parabolához hasonló ívelt szerkezetet mutatnának. Bouligand kiválóságát és felismerésének úttörő voltát mutatja, hogy évekkel később is voltak, akik az egymáshoz képest elforduló rétegek által virtuálisan létrehozott parabolikus leképezést valódi, hajlott lamellaként magyarázták. [8] Yves Bouligand fejtette meg tehát az enigmatikus struktúrát, és ezzel beláthatatlan távlatokat nyitott, melyek messze túlmutatnak a biológián.

BOULIGAND-STRUKTÚRÁK A TERMÉSZETBEN

A 3,5 kg tömeget is elérő mangrove-rák (*Scylla serrata*) ollójának hossza elérheti a 15 cm-t. Ollóinak belső, igénybevételnek leginkább kitett részein zápfoghoz hasonló képletek találhatók, melyek szinte mindent összeroppantanak, amit harapófogóba vesznek. Kimutatták [9], hogy ezeknek a törőgumóknak a külső élein, azaz a koronarégióban megjelenik a Bouli-

gand-struktúra, ami extra erősséget ad az ollónak.

A rákok egy másik csoportjánál, a sáskarákok közé tartozó sekélytengeri pisztolyráknál (*Odontodactylus scyllarus*) immár nem az ollóban, hanem az egyik módosult lábban mutatták ki a Bouligand-struktúra jelenlétét. [10] Az állat torszervényének második pár függeléke úgy módosult, hogy annak vége furkósbót- vagy dobverőszerűen megvastagodott. A függelék mozgása eléri a 23 m/s sebességet és a 104 m/s^2 gyorsulást, mellyel kavitációs buborékokat gerjeszt. [11] Ezek a rákok az ütőerő mellett a robbanásszerű lökeshullámokkal szedik áldozataikat, amivel a saját méretüknél (mindössze 10 cm) tízszer nagyobb prédát is el tudnak ejteni. Rendkívül hatékony fegyverük ütőfelületét ugyancsak Bouligand-struktúra teszi ellenállóvá.

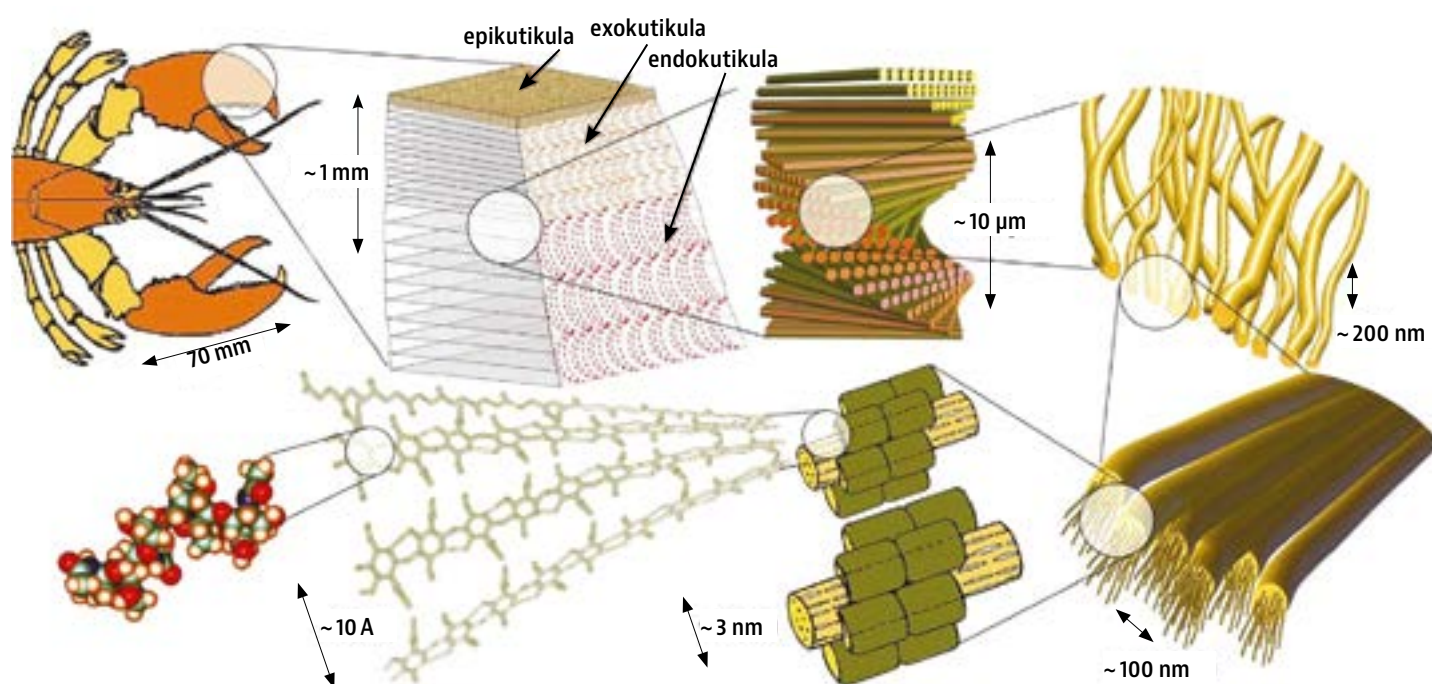
A hangyák körében az ázsiai pattanóhangya (*Odontomachus monticola*) rendelkezik a leggyorsabb támadó függelékkel. Rágóikat nagy erővel és figyelemre méltó gyorsasággal csatintják össze. Ám ez mit sem érne a megfelelően ellenálló felület nélkül. Kimutatták, hogy ezek a hangyák nem egyszerűen a Bouligand-féle helikálisan forgó rétegeket alkalmazzák, hanem annál egy fokkal bonyolultabbat: a lamelláris rétegek nem sima felületűek, hanem azokon szinuszhullám-szerű, kétdimenziós kiemelkedések-be-

mélyedések futnak végig az egész felületen. [12]

Természetesen nemcsak az ízeltlábúak körében találjuk meg a Bouligand-struktúrát. Az Amazonas-folyamban élő arapaima (*Arapaima gigas*) esetében is megjelenik. (1. ábra) Ez a hatalmas, olykor 3 méter hosszúságúra megnövő hal dacol az Amazonas rettegett ragadozóival, a piranhákkal, ami ismét a Bouligand-struktúrának köszönhető: a természet jelenleg ismert legkeményebb szerves anyagával ugyanis az arapaima rendelkezik. Pikkelyeinek külső felszínéhez közel ismét csak a Bouligand-struktúra erősíti az egyébként is igen kemény pikkely mechanikai ellenállóképességét. Ám az arapaimának van egy másik trükkje is: pikkelyei átfedésben borítják testét, s olykor nem is kettős, hanem három pikkely fed át egymást. Ezek olyan, háromrétgű flexibilis testpáncélt alkotnak [13][14], amiről máshol nem tudunk a természetben.

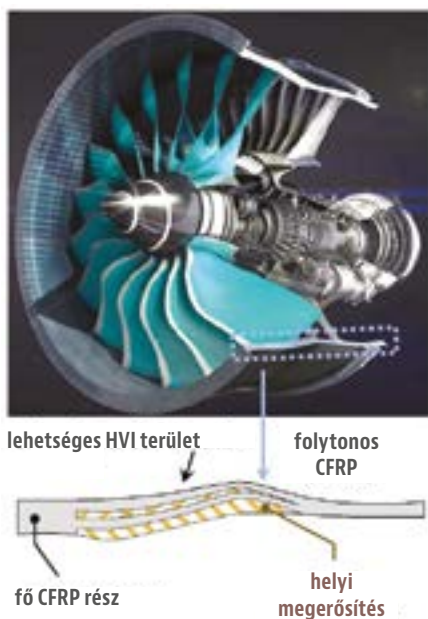
A mélytengerekben él az – egyébként élő kőületnek számító – bojtosúszós hal (*Latimeria chalumnae*), mely ugyancsak nagyra nő és sokáig él: testhossza eléri a 2,2 métert, és akár 48 évig él. [15] A különféle cápafajok kedvelt zsákmányállata. Passzív védelmi rendszerében (pikkelyeiben) természetesen ott van a Bouligand-struktúra, ám ezúttal annak különleges változata, az úgynevezett kettős

2. ÁBRA. A *Homarus americanus* (amerikai homár) ollójának keresztmetszete az összetett, szerves és szervetlen anyagból felépülő hiperszerkezettel. Az 1 mm-es felbontású ábrarészleten körrel jelölt kiemelésből felnagyított 10 mikronos ábra mutatja be a Bouligand-struktúrát, majd annak egyre nagyobb felbontásban ábrázolt hiperszerkezetét (A szerzők szerkesztése a [45; fig. 1] alapján az © Elsevier B.V. engedélyével)



3. ÁBRA. A Bouligand-struktúra első nyilvános ipari alkalmazása Rolls-Royce repülőgép-hajtómű kompresszorházában. A hajtómű héjálásában alkalmazott összetett, változó elfordulásszögű, kompozit CFRP és PBO szerkezet anyagfajtánként eltérő forgási szöggel gyártott rétegeket tartalmaz. A rétegrend függőleges tengelye és a Bouligand-struktúra helikális tengelyei egybeesnek (A szerzők szerkesztése a [19; fig. 1] alapján az © Elsevier B.V. engedélyével)

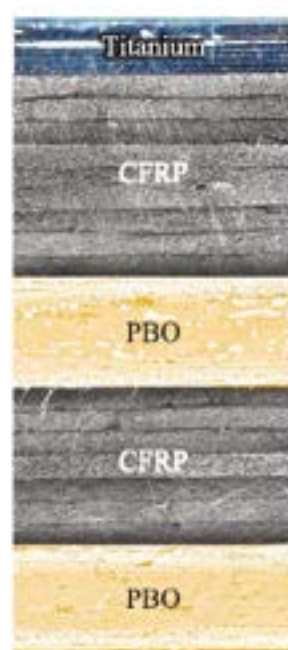
REPÜLŐGÉP-HAJTÓMŰ METSZETE



BIOINSPIRÁLT (BI) DIZÁJN



ÁTALPOLT HIBRID DIZÁJN



Bouligand-struktúra jelenik meg [16], amelyben két helikális Bouligand-rétegrend szuperponálódik, mégpedig úgy, hogy nem egy-egy réteg fordul el egymás fölött meghatározott szöggel, hanem kettesével helyezkednek el az elforduló rétegek, melyek egymáshoz képest 90° -kal elfordulva, párosával végzik a helikális forgást az állat kultakájára merőlegesen.

A növényvilágban szintén ismert a Bouligand-struktúra: az afrikai márványbogyó (*Pollia condensata*) nevű növény termésének héjában található meg a helikális struktúra. Meghökkenő módon itt nem a szilárdítás vagy a mechanikai ellenállóképesség fokozása érdekében jelenik meg ez a szerkezet, hanem azért, hogy a Bragg-reflexió révén strukturális (irizáló sötétkék) szint hozzon létre. [17]

Egy utolsó példával zárjuk az áttekintést: mi, emberek sem vagyunk kivételek. Az emberi fog cementanyagában is kimutatták a Bouligand-struktúra jelenlétét [18], mely a mi testünkben fogaink ellenállóképességének növelésében játszik szerepet.

Általános, egymástól igen távoli élőlénycsoportokban találjuk meg tehát az egymás fölött spirál alakban elforduló (helikális) rétegekből álló szerkezetet, a Bouligand-struktúrát. Az anyagszerkezeti kutatások a 2000-es években gyorsultak fel, de az igazi

áttörés és az első tényleges ipari alkalmazás megjelenésére csaknem negyedszázadot kellett várni.

A BOULIGAND-STRUKTÚRA AZ IPARBAN

A Bouligand-struktúra első, nem kísérleti jellegű, hanem ipari bevezetés előtt álló termékfejlesztését a Rolls-Royce cég által gyártott repülőgép-hajtómű burkolatában történő alkalmazással jelentették be. [19]. Régóta ismert, hogy a repülőgép-balesetek jelentős részében a madárral történő ütközés nagy szerepet játszik, és ez a kiszámíthatatlan jelenség kivédhetetlen kockázati tényezőt jelent. Mivel aktív védelmi megoldások nincsenek (vagy nem teljeskörűek), a mérnökök figyelme a passzív védelmi megoldások felé fordult. A madárral történő ütközéses baleseteknél nemcsak a rotor- vagy kompresszorlapátokba csapódó madártest által előidézett rombolás okozhat fatális sérülést a hajtóműben/rotorban, hanem a hajtómű bármely részéhez történő nekicsapódás is komoly károkat okoz. A Rolls-Royce által kifejlesztett megoldás (3. ábra) a világon először alkalmazza a Bouligand-struktúrát repülőgép-hajtómű esetében a burkolat ellenállóképességének megerősítésére. [19] A különlegesen összetett, többszörösen hierarchikus szerkezetet

CFRP (Carbon Fibre-Reinforced Polymer – karbonszál-erősítésű polimer) és PBO anyagok (P-fenilén-2,6-benzobisoxazole vagy Zylon fiber, az ember által 1980-as években előállított legerősebb műszál) szendvicsszerkezetű összeépítésével és azokon belül a Bouligand-hoz hasonló hierarchikus struktúra alkalmazásával valósították meg [20], amihez egy modern, rohamosan fejlődő eljárást, az additív gyártástechnológiát alkalmazták. [21]

VÉDELMI IPARI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEK

A jelenleg nyilvánosan is hozzáférhető információk alapján tehát a Bouligand-struktúra alkalmazása már létezik a fejlett gyártástechnológiában, sőt sikeres kísérleti alkalmazáson van túl a polgári repülőgépiparban. Biztosak lehetünk abban, hogy haditechnikai alkalmazása is létezik, még ha az nem is nyilvános. Ugyanis a Bouligand-struktúra figyelemre méltó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik [22] az alkalmazása során:

1. a CFRP anyagban 27%-kal nagyobb energiaelnyelés érhető el a becsapódáskor, mint struktúra nélküli polimerben;
2. 54–83%-kal nagyobb hajlítási szilárdságot és becsapódás utáni szilárdságot értek el üvegszál-as epoxi-gyanta kompozitokban, mint a struktúra

nélküli, avagy standard kompozit mintákban;

3. kis méretű lövedék behatolása esetén 33–87%-kal nagyobb energiaelnyelés érhető el CFRP, kevlar és endumax (nagy teljesítményű, aramid-alapú UHMWPE-szál – Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene, azaz ultranagy molekulásúlyú polietilén) kompozitokban, mint a struktúra nélküli standard vagy izotróp mintákban; [23]

4. a Bouligand-struktúra alkalmazása során az elfordulási szög jelentős hatással van az energiaelnyelés mértékére. Általános tapasztalat [22][23], hogy a kis elfordulási szögű ($5^\circ < \alpha < 20^\circ$) helikális struktúra jobb teljesítményt nyújt, mint a nagy elfordulási szögű struktúrák;

5. lövedék becsapódása esetén a legnagyobb energiaelnyelés az összetett, Bouligand-féle helikális és kereszttezett rétegrend kialakításával érhető el – függetlenül az alkalmazott kompozit anyagától. [10][19][21]

A Bouligand-struktúra védelmi ipari felhasználásának szinte végtelen lehetősége van, ezeket az alábbiak szerint lehet csoportosítani:

- személyi védelmi eszközök (testpáncél, sisak);
- harcjárművek páncélvédelme;
- merev szárnyú repülőgépek sárkányszerkezetének megerősítése;
- forgószárnyas repülőgépek rotorlapátainak védelme;
- hajótestek héjalásának védelme.

SZEMÉLYI VÉDELMI ESZKÖZÖK

A személyi védelmi eszközök között első helyen a flexibilis testpáncélok van jelentősége és kiemelt szerepe. Megjegyezzük, hogy a természetben 380 millió évvel ezelőtt, a devon időszaki páncélosalaknál (*Placodermi*) jelent meg először a védőpáncél. [24] A páncélok fejlesztése jelenleg több szálon fut, különböző bioinspirált megoldások felhasználásával is (3. ábra):

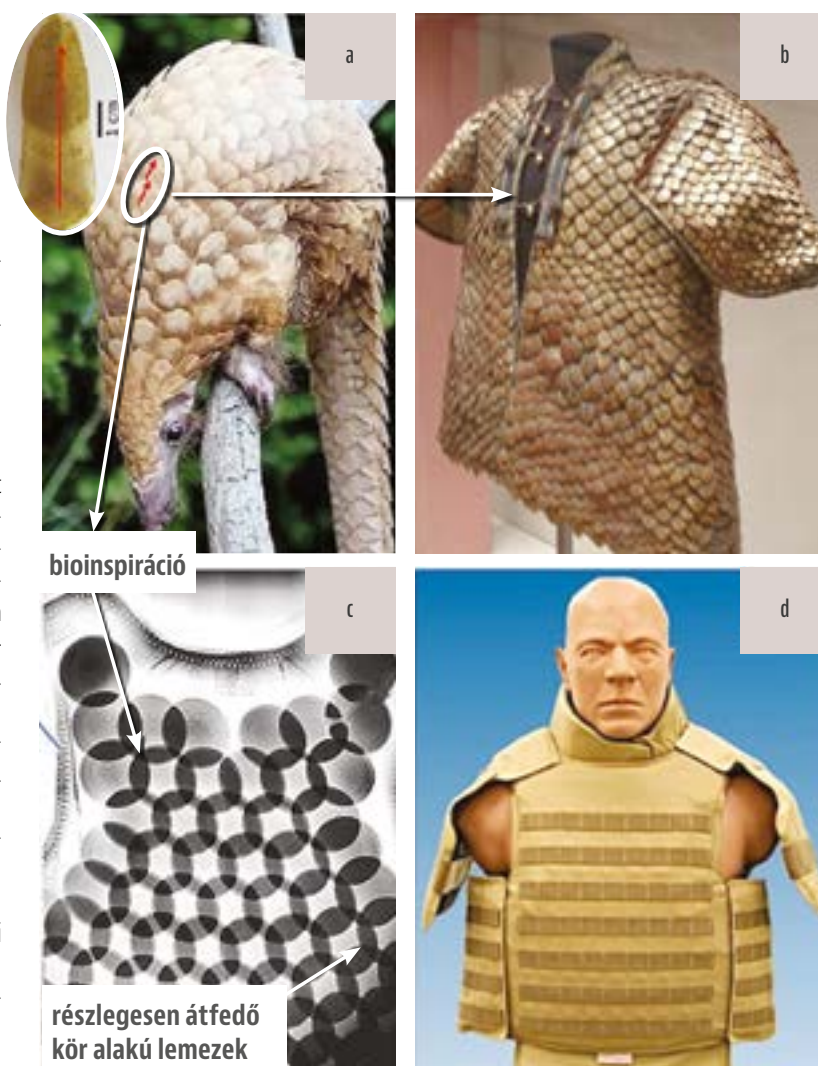
- mikrostrukturált elasmoid pikkelypáncél [25]
- szintetikus „halbőr” [26]
- kerámiapikkely borítású, kétrétegű flexibilis anyag [27]
- arapaima inspirálta flexibilis kerámiapikkely páncél [28]
- sárkánybőrpáncél [29]

HARCJÁRMŰVEK PÁNCÉLVÉDELME

Az I. világháború elején gyártott harckocsik páncélzata még csak 8–14 mm vastag acél páncéllemezekből állt. Az 1930-as években páncélzatuk vastagsága még mindig ritkán haladta meg a 15 mm-t, ám egyre jobb minőségű, egyre nagyobb Brinell keménységi számmal (Brinell Hardness Number – BHN) jellemezhető páncélt alkalmaztak. A II. világháború kitörésével a helyzet megváltozott, az 1941-es szovjet KV harckocsi frontpáncélja már 75 mm vastag volt, majd a páncélzat vastagsága megállíthatatlanul nőtt. Az 1944-ben gyártott Tigris II frontpáncélja 150 mm, míg toronypáncélja már 185 mm vastag volt. A háború végén a Jagdtiger frontpáncélja már 250 mm vastag volt, és a páncélvadász tömege elérte a 71,7 tonnát. Ezt követően új anyagok jelentek meg a harckocsiépítésben, mint a szendvics- vagy kompozitszerkezetek. Mindenesetre érdekes, hogy a Bouligand-struktúra tulajdonságait

figyelmén kívül hagyva, a U.S. Army M113 páncélozott csapatszallító járművének 1989-es kísérleti változata poliészter hőtűrő gyantába ágyazott üvegszálból készült paneleket kapott. [30] A csapatszallító járműveknél a belső tér védelme kiemelt jelentőségű. Az ilyen eszközök Bouligand-struktúra felhasználásával történő tervezésénél útmutató lehet a pisztolyrak függelékének rafinált, irány- és helyfüggő belső szerkezete, mely funkciótól függően eltérő vastagságban alkalmazza a Bouligand-struktúrát.

Természetesen az ilyen jellegű fejlesztésekről és haditechnikai alkalmazásokról szinte lehetetlen nyilvános információt beszerezni. A 6. ábrán a 25 évig érvényes titkosítás után feloldott amerikai Abrams M1 harckocsi orr-részeinek különleges páncélzat-kialakítását láthatjuk. A váltótípus AbramsX néven 2022-ben mutatkozott be, melynek tömege jóval kisebb, mint a jelenleg gyártott M1A2 SEPv3 változaté, de



4. ÁBRA. Bioinspirált testpáncélok egykor és ma: (a) tobzoska és egymást részlegesen átfedő pikkelyei; (b) történelmi páncéldíszing, amit a Brit Keletindiai Társaság 1820-ban küldött III. György királynak. A páncéling aranyozott tobzoska pikkelyekből készült; (c) modern „sárkánybőr-páncél” röntgensugárral átvilágított képe; (d) sárkánybőrpáncél védelmi eszköz a gyakorlatban (A szerzők szerkesztése a [29; fig. 22] alapján az © Elsevier B.V. engedélyével)

5. ÁBRA. Az 1978-tól 1992-ig gyártott amerikai M1 Abrams harckocsi 1988-as, Chobham különleges páncélzattal szerelt változatának titkosítás alól feloldott vázrajza a homlokpáncélban alkalmazott összetett szendvicsszerkezettel (A szerzők szerkesztése a [44] alapján)

„...a kompozit páncélzatok részletes felépítését az alkalmazó országok titokban tartják.” [31] Ez olyannyira igaz, hogy a Magyar Honvédség legújabb, Leopard 2A7HU típusú harckocsijának páncélzatáról is csak annyi tudható, hogy kazamatás, kompozitszerkezetű síklemez páncélzattal rendelkezik. [32] Ám az új AbramsX harckocsi tömegcsökkenésében egészen biztosan nemcsak az játszik szerepet, hogy löveg-tornya alig páncélozott, hanem az új szerkezeti anyagok és páncélzatok alkalmazásának is szerepe lehet. A 6. ábrán látható energiaelnyelő, összetett szendvicspanelelekben nagy valószínűséggel ma már Bouligand-struktúrájú, új fejlesztésű szerkezeti anyagokat találunk, hasonló konfigurációban elhelyezve, mint 1988-ban.

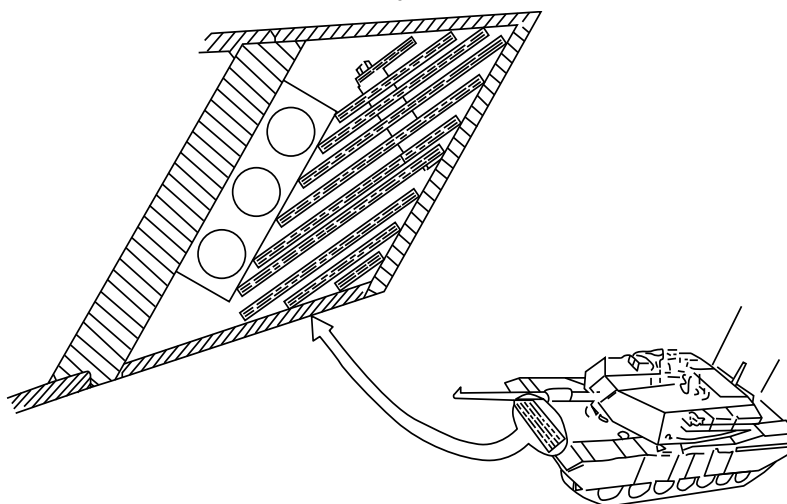
REPÜLŐGÉP-SÁRKÁNY-SZERKEZETEK VÉDELME

Az 1940-ig épített könnyű és nehéz vadászpilóta gépeket többnyire nem terhelte páncélzat, nemigen foglalkoztak a gépek passzív védelmével [33]. A repülőgép-sárkányszerkezetek esetében a Bouligand-struktúra alkalmazásának egyértelmű haszna a tömeg csökkentése, hiszen ugyanolyan paraméterekkel rendelkező sárkányszerkezet ezen struktúra alkalmazásával kisebb tömegű anyagfelhasználással biztosítható, ami kevesebb üzemanyagfelhasználást és/vagy nagyobb teherbíróképességet eredményez.

FORGÓSZÁRNYAS REPÜLŐESZKÖZÖK ROTORLAPÁTJAI

Ezen a területen a védelmi ipari felhasználás tökéletesen megegyezik a villamosenergia-termelő iparban jelentkező igényekkel: a nagyméretű, hosszú (akár 100 méter hosszúságot is elérő) szélkerék-lapátok és a kisméretű, de nagy fordulatszámú helikopter-rotorlapátok ugyanazt az igényt fogalmazzák meg: belépőélük az állandó terhelésnek és a véletlenszerű, kiugróan nagy mechanikai igénybevételnek (madárütközés, lövedékbecsapódás) is ellenálló legyen. [34] Nyilvános adatok inkább a szélturbinák lapátairól olvashatók. Ezek alapján a sérülések mintegy 20%-át a felszíni sérülések, 15%-át pedig gyártási hibák okozzák, [35] melyek elvben kiküszöbölhetők. A helikopter-rotorlapátok

A KOCSISZEKRÉNY MELSŐ, KÜLÖNLEGES PÁNCÉLZATA



harci sérülések okozta javítási potenciáljának modellezése is hasonló feladatot jelent, [36] és biztos állítható, hogy ezen felhasználási területen a felszíni, nagy energiájú ütközések okozta sérülések aránya jóval nagyobb.

HAJÓTESTEK KÜLSŐ FELÜLETÉNEK MECHANIKAI ERŐSÍTÉSE

Az úszóeszközök esetében mind a felszín alól (torpedó, úszóakna), mind a felszínről (levegő-levegő vagy föld-levegő rakéta, közvetlen bombatámadás stb.) érkező fenyegetés ellen a felület ellenállóképességének növelése, valamint roncsolódásának csökkentése az elsődleges cél. A tömegcsökkentés nem elsődleges szempont, ezért ugyanolyan tömegű úszótest esetében a mechanikai ellenállóképesség többszörözhető. Érdekes, hogy a U. S. Navy a 2000-es évek végén is elsősorban a hagyományos, szendvicsszerkezetű energiaelnyelő panelekben látta a jövőt, [37] és nincs nyoma annak, hogy az innovatív Bouligand-struktúra felhasználásában keresték volna a megoldást.

ÖSSZEFOGLALÁS

A különféle kutatások kimutatták, hogy a Bouligand-szerkezetek nemcsak biológiai érdekességek, hanem igen komoly mechanikai, szilárdsági, ellenállási stb. paraméterekkel bírnak, ezért ipari kutatásuk a 2000-es évektől fogva felgyorsult. Ötven évvel ezelőtt Európa vezető szerepet játszott ezen a területen [5][6][7], ám mára a kutatás-fejlesztés és technológia súlypontja Kínába tevődött át. A bioinspirált szerkezetek anyagszerkezeti ku-

tatásában Kína sokkal előrébb tart, mint Európa vagy az USA. Megkockáztatjuk, hogy az elért anyagszerkezeti kutatásoknak is szerepe van Kína hadiflottájának növekedésében. 2010 és 2019 között ugyanis a Kínai Népköztársaság 150, míg az USA mindössze 49 hadihajót bocsátott vízre. [38] Egyes projekciók szerint 2027-re a Kínai Néphadsereg hadiflottájának egyesített tüzereje meghaladja az USA hasonló képességeit. [39] Jelenlegi technológiánk jövőbeli fejlesztésében, különösen az innováció szempontjából kulcsszerepet játszó védelmi és repülőgépiparban a bioinspirált szerkezetek és az additív gyártástechnológia kulcsszerepet játszanak. A védelmi ipar és ezzel egy ország védelmi képességének fejlettsége nagymértékben függ a bioinspirált szerkezetek védelmi ipari alkalmazásától. [40] A Bouligand-struktúrát alkalmazó nanotechnológia ugyan még gyerekcipőben jár, de már léteznek az első prototípusok. [19][29][41] A technológia robbanásszerűen fejlődik Kínában, ahol már elektromos mező által támogatott 3D nyomtatási eljárást alkalmaznak, [42] hogy betekintést nyerjenek a Bouligand-struktúrák természetes anyagkeményítő-erősítő mechanizmusába. Áttekintésünk alapján a védelmi iparnak alig van olyan területe, ahol ne fordulna elő a Bouligand-struktúra kísérleti, vagy sorozatgyártású alkalmazása. A haditechnikai kutatás-fejlesztés stratégiai szinten befolyásolja az alkalmazó állam katonai, politikai és iparpolitikai folyamatait. [43]

HIVATKOZÁSOK

- [1] Ødegaard, F.: How many species of arthropods? Erwin's estimate revised. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2000/4, 583–597.
- [2] Stork, N.E.: How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on Earth? *Annual Review of Entomology*, 2018, 63, 31–45. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043348>
- [3] Singh, A.: r-Reproductive Strategy. In: Vonk, J. – Shackelford, T. (eds.): *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior*. Springer, Cham 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47829-6_450-1
- [4] Hadley, N. F.: The arthropod cuticle. *Scientific American*, 1986, 255/1, 104–113.
- [5] Hass, W.: Über die Struktur des Chitins bei Arthropoden. *Archiv für Anatomie und Physiologie, Physiologische Abteilung, Jahrgang 1916*, 1917, 295–338.
- [6] Drach, P.: Structure des lamelles cuticulaires chez les Crustacés. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Paris*, 1953/237, 1772–1774.
- [7] Bouligand, Y.: Twisted fibrous arrangements in biological materials and cholesteric mesophases. *Tissue & Cell* 1972/2, 189–217. [https://doi.org/10.1016/s0040-8166\(72\)80042-9](https://doi.org/10.1016/s0040-8166(72)80042-9)
- [8] Mutvei, H.: SEM studies on arthropod exoskeletons. *Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala*, N.S. 1974, 4, 5, 73–80.
- [9] Inoue, T. et al.: Mechanical resistance and tissue structure of claw denticles of various sizes in the mud crab, *Scylla serrata*. *Materials*, 16: 2023/4114, 12. <https://doi.org/10.3390/ma16114114>
- [10] Grunfelder, L. et al.: Bio-inspired impact resistant composites. *Acta Biomaterialia* 2014/9, 3997–4008. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.03.022>
- [11] Patek, S. N. et al.: Deadly strike mechanism of a mantis shrimp. *Nature*, 2004/428, 819–820.
- [12] Zhao, S. et al.: A study of a bio-inspired impact resistant carbon fiber laminate with a sinusoidal helicoidal structure in the mandibles of trap-jaw ants. *Acta Biomaterialia* 2023/169, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2023.07.047>
- [13] Lin, J. S. et al.: Mechanical properties and the laminate structure of *Arapaima gigas* scales. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2011/4, 1145–1156. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.02.024>
- [14] Sherman, V. R. et al.: A comparative study of piscine defense: The scales of *Arapaima gigas*, *Latimeria chalumnae* and *Atractosteus spatula*. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2017/73, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.10.001>
- [15] Froese, R. – Palomares, M. L. D.: Growth, natural mortality, length-weight relationship, maximum length and length-at-first-maturity of the coelacanth *Latimeria chalumnae*. *Environmental Biology of Fishes*, 2000/58, 45–52.
- [16] Giraud, M. M. et al.: The fibrous structure of coelacanth scales: a twisted 'plywood'. *Tissue & Cell*, 1978/4, 671–686.
- [17] Vignolini, S. et al.: Pointillist structural color in *Pollia* fruit. *PNAS*, 2012/39, 15712–15715. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210105109>
- [18] Yamamoto, T. et al.: Twisted plywood structure of an alternating lamellar pattern in cellular cementum of human teeth. *Anatomy and Embryology*, 2000, 202, 25–30.
- [19] Kazemi, M. E. et al.: Ballistic performance of bio-inspired hybrid inter-leaved composite structures suitable for aerospace applications. *Composites Part A*, 2024, 179: 107992, 12. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107992>
- [20] Kazemi, M. E. et al.: Bio-inspired interleaved hybrids: Novel solutions for improving the high-velocity impact response of carbon fibre-reinforced polymers (CFRP). *Composites Part B*, 2023, 264, 110930. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110930>
- [21] Ghazlan, A. et al.: Inspiration from Nature's body armours – A review of biological and bioinspired composites. *Composites Part B*, 2021, 205: 108513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108213>
- [22] Amorim, L. et al.: Bioinspired approaches for toughening of fibre reinforced polymer composites. 2021. *Materials and Design* 199: 109336, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109336>
- [23] Liu, J. L. et al.: The response of bio-inspired helicoidal laminates to small projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 142, 103608. <http://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103608>
- [24] Yang, W. et al.: Natural flexible dermal armor. *Advanced Materials*, 2013/25, 31–48. <https://doi.org/10.1002/adma.201202713>
- [25] Rudykh, S. – Boyce, M. C.: Analysis of elasmoid fish imbricated layered scale-tissue systems and their bio-inspired analogues at finite strains and bending. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 2014/5, 830–847. <https://doi.org/10.1093/imamat/hxu005>
- [26] Funk, N. et al.: Bioinspired fabrication and characterization of a synthetic fish skin for the protection of soft materials. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2015/10, 5972–5983. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b00258>
- [27] Martini, R. – Barthelot F.: Stability of hard plates on soft substrates and application to the design of bioinspired segmented armor. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, July 2016, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.04.009>
- [28] Meyers, M. A. et al.: Battle in the Amazon: *Arapaima* versus *Piranha*. *Advanced Engineering Materials* 2012/5, B279–B288. <https://doi.org/10.1002/adem.201180027>
- [29] Islam, M. K. et al.: Biomimetic armour design strategies for additive manufacturing: A review. *Materials & Design* 2021/7, 109730. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109730>
- [30] Ogorkiewicz, Richard M.: *Technology of Tanks I*. Jane's Information Group, Alexandria (VA), USA, 2009, 1–424.
- [31] Ocskay István: Harckocsi-generációk II. rész. *Haditechnika* 2023/2, 6–13. <https://doi.org/10.23713/HT.57.2.02>
- [32] Végvári Zsolt: Modern haditechnika, új konstrukciós megoldások és szerkezeti anyagok, megújuló képzés. *Haditechnika*, 2023/3, 58–67. <https://doi.org/10.23713/HT.57.3.10>
- [33] Dobos Endre: A katonai repülőgépek páncélvédelmének fejlődése a kezdetektől a II. világháború végéig. *Hadmérnök* 2009/2, 206–216.
- [34] Ginzburg, D. et al.: Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact. *Composite Structures*, 2017/2, 187–203. <https://doi.org/10.1016/j.compsruct.2016.10.097>
- [35] Sebastiani, A. et al.: Evaluation of the global-blockage effect on power performance through simulations and measurements. *Wind Energy Science*, 2022/2, 875–886. <https://doi.org/10.5194/wes-7-875-2022>
- [36] Chiu, W. K. et al.: Battle damage repair of a helicopter composite main rotor blade. *Composites: Part B*, 2012/2, 739–753. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.07.014>
- [37] Mantena, P. R. et al.: Blast and impact resistant composite structures for Navy ships. *University of Mississippi*, 2013, 298.
- [38] Palmer, A. et al.: Unpacking China's Naval Buildup. 2024. <https://www.csis.org/analysis/unpacking-chinas-naval-buildup> (Letöltve: 2025.03.23)
- [39] Pape, A.: *Jane's Fighting Ships Yearbook 2023–2024*. Jane's Information Services, Coulsdon, Surrey, Greater London, England, 2023, ISBN 978-071-063-428-3
- [40] Chen, S.-M. et al.: Biomimetic discontinuous Bouligand structural design enables high-performance nanocomposites. 2022, *Matter* 5, 1563–1577. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2022.02.023>
- [41] Siddique, S.H. et al.: Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption – A review. *Additive Manufacturing*, 2022, 58, 103051. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103051>
- [42] Wei J. et al.: Bioinspired Additive Manufacturing of Hierarchical Materials: From Biostructures to Functions. *Research* 2023/6, 0164, 1–24. <https://doi.org/10.34133/research.0164>
- [43] Budavári Krisztina et al.: A magyar védelmi ipar innovációs környezetének vizsgálata. *Hadtudomány* 2022/1, 113–134. <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2022.32.1.113>
- [44] M1 Abrams Hull Front Special Armor.jpg https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M1_Abrams_Hull_Front_Special_Armor.jpg (Letöltve: 2025.03.25.)
- [45] Raabe, D. et al.: The crustacean exoskeleton as an example of a structurally and mechanically graded biological nanocomposite material. *Acta Materialia* 2005/15, 4281–4292. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.05.027>