

Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése

III. rész: A tömörített fa mechanikai tulajdonságai, felhasználási lehetőségei

BÁDER Mátyás¹

¹Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faanyagtudományi Intézet

Kivonat

A cikksorozat áttekintést ad a természetes faanyag hosszirányú tömörítéséről, melynek célja annak hajlékonyabbá, alakíthatóvá tétele. A jelen rész bemutatja a fizikai-mechanikai tulajdonságokat, a modifikált faanyag feldolgozását és a felhasználási lehetőségeket.

20% mértékű rostirányú tömörítés esetén a rugalmassági modulus a harmadára csökken a normál faanyaghoz képest. Bükk és tölgy esetén körülbelül 4 GPa lesz, míg a hárompontos hajlító vizsgálat során elviselt behajlás többszörösére növekszik. A hajlítási viszonyszám akár 1/4 fölötti értékű lehet. Bár a nedvesen hajlítható tömörített faanyagnál a hajlítószilárdság akár felére redukálódik, a törésig elnyelt energia többszörösére emelkedik. A ridegsége csökken, a dinamikus törési munkaigény, a fajlagos ütőmunka és az ütő-hajlító szilárdság másfél-kétszeresére javul. A rostirányú tömörítés hatására a fa sűrűsége növekszik, a rezgéscillapítás keresztirányban nem változik, míg longitudinális irányban többszörösére emelkedik. A húzószilárdság, nyomószilárdság, nyírószilárdság, keménység, csavarállóság csökken. A felsorolt értékek legtöbb esetben a tömörítés mértékével arányosan változnak saját tartományaikban, míg a nedvesség hatására bekövetkező méretváltozás az eredeti anyaggal megegyező marad.

A longitudinálisan tömörített fa szárított állapotban az alacsony rugalmasságának köszönhetően megtartja a beállított alakját. A fakárosítókkal szemben a normál faanyaghoz hasonlóan viselkedik. Hajlításához a hagyományos eszközök felhasználhatóak, nagy előnye, hogy hidegen is alakítható állapotban tartható, ezért készletezhető. Elsősorban a belsőépítészeti és a bútortermelés területén felhasznált anyag, kültérben kevésbé. A termék és tulajdonságai ismertebbé válásával az igények további növekedése várható.

Kulcsszavak: rostirányú tömörítés, mechanikai tulajdonságok, famodifikáció, hajlítás

Practical Issues of Longitudinally Compressed Wood

Part 3: Mechanical properties and areas of application of compressed wood

Abstract

This series of articles presents an overview of the longitudinal compression of the natural wood, whose purpose is to make it bendable. This study presents an overview of the physical and mechanical properties, the processing of the modified wood and its use of applications.

Compressing wood longitudinally by 20% causes its modulus of elasticity decrease to one third, reaching approx. 4 GPa for oak and beech, while using a 3 point bending method, the possible bending rate increases severalfold. Bending rate could be even above ¼. Although, for the above wood species, bending strength decreases to as little as half of its original value, absorbed energy increases multiple times. The rigidity of wood decreases, while the dynamic fracture impact, specific impact energy, and impact strength increases by 150-200%. The density of the longitudinal

compressed wood increases, there is no change in vibration damping across the wood, however, it increases multiple times longitudinally. Tensile strength, compression strength, shear strength, hardness and screw withdrawal resistance decreases. Most of the features above are proportional to the compression, while there is no impact on dimension changes due to changes in humidity.

After drying, longitudinally compressed wood preserves its new shape, due to the low elasticity. Resistance to wood-destroying organisms is similar to traditional wood products. Conventional tools can be used for bending. An additional advantage is that the wood can be held in stock. It is primarily used for interior design and in the furniture industry, outdoor use is less frequent. With increasing public awareness of the product and its properties, demand is expected to grow further.

Keywords: compression in the fibre direction, longitudinal compression, mechanical properties, wood modification, bending

Bevezetés

A fa rostirányú tömörítéséhez és a következő kényes művelethez, a sugárirányban és húrirányban egyaránt elvégezhető hajlításhoz magas minőségű, egységes felépítésű és egészséges alapanyag szükséges. A hosszirányú tömörítés akkor valósítható meg, ha a munkadarab egyenes állapotban marad a teljes folyamat alatt és nem tud kihajolni. Minimálisan 20% nedvességtartalmú faanyag alkalmas a rostirányú tömörítés alapanyagaként való felhasználásra, mely legalább 80 °C hőmérsékleten történő hidrotermikus kezeléssel lágyítható. Ezt a hőmérsékletet tartani kell az anyag teljes keresztmetszetében a préselés során. A fa plasztifikálódását a ligninnek és a hemicellulózoknak, mint a sejtek közti kötőszövet fő alkotóinak változása okozza, minek következtében a nagyrészt cellulózból felépülő, szilárdítást biztosító farostok elcsúsznak egymáshoz képest, roncsolódnak és ennek köszönhetően válik plasztikusabbá a végtermék. 15% tömörítési arány eléréséig már szinte az összes nedvességzállító edény sejtfa meggyűrődik, melyekkel összhangban a szilárdítást biztosító farostok is hasonlóan módosulnak (Báder 2015).

Kezdetben nehézséget jelentett a hosszirányú préselés miatt a kihajlást megakadályozó oldalfalnak neki-nyomódó faanyag sűrűlődése, mely gyengítette a tömörítési erőt az anyag hossza mentén. Mára ezt a problémát elfogadható módon sikerült kiküszöbölni, így 2,5 méteres hosszúság felett is hozzá lehet jutni longitudinálisan tömörített faanyaghoz. A plasztifikált fa a napjainkban alkalmazott technológiával legnagyobb részben a fafajtól és a végtermékkel szemben támasztott követelményektől függően akár 30%-ban tömöríthető, de általában 20% mértékű tömörítési arányt alkalmaznak. A nedvesen hajlítható tömörített fa préselés után nyúlik, és végül 3–10%-os maradandó rövidülést szenved. Segesdy (2003) megfogalmazását alapul véve a maradandó rövidülés azt mutatja, hogy a faanyag mennyire ellenálló a rostirányú összenyomással szemben, és a maradandó rövidülés mértékével arányosan mekkora erőhatás lesz szükséges a faanyag meghajlításához.

Amíg 20% felett van a tömörített faanyag nedvességtartalma, megtartja alakíthatóságát és szárítás-hűtés után rögzül a forma. Az összehérselt állapotában szárított-hűtött anyag hossza a beállított tömörítési aránynak megfelelő, ennek következtében a szárazon hajlítható tömörített fa mindig hajlékonyabb marad. Tanulmányok szerint a kétlépcsős longitudinális irányú préseléssel a korábban említett 10–30%-os tömörítési arány tovább növelhető, megközelíthetőek a plasztikus állapotú faanyag tulajdonságai normál körülmények között is (Sparke 1989, Volkmer és tsai. 2001). A repedés bekövetkeztéig a tömörített fa lényegesen kisebb sugárba, alaktartó módon hajlítható, egyúttal a többirányú hajlítást és csavarást is jobban tűri, mint a normál plasztifikált faanyag, különleges körülményeket nem igénylő módon, és az ismert, hagyományosnak tekinthető famegmunkálási műveletek alkalmazhatóak esetében. Mára a fa tömörítésével és tömörítés utáni hajlításával kapcsolatosan tudományos publikációk, szabadalmak és élő szaktudás is rendelkezésre állnak, azonban utóbbiakat a versenyszférában tevékenykedő cégek által ismertett adatok pontosságára és valóságtartalmára való tekintettel fenn tartásokkal kell kezelni.

A cikksorozatban a faanyag hosszirányú tömörítésével kapcsolatos tudnivalók, eddigi fontos kutatási eredmények és alkalmazott módszerek, ipari tapasztalatok, valamint a termékek mechanikai tulajdonságai kerülnek bemutatásra, azok kritikai értékelésével. A sorozat előző részei ismertették a rostirányú tömörítési eljárásához alkalmas alapanyagokat, ezek előkészítési módjait és a tömörítés sejszintű elméletét és folyamatát (Báder 2015),

valamint a folyamat tulajdonságait, a témával kapcsolatban megjelent szabadalmakat és a faanyag tömörítést követő kezelési lehetőségeit (Báder és tsai. 2015). Jelen cikk áttekintést ad a tömörítés hatására bekövetkező mechanikai változásokról és tulajdonságokról, a termékek megmunkálási és felhasználási lehetőségeiről.

Mechanikai tulajdonságok

Rugalmassági modulus, alakíthatóság

A rostirányban tömörített fa egyik legfontosabb jellemzője a rugalmassági modulus (E), mely az anyagot minősíti annak méreteitől és a terheléstől függetlenül. Az anyagjellemző a rugalmassági tartományban állandó értékű, a terhelés hatására fellépő húzó- vagy nyomófeszültség és az okozott alakváltozás hányadosa (érvényes rá a Hooke-törvény). Ivánovics (2006), Szabó és tsai. (2005) és Thomassen és tsai. (1990) szerint a tömörítés csökkenti a fa rugalmassági modulusát. A rugalmassági modulus 20%-os tömörítés esetén büknél mindegy harmadára, tölgnél felére csökken a tömörítetlen anyaghoz képest a faanyag merevségével együtt, ami szintén harmadára-felére mérséklődik (Kuzsella és Szabó 2006). A bükk faanyag hangterjedési sebességéből megállapított rugalmassági modulusát sem sugár-, sem pedig húrirányban nem befolyásolja a rostirányú tömörítés. A longitudinális statikus és dinamikus rostirányú rugalmassági modulusok 23% tömörítési aránynál 70%-kal, míg a torziós sajátrezgésekből meghatározott rugalmassági modulus közel 27%-kal csökken (Kuzsella 2011a). Az 1–4. táblázatok az előzőekkel nagyságrendileg azonos adatokat közölnek a bükk rugalmassági modulusáról, miszerint a nedvesen hajlítható, rostirányban 20%-ban tömörített fa és a szárazon hajlítható tömörített fa E értéke egyaránt 3,6–4,0 GPa között mozog. Ivánovics (2006) adatai kis mintaszámú előkísérleti mérésekből álltak össze. A hajlító vizsgálatok során a bükk (1. táblázat) és a tölgy (2. táblázat) fafajú, szárított állapotú, nedvesen hajlítható tömörített próbatesteknek három kiemelt jellemzőjét vizsgálta. A kapott eredmények szórása a tömörítettséggel együtt növekedett.

Kuzsella és Szabó (2006) munkájukban pontosan és egyértelműen mutatnak be a tömörítés mechanikai tulajdonságaival kapcsolatos tudnivalókat a tömörítés mértékének függvényében (3. táblázat).

1. táblázat Bükk hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 1 Results of the beech wood's bending tests (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
E [GPa]	11,80	8,58	7,11	4,38	3,76
F_{max} [N]	803	606	574	483	425
σ_h [MPa]	144	125	110	91	78

2. táblázat Tölgy hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 2 Results of the oak wood's bending tests (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
E [GPa]	9,86	6,67	4,11	4,11	3,94
F_{max} [N]	858	609	411	409	393
σ_h [MPa]	126	106	78	77	73

3. táblázat A hárompontos hajlító vizsgálat eredményei a tömörítés mértékének függvényében, bükk és tölgy fafajok esetében (forrás: Kuzsella és Szabó 2006)

Table 3 Results of the 3-point bend test as a function of the compression ratio in case of beech and oak wood species (source: Kuzsella and Szabó 2006)

Fafaj	Bükk			Tölgy		
Tömörítés mértéke	0%	15%	20%	0%	10%	20%
E [GPa]	12,01	4,45	3,66	7,20	4,18	3,93
F_{max} [N]	802,79	495,49	415,63	524,04	402,84	412,60
σ_h [MPa]	144,38	91,91	76,23	94,52	75,57	78,67
y [mm]	11,83	33,22	36,18	9,61	25,81	35,11
W_s [J]	3 068,03	11 511,90	12 367,00	1 908,29	6 144,26	10180,42

Az értékek az 1. táblázat megfelelő adataival összhangban vannak, így bár nem található konkrét leírás róla, de valószínűsíthetően nedvesen hajlítható tömörített faanyagot vizsgáltak, szárított állapotban. A tölgy és a bükk esetében itt is azonos tendencia figyelhető meg a tömörítés fokának megfelelően.

A tömörített fából félkész termékeket előállító Candidus (2014b) szintén publikált mechanikai tulajdonságokat is tartalmazó táblázatot (4. táblázat). A végleges sűrűségéből következően a szárazon hajlítható, 20% mértékben tömörített anyagról van szó, melyet 10–12% nedvességtartalmú állapotában vizsgáltak.

Tölgy fafaj esetében a mérések közti szignifikáns eltérések valószínűleg a különböző alfajokon végzett mérések miatt jelenhettek meg, de a 20%-ban tömörített tölgyfa E értéke minden alkalommal 4 GPa körüli érték, vagyis a tömörítés az eredetileg nagymértékben eltérő rugalmassági modulus értékeket kiegyenlíti. Tömörítés hatására a merevségi tenzor komponensei kismértékben redukálódnak, tehát a tömörített faanyagok kevésbé lesznek rugalmasak és merevek (Szabó és tsai. 2005). Buchter és tsai. (1993), Szabó (2002) és a tömörítő berendezések gyártójaként ismertté vált Compwood (2008) egyaránt közöltek adatokat, melyek százalékos arányban hasonlítják össze a 20%-ban tömörített, majd 60 °C-on szárított fát a normál szárított faanyag tulajdonságaival (5. táblázat).

4. táblázat A normál és a szárazon hajlítható tömörített bükk faanyag műszaki tulajdonságainak összehasonlítása szárított állapotban (forrás: Candidus 2014b adatai alapján)

Table 4 Comparison of the mechanical properties of uncompressed and dry bendable compressed beech species in dry state (source: on the grounds of Candidus 2014b)

Műszaki jellemzők	Normál bükk*	Bendywood® bükk	Átlagos eltérés (%)
Sűrűség [kg/m ³]	730	890	+ 21,9
Tömörítés mértéke [%]	0	20	+ 20,0
Rugalmassági modulus [GPa]	11	3,9	- 64,5
Folyáshatár [MPa]	59	31	- 47,5
Hajlítoszilárdság [MPa]	74	102	+ 37,8
Hajlítási viszonzyszám	1/45	1/10	+ 350,0

*Az adatok irodalmi forrása nem ismert.

Kuzsella és tsai. (2011) a bükköt vizsgálták különböző tömörítési szinteken. A tömörítés során a kezdeti rugalmas tartományban a rugalmassági modulus egyre kisebbé válik, míg a tönkrementelhez tartozó alakváltozás egyre nagyobb lesz, azaz a tömörítés mértékének növelésével együtt egyre nagyobb alakváltozást képes elviselni az anyag a tönkrementel előtt, könnyebb alakíthatóság mellett. Szabó és tsai. (2005) szintén hasonló következtetésre jutottak, miszerint a tönkrementel jóval nagyobb behajlásnál (y) következik be, és a tömörített fánál még nagy lehajlás esetén is van szilárdsági tartalék. A 3. táblázatban látható szám adatok alapján a hajító vizsgálatnál mért törésig elviselt alakváltozás a tömörítetlen faanyaghoz képest 20%-os tömörítési fok mellett három-négyszeresére nő bükk és tölgy fafajok esetében, ami jelentősen megkönnyíti a faanyag feldolgozhatóságát (Kuzsella és Szabó 2006), míg az elviselt alakváltozás 23%-os rostirányú tömörítés hatására közel ötszörösére, üttö-hajlító vizsgálatnál közel kétszörösére növekszik (Kuzsella 2011a).

5. táblázat A tömörített, nedvesen hajlítható és a nem tömörített bükk és kőris faanyagok száraz állapotú tulajdonságainak összehasonlítása (forrás: Buchter és tsai. 1993)

Table 5 Comparison of the compressed, moist bendable and the uncompressed beech and ash wood's properties in dry state (source: Buchter et al. 1993)

Műszaki jellemzők	Átlagos eltérés (a tömörített és a tömörítetlen faanyag között) [%]
Fajlagos sűrűség	+5
Nedvességtartalom	0
Hajlítoszilárdság	-10
Húzószilárdság	-10
Nyomószilárdság	-10
Nyírószilárdság	-10
Keményesség	-15
Üttö-hajlító szilárdság	+20
Csavarállóság	-10
Hajlító rugalmassági modulus*	-15
Húzó rugalmassági modulus*	-15
Nyomó rugalmassági modulus*	-15
Méretváltoztatás különböző fanedvességi értékek esetén	0

*Az eredeti cikkben *stiffnes/Steife* néven szerepeltetett mennyiségek, feltehetőleg rugalmassági moduluszt kell alatta érteni.

A bemutatott behajlási adatokat a törés pillanatáig mérték, azonban a nagyobb tömörítések esetében olyan nagy alakváltozásokat képes elviselni az anyag, hogy az alkalmazott alátámasztások magasságának megfelelő behajlásnál sem minden esetben törik el a mintadarab. Kuzsella (2011a) emiatt olyan megoldást választott, hogy amint a 20% fölötti tömörítési fok mellett is körülbelül 400 N értékig emelkedő hajlítási erő 100 N alá csökkent a vizsgálat során, a hajlító vizsgálatot befejezte és ezt tekintette végső állapotnak. A későbbiekben bemutatásra kerülő 8. táblázat adatai alapján a behajlás radiális és tangenciális anatómiai irányok közti eltérése nem számottevő. A különböző kísérleti körülmények következtében (keresztmetszet, alátámasztási köz) a 3. és a 8. táblázat y értékei nem hasonlíthatók össze, azonban ismertetésük fontos az adott kísérleteken belül a hajlíthatóság javulásának, tendenciáinak és az anatómiai irányok különbségeinek szemléletes ismertetéséhez. Kétszeri tömörítést írnak le Volkmer és tsai. (2001), akik szerint a fa nagyobb mértékű tömörítésével (20–30%) az alakíthatóság tovább javul. Ha a tömörített faanyagot 5% hosszirányú nyújtásnak tesszük ki, a hajlítása még könnyebbé válik.

A bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy az alakíthatósággal foglalkozó publikációk mind hasonló eredményre jutottak. Tömörítés hatására a rugalmassági modulus a tömörítés mértékének megfelelően csökken, tehát a rostirányú tömörítési eljárás céljának megfelelően valóban könnyebben hajlíthatóvá válik a faanyag.

Hajlítási sugár, hajlítószilárdság, hajlítási viszonzszám

A maximális alakváltozás legegyszerűbben a belső íven elérhető legkisebb hajlítási sugár (R) meghatározásával mérhető, mely természetesen nagyon sok összetevőtől függ (fafaj, anyagminőség, alkatrész mérete és keresztmetszete, tömörítési fok, a hajlításhoz alkalmazott sablon és számszám). A tömörített fa a kezeletlen fánál kisebb sugárba hajlítható a kezelés után anélkül, hogy repedne vagy törne (Deibl és tsai. 1999). A faanyag tömörítés során plasztikussá válik, nagyobb keresztmetszetek hajlításához mégis jelentős erők szükségesek (Szabó 2002). Mindegyik, a témával foglalkozó publikáció egyetért abban, hogy a tömörítés fafajától függetlenül csökkenti a hajlíthatósági sugarat, a hajlítási végerőt és a rugalmassági modulusot is.

A tömörített tölgyfa hajlítási diagramja a bükkéhez hasonló jelleget mutat, de az azonos vizsgálati körülmények mellett szintén törésig, vagy maximális lehajlásig mutatott hajlítási végereje (F_{max}) valamivel kisebb. Utóbbi a tömörítetlen fához képest körülbelül a felére redukálódik 20% tömörítési fok mellett (Szabó és tsai. 2005). Az 1–3. táblázatokból kiolvasható értékek is ezt mutatják, rostirányú préselés hatására a hajlítási végerő a bükk esetében felére csökkent, a tölgnél szintén nagymértékű visszaesés mutatkozott. Dinamikus vizsgálatoknál ennél is nagyobb mértékű csökkenés látható. A 6. és 7. táblázatban rendre a bükk és tölgy fafajok ütő-hajlító vizsgálatának eredményei szerepelnek, Ivánovics (2006) tanulmányából. Az 1. és 2. táblázatokra vonatkozó, mérésekkel kapcsolatos megállapítások itt is helytállóak. A hajlítási végerő függ a mérési körülményektől, ezért a különböző táblázatok erre vonatkozó adatai nem minden esetben összehasonlíthatóak.

A 10%-ban tömörített tölgy hajlítószilárdsága (σ_b) alacsonyabb a bükkéhez képest (75,57 MPa), mely jóval kisebb érték, mint a tömörítetlen változatoké (Szabó és tsai. 2005). Ezzel a hajlítószilárdsági értékkel nagyságrendileg az 1., a 2., a 3. és a 8. táblázat adatai is összhangban vannak, nagyobb mértékű tömörítés hatására pedig már alig változik a hajlítószilárdság. Az említett táblázatokban a bükknél is csökkenő tendencia figyelhető meg,

6. táblázat Bükk ütő-hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 6 Results of the beech wood's impact tests (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
F_{max} [N]	2 357	2 311	1 058	895	850
KCV [J/cm ²]	4,85	7,42	9,12	13,05	14,13
W_d [J]	2,94	4,35	5,01	7,28	9,12

7. táblázat Tölgy ütő-hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 7 Results of the oak wood's impact tests in dry state (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
F_{max} [N]	3 248	2 267	2 038	1 775	702
KCV [J/cm ²]	7,08	7,88	8,20	12,25	12,28
W_d [J]	3,48	3,73	4,25	5,82	6,31

de a tömörítés arányát sokkal egyenletesebben követik a hajlítoszilárdsági eredmények fordított arányban, melyek 20% tömörítettségnél hozzávetőleg a normál bükkfa szilárdságának felére redukálódnak, míg Kuzsella (2011a) eredményei 30%-os csökkenésről tanúskodnak a normál körülmények közti egyensúlyi nedvességtartalmú mintáknál. A 4. táblázat az előzőekkel ellentétben a hajlítoszilárdság növekedését mutatja. Ebben az esetben szárazon hajlítható tömörített faanyagot készítenek, azaz a préselés után a fa redukált hosszúságát rögzítik, ilyen állapotában szárítják és hűtik, minek következtében a beállított hosszát megtartva lényegesen nagyobb sűrűségű, és a későbbiekben is hajlítható lesz a munkadarab (Báder és tsai. 2015). Tekintettel arra, hogy más technológiai folyamat szerint modifikált faanyagról van szó nagymértékben meggyűrődött rostokkal és nagyobb sűrűséggel, ez lehetséges különbségnek tekinthető. Az 5. táblázat csupán 10%-os hajlítoszilárdság-csökkenésről számol be. Segesdy (2003) munkájában a tömörített fa sugár- illetve húrirányú hajlítási eredményeinek különbségeit vizsgálta, mely alapján a σ_b anatómiai irányok közti különbsége 5,83% (8. táblázat). A 8. táblázat vizsgálataihoz használt, nedvesen hajlítható tömörített próbatestek bükk fafajúak. A hajlítási végerő kissé elmarad a normál faanyag irodalmi szilárdsági adataiból számolhatótól. Az F_{max} azért különbözik jelentősen az 1. és 3. táblázat eredményeitől, mert más volt a vizsgált keresztmetszet és az alátámasztási köz, viszont a mérvadó a körülményektől független anyagjellemző, a szilárdság – ami korrelál velük –, tehát a mérések megfelelő értékeket mutatnak. A kísérleten belüli eredmények összehasonlíthatóak egymással, hosszirányban tömörített bükk faanyagnál a vizsgált két anatómiai irányban az F_{max} értékek közti különbség gyakorlatilag elhanyagolható.

Tölgy esetén a táblázatokban jelentős különbségek láthatók, ami a különböző fajok használata és a fajaj természetes inhomogenitása miatt fordulhat elő, de a tömörítés a rugalmassági modulusához hasonlóan a hajlítoszilárdsági értékeket is kiegyenlíti.

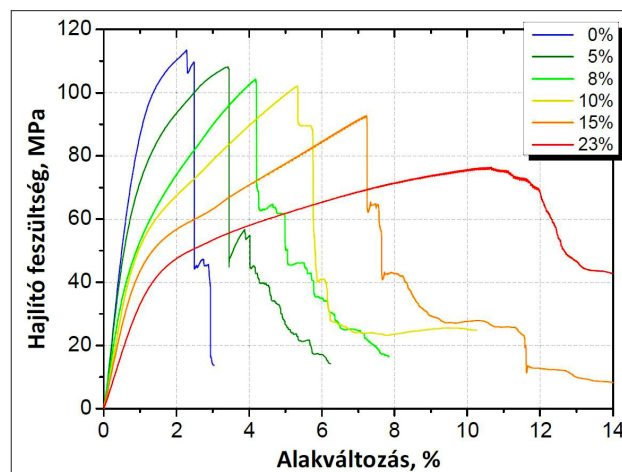
8. táblázat Hárompontos hajlító vizsgálat eredményei és szórásai nedvesen hajlítható tömörített bükk fafaj esetében, száraz állapotban (forrás: Segesdy 2003)

Table 8 Results and standard deviations of the 3-point bend test in case of moist bendable compressed beech wood species in dry state (source: Segesdy 2003)

	Bükk hajlítása az LR síkban	Bükk hajlítása az LT síkban	Anatómiai irányok	
			átlaga	eltérése
E [GPa]	5,397 (14,11%)	4,994 (31,87%)	5,202	7,47%
F_{max} [N]	2125 (8,34%)	2145 (6,44%)	2135	0,94%
σ_b [MPa]	86,68 (7,07%)	81,63 (29,16%)	84,24	5,83%
y [mm]	21,15 (22,20%)	22,64 (18,76%)	21,87	7,04%

A statikus hajlítóvizsgálat során készült erő-elmozdulás (F - y) diagramokon a görbék alatti terület, azaz a törésig elnyelt energia (W) a tömörítés mértékével együtt növekszik (Kuzsella és tsai. 2011), ez olvasható le a Kuzsella és Szabó (2006) munkájában megjelent diagramokról és a 3. táblázatból is. Az említett diagramok tanulsága szerint a bükk és a tölgy fajok hasonlóan változnak a tömörítés fokának növelésével. Az 1. ábra a geometriától független hajlítófeszültség-alakváltozás (σ_b - ε) viszonyt ábrázolja, és a görbék alakjai, valamint a görbék alatti területek arányai rendkívül hasonlítanak az F - y diagramokon láthatókhöz.

A hajlítási viszonzyszám (h/R arány) egy méretektől független jellemzője az anyagnak, mely alapján adott vastagsághoz a technológiailag biztonságosan alkalmazható legkisebb hajlítási sugár számolható. Egyszerre jellemzi az elnyelt energiát és az alakíthatóságot, valamint fordított kapcsolatban van a rugalmassággal és a hajlítoszilárdsággal.



1. ábra Hárompontos hajlítás adataiból készített σ_b - ε diagramok különböző tömörítettségi fokú bükk mintáknál (forrás: Kuzsella 2011a)

Figure 1 σ_b - ε diagrams about the 3-point bend test data as a function beech specie with different compression rates (source: Kuzsella 2011a)

Kuzsella (2011a) disszertációjában olvasható, hogy a tömörítés mértékének növelésével javítható a h/R viszony. Számos publikációban található kapcsolódó adat: Deibl és tsai (1999) munkájával összhangban Kovács és tsai. (2006) szerint a félkész termék hajlítási viszonzyszáma 1/10 lesz, mert a hajlíthatóságot az összecsiszított rostok javítják. Szabó és tsai. (2005) szabadalmában a farugókra vonatkozó megállapítások alapján hajlítoszalag használata nélkül a h/R viszony akár 1/3 értékű is lehet, azaz a tömörített fa kis rádiuszú ívre is könnyen hajlítható. Szintén pánt alkalmazása nélküli adatokat találunk Kuzsella (2011a) disszertációjában, ahol irodalmi adatok alapján a tömörítetlen bükk hajlítási viszonzyszámának 1/15 van megadva, míg saját mérései szerint a 15%-ban tömörített bükk h/R aránya 1/7. 23%-os tömörítés esetén ez az érték már 1/5, mely 80 °C-ra melegítve a fát 1/4-re javítható. Ez megegyezik a munkájában látható adatok közül a normál gőzölt anyag pánttal és bütüszorítóval elérhető legjobb hajlítási viszonzyszámával. Ivánovics (2005) az elérhető legkisebb hajlítási sugarakat foglalta táblázatba, ahol egyértelműen látható azonos méretű, de különböző állapotú anyagok viselkedése adott körülmények között (9. táblázat), kiegészítve Dienes (2013) munkájából származó adatokkal. Utóbbi tanulmány szerint a téglalap és kör keresztmetszetű anyagok hajlíthatósága között jelentős különbségek fordulhatnak elő. A 9. táblázatban szereplő gőzölt anyagok szobahőmérsékleten, nedves állapotban lettek hajlítva, ennek köszönhetően Kuzsella (2011a) adataihoz képest valamelyest gyengébb eredmények láthatóak.

A bemutatott maximális h/R értékek között esetenként eltérés mutatkozik, mely a különböző módokon, faanyagokon és segédeszközökkel elvégzett kísérleteknek tudható be, abban viszont egységesek, hogy a tömörítés hatására mindenhol lényegesen csökken a hajlíthatósági sugár. A tömörítés mértékének növelésével javul a h/R viszony. Tömörítést követően a klasszikus gőzöléses eljárásnál is jobb hajlítási viszonzyszámokat lehet elérni, valamint a rostirányban tömörített fa már nem csak plasztifikált állapotában alakítható, ami kibővíti a felhasználási lehetőségek tárházát. Ez azt is jelenti, hogy a korábban csak hajlítoszalaggal, forró állapotban elérhető hajlítási viszonzyszámok tömörített faanyag alkalmazásával szobahőmérsékleten, akár pánt használata nélkül is elérhetőkké válnak.

Szívósság (ütő-hajlító szilárdság), húzószilárdság

A rostirányú tömörítés folyamatában az eredeti célnak megfelelően a faanyag rostjai meggyűrődnek, így modifikált anyagként könnyebben hajlítható fa keletkezik (Báder 2015). További, általában 25–28%-nál nagyobb arányú rostirányú tömörítés hatására a tönkrementel mikroszkopikus méretű repedésekkel, elcsúszásokkal kezdődik, ami a terhelés növekedésével tovaterjed az egész keresztmetszetre, a rostok elhajlanak és a bélsugaraktól elválnak (2. ábra) (Ivánovics 2012).

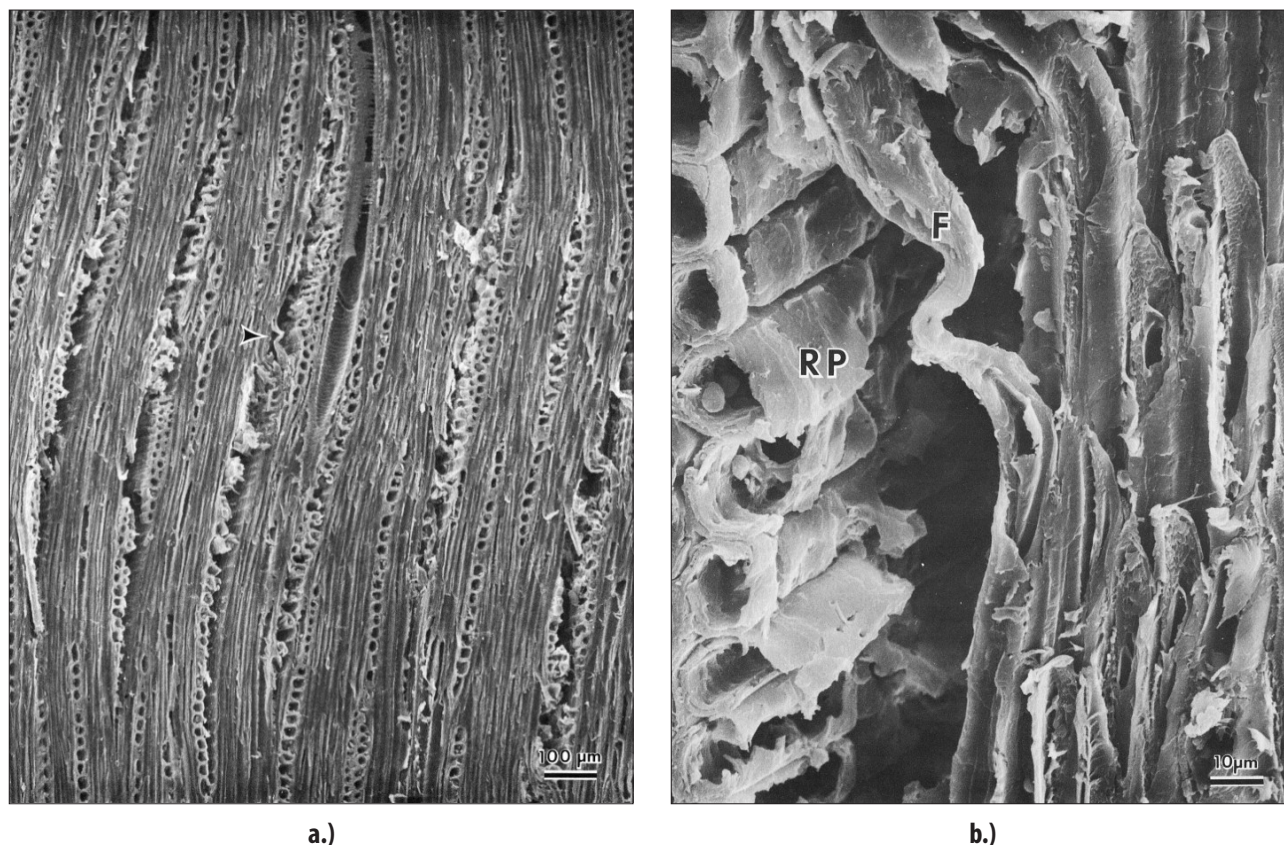
A hárompontos hajlító vizsgálat adataiból kapott görbék alatti területek a tömörítés hatására négyszeresükre növekednek, ami a szívós jelleg erősödését jelzi (Kuzsella és Szabó 2006). Szabó és tsai. (2005) Charpy-féle lengőkalapácsos ütőművel elvégzett vizsgálatai alapján a 20%-ban tömörített bükkfa esetén a dinamikus törési munkaigény (W_d) a szívóssággal együtt legalább háromszorosára nőtt a tömörítetlen faanyaghoz képest, a fajlagos ütőmunka (KCV) pedig minimálisan 14,35 J/cm² lett, mely szintén nagyméretű növekedést jelent a normál bükk faanyag 8,55 J/cm² értékéhez képest. Ivánovics (2006) mérései szintén az előbbieken említett anyagjellemzők növekedését mutatják (6. és 7. táblázat). Az előzőekkel egyetértésben Kuzsella és tsai. (2011) is azt állapították meg, hogy a faanyag szívóssága a rostirányú tömörítésnek köszönhetően jelentősen javul, és Kuzsella (2011a) megállapította, hogy a bükk 23%-os rostirányú tömörítésének hatására a fajlagos ütőmunka kétszeresére növekszik.

A húzószilárdságról sajnos kevés információ áll rendelkezésre. Az biztosan megállapítható, hogy a hajlítás során fellép húzó igénybevétel is, tehát számolni kell vele. A hajlítható állapotában lévő tömörített fa a kisebb

9. táblázat 25 mm vastagságú bükkfa minta minimális hajlítási sugara és hajlítási viszonzyszámai különböző eljárásokkal (forrás: Ivánovics 2005 és Dienes 2013 munkája nyomán)

Table 9 Minimal bending radius and bending ratio of a 25 mm thick beech wood with different processes (source: on the grounds of Ivánovics 2005 and Dienes 2013)

	R [mm]	h/R
Száritott anyag*, egyszerű hajlítással	1500	1/60
Gőzölt anyag, egyszerű hajlítással	500	1/20
Gőzölt-tömörített anyag, egyszerű hajlítással	200	1/8
Gőzölt anyag, pánttal és bütüszorítóval	120	1/5
Gőzölt-tömörített anyag, pánttal és bütüszorítóval	50	1/2



a.)

b.)

2. ábra Vörös tölgy tangenciális metszete nyomóvizsgálat után (a) és ennek nagyított részlete, ahol a rostok elhajlása és a bélsugarak elválása látható (b) (forrás: Ivánovics 2012)

Figure 2 Tangential section of red oak after compression test (a) and its enlarged part, where the fibre-deflection and the ray-separation can be seen (b) (source: Ivánovics 2012)

hajlíthatósági sugárból következően nagyobb alakváltozást képes elviselni a gyűrött rostok hatására a húzott oldalon, melyek képesek a kiegyenesedésre alakíthatósági tartalékot képezve (Báder és tsai. 2015). Volkmer és tsai. (2001) szabadalmukban tájékoztatnak, hogy a tömörített faanyagot 5%-kal megnyújtva annak alakíthatósága tovább javul. Ebből levonva a konklúziót legalább 5% mértékben növelhető a rostirányban préselt fa hosszúsága, annak a felhasználási cél szempontjából okozott károsítása nélkül. A Compwood (2008) a tömörítést követő rövid pihentetés után, nedves és meleg állapotban szüntette meg a nyomóerőt, így a fa visszarugózott és lényegesen kisebb lett a maradandó hosszcsökkenése, mely következtében az 5. táblázatban a 12% nedvességtartalmú bükkfa húzószilárdságának kisebb mértékű, 10%-os csökkenéséről számol be.

Megállapítható, hogy a faanyag ridegsége és szárított állapotú húzószilárdsága csökken, a dinamikus töréshez szükséges energia pedig többszörösére növekszik a longitudinális préselés következtében.

Segesdy (2003) késztermékekre vonatkozó, nagyon lényeges következtetése a következő: „A gyakorlati kísérletek bebizonyították, hogy [...] a tömörített faanyag veszít a szilárdságából, de még így is a „természetes” faanyag szilárdsági értékein belül marad”. A táblázatosan és szövegesen bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy a rostirányban tömörített faanyag nedvesen és szárazon hajlítható változatának tulajdonságai eltérnek éppúgy, mint a tömörített és a tömörítetlen faanyag mechanikai tulajdonságai.

Egyéb fizikai és megmunkálási tulajdonságok, felhasználás

Az előzőekben bemutatott mechanikai jellemzőkön túl a rostirányban tömörített faanyag rezgésekkel kapcsolatos viselkedése is figyelemre méltó. A rezgés csillapodásának jellemzésére célszerű a logaritmikus dekrementumot használni, ahol Λ a logaritmikus dekrementum, A_1 és A_2 az egymást követő amplitúdók (Csóka 2003).

$$\Lambda = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad [1]$$

A fenti mérőszám jellemzi a belső sűrűlődből eredő veszteségeket, és a viszkoelasztikus viselkedésre is lehet következtetni belőle. A logaritmikus dekrementum értéke a tömörítés mértékének növekedésével együtt akár négyszeresére növekszik, ami bizonyítja, hogy a rostirányú tömörítés hatására a bükk faanyag egyre inkább viszkoelasztikus viselkedést mutat (Kuzsella 2011a és 2011b). A logaritmikus dekrementum növekedése igazolja Szabó és tsai. (2005) munkájában leírtak helyességét, miszerint a tömörített faanyagból készített rugó rezgéscsillapító alkatrésznek is előnyösen használható. Két távolabbra mutató megállapítás Kuzsella (2011a) tollából, hogy az ultrahang terjedési sebességének meghatározása vagy a logaritmikus hullám sajátfrekvenciájából megállapított rugalmassági modulus meghatározása alkalmas lehet a tömörítési szint megállapítására. A módszerek nagy segítséget jelenthetnek az egyenletes tömörödöttség ellenőrzésében és mértékének utólagos megállapításában.

Tömörítés után a faanyag rögtön alkalmas a hajlításra, de szükség szerint tárolható is (Sparke 1989). Nedvesen hajlítható faanyag esetén a tárolást úgy kell megoldani, hogy a nedvességtartalom ne csökkenjen 20% alá. A száradás megelőzhető fagypontra tárolva, így a tömörített fa akár 12 hónapig raktározható felhasználás előtt, vagy sötét helyiségben műanyag fóliába csomagolva, ahol 6 hónapig őrzi meg a hajlékonyságát (Compwood 2007, Szabó 2002). A nedvesen raktározott tömörített faanyagot védeni kell penésztől és gombáktól, melyek színeltérést és egyéb károkat okozhatnak. Tároláskor az egyensúlyi nedvességtartalmat folyamatosan ellenőrizni kell a száradás, és az ebből következő felületi repedések megjelenésének elkerülése érdekében. Szintén fontos, hogy a nedvesen tárolt fa rosszul viseli a közvetlen napsugárzást (Compwood 2007, Kuzsella és Szabó 2006). Szárazon hajlítható tömörített fa esetében a kész alapanyag szárított (6–8%-os nedvességtartalmú) állapotban tárolható, a viszonylag időigényes tömörítési folyamat ebben az esetben szintén beilleszthető az ipari termelési sorba, természetesen a szárazon hajlítható rostirányban tömörített faanyag eltérő tulajdonságainak figyelembe vételével.

A tömörített fa hajlítása kis keresztmetszetek esetén kézzel sem okoz problémát, nagyobb méretű alkatrészek készítésekor azonban a Thonet technológiából régóta ismert kéziszerszámok, sablonok, szorító berendezések alkalmazása elkerülhetetlen. A hajlítás során használt rögzítési módok és az alakítást követő rögzítés szintén megegyezik a korábbi technológiákban felhasználtakkal, ugyanazok a sablonok, bilincsek, esetlegesen húzószalag és bütüszorító stb. és szárítási rendszer alkalmazható a rostirányú tömörítéssel hajlíthatóvá tett faanyagnál is. A termékelőállítás szempontjából lényeges, hogy az alakítás egyszerű eszközökkel végrehajtható és ezek használata könnyen elsajátítható (Szabó 2002). A tömörített faanyag a hagyományosnál magasabb hőmérsékletű szárítást képes elviselni száradási repedések nélkül, így a száradási idő is rövidebb (Komáromy 1999).

Nedves állapotában a tömörített faanyagot a rostok felszakadásának veszélye miatt a jobb minőség elérése érdekében rostirányra merőlegesen érdemes gyalulni, valamint esztergálással és csiszolással is kitűnően megmunkálható. Megmunkálás közben szoros megvezetés szükséges a hajlékonysága miatt (Komáromy 1999, Sőregi 2007). A kívánt forma beállításakor a nedvesen hajlítható tömörített faanyagot a megfelelő formában rögzíteni kell, majd valamely szárítási technológiával nedvességtartalmát 16% alá csökkenteni. A nagyon kis sugarú hajlításokat közvetlenül a préselés után, melegen célszerű elvégezni (Ivánovics 2005). A fa az eredetihez képest kismértékű szilárdsági csökkenéssel nedvesen és szárazon hajlítható tömörített változat esetében is normál faanyagként megmunkálható lesz a szárítást és lehűtést követően, például fűrészelés, gyalulás, marás, stb. (Hanemann 1917, Sparke 1989). A struktúrája épen marad (Sparke 1989), megjelenése a normál fával megegyező, normál faanyagként festhető és ragasztható, de az alkalmazott rostlágítási módszernek és időtartamnak megfelelő elszíneződéssel természetesen számolni kell. Attól eltekintve, hogy végtermékként a világos színű natúr fafelületek a normál előkezelési eljárás következtében nem megvalósíthatóak, a tömörített fa esztétikai és a feldolgozás során vett anyagtakarékossági szempontból egyaránt kiváló termék. A szálirány mindig követi az ívet és nem szükségesek nagy gyártási túlméretetek. Míg a hagyományos módszerekkel hajlított fánál tipizált elemekből álló termékcsaládok kialakítására kell törekedni, a tömörített fa előnye, hogy a könnyebb alakíthatóság miatt egyszerűbb és olcsóbb hozzá szerszámokat készíteni. Készletezhetősége és alakíthatósága miatt a sorozatgyártott hajlított alkatrészek kiváló alapanyaga. Használata nagy előnyt jelent az egyedi munkák elkészítésében is, a korábban szinte csak sorozatgyártás szintjén megvalósult hajlított termékek előállításán terén (Ivánovics 2005). Restauráláshoz szintén nagyszerű alapanyag, drága eszköz- és jelentős munkaigénnyel létrehozható hajlított és csavart alkatrészek pótolhatók vele sokkal gyorsabban és egyszerűbben.

A nedvesen alakítható tömörített faanyag esetében a kívánt formájúra hajlított és így rögzített alkatrész a szárítás során megszilárdul, alaktartóvá válik (Szabó 2002, Thomassen és tsai. 1990), alacsony rugalmasságának

köszönhetően megtartja a formáját. Beépítéskor lehetőség van kis korrekciókra, például a hajlítási sugár utánállítására, kismértékű változtatására (Deibl és tsai. 1999).

A fa a tömörítési folyamat során semmilyen vegyszeres kezelést nem kap, ezért a lágyítás-tömörítés közben a szénhidrátok és egyéb fakárosítók szempontjából lényeges alkotórészek zöme épen marad, ebből következően a növényi- és állati károsítókkal szembeni ellenállása megegyezik a tömörítetlen faanyagéval. A plasztifikálás és szárítás hatására viszont a technológiából kifolyólag bizonyos fokú hőkezelésen esik át a fa, így legtöbb esetben a jelenleg érvényben lévő, nemzetközi szabályozás szerinti ISPM 15 követelményeinek automatikusan eleget tesz (minimum 56 °C hőmérséklet teljes keresztmetszetben 30 percen keresztül). Ezzel biztosítja a nemzetközi szállítmányozáshoz szükséges normát, tehát a tömörített fából készült termékek nemzetközi szállítmányozási procedúrája egyszerűbb a normál faanyagéhoz képest. Lágyításkor a fa hőmérséklete meghaladja a minimálisan megkívántat, melyet a tömörítési folyamat során tartani kell. A szárítás általában szintén 60 °C körüli hőmérsékleten történik és néhány napot vesz igénybe, köszönhetően a redukálódott repedéskeletkezési hajlamnak (Compwood 2007).

A rostirányban tömörített fa alkalmazható íves korlátok, ablakok és élzárók, boltívek, stb. alapanyagaként. Az íves fa alkatrészek manapság általában ragasztott vagy rétegelt-ragasztott tömörfa vagy sokszor kompozit alapanyagokból készülnek, ezekhez a technológiákhoz sok alapanyag és alkatrész, munkaeszköz, rögzítő elemek, megfelelő ragasztó, nagyon pontos munkavégzés és gyakran nehéz fizikai munka szükséges. A gyártási idő és a munkát végző ember fizikai igénybevételének csökkentésére a fa tulajdonságait úgy kell módosítani, hogy az alkalmas legyen például acélhajlító gépeken és eszközökkel való alakításra. Sok esetben a jelenleg használt, nem építőipari rétegelt szerkezetek helyettesíthetők vele. A megfelelő formára hajlított tömörített alkatrész mechanikusan rögzítve pl. korlátként vagy ragasztva pl. élzáróként is alkalmazható (Deibl és tsai. 1999). A bútor élzárók, amik a megadott módon kezelt fából készülnek, repedés vagy törés bármilyen kockázata nélkül hajlíthatók például asztallap éles íve köré (Sparke 1989). Furnér szintén készíthető belőle, amely a speciális belső szerkezetének köszönhetően jól használható térgörbe felületekhez, ahol a faanyag bizonyos mértékű nyúlására van szükség (Volkmer és tsai. 2001). Ez a technológia Anssary (2006) szerint is a hajlítható furnér és a hajlékony tömörfa használatát egyaránt lehetővé teszi. Leírásában ezen felül a bútortervezők számára nem csak a többszörösen hajlított fa bútoralkatrészek készítésének lehetőségét adja meg székekhez, asztalokhoz, ágyakhoz, stb., hanem az eredeti Thonet design újraértelmezésének lehetőségét is. Az új hajlítási folyamattal elérhetővé vált strukturális- és anyagválaszték megszabadította a hajlított fából készült bútorokat a korábbi súlyosságuktól és mozdulatlanságuktól. Lehetségessé vált hajlékony, rugalmas és könnyed bútort készíteni hajlított fából.

A nedvességtartalom változása miatti alaktartóssági problémák okán kültéri használatra nem alkalmas a tömörített fa (Candidus 2014a), viszont kivételes esetekben, ha a kész formára hajlított alkatrész úgy van rögzítve, hogy például a magas páratartalom következtében se mozdulhasson el, díszítési céllal kültéri alkalmazásban is felhasználható.

A rostirányban tömörített fából készülő hajlított elemek előállításához nincs szükség környezetre káros anyagokra, például ragasztókra (Deibl és tsai. 1999, Szabó 2002), a termék teljes mértékben környezetbarát, kémiai adalékanyagoktól mentes (Candidus 2014c). Ha a szükséges alkatrész valamilyen okból – pl. a mérete vagy geometriája miatt – nem állítható elő egy anyagból, akkor toldható pl. csapozással. Így nagy hosszok elérhetőek, igaz, hogy rosszabb hajlíthatóság mellett. Ekkor ragasztóanyag már kerül a rendszerbe, de lényegesen kisebb mennyiségben, mint a hagyományos tömbösített és rétegragasztott termékeknel.

A tömörített fa alkalmazása a bútortervezési és belsőépítészeti alkalmazások széles palettáján kívül az építőipar, hajógyártás, játék- és sportszergyártás, képzőművészet, egészségügy területére is kiterjeszhető. Egy különleges, elsődlegesen bútortervezési példa a századunk elején kifejlesztett, fából készült spirálrugó. Megfelelő rugógeometria mellett a tömörített fából készült rugó éppúgy képes az energiatárolási és leadási, csillapítási feladatok ellátására, mint a hagyományos fém rugók. A tömörített fából készült fa spirálrugó ismétlődő terhelés hatására legalább 1 200 000 terhelési ciklust tesz lehetővé 6 MPa kifáradási határfeszültségen (Szabó és tsai. 2005). A rugóalakok és az üzemvitel a gépészetben használt formáknak megfelelnek, azonos méretek esetén a fémrugóhoz képest kisebb a tárolható energia, de a kis tömeg, a mágneseshetetlen alapanyag és természetes mivolta folytán alkalmazható az élet számos területén. Gyógyászati téren szintén lehet létjogosultsága a rostirányban tömörített fának, ahol különleges geometriák létrehozásával pl. sérült végtagokhoz egyedileg igazítva használható (Szabó és tsai. 2005).

Napjainkban a tömörített fa nedvesen hajlítható változatát használják elsősorban. Az alábbiakban felsorolás látható a felhasználási lehetőségekről, mely korántsem tekinthető teljesnek figyelemmel arra, hogy a tömörített-hajlított fából készült végtermékek sokféleségének csak a felhasználók kreativitása szabhat határt:

Bútoripar:

- szék (3. ábra), pad, kanapé, bútorláb, kávék, oszlopok, stb.
- szekrénydíszítő elem (kávadíszítés, álosztó, párkány)
- szegélyléc, élléc
- fogantyú
- pultburkolat, frontelem (4. ábra)
- farugó (Szabó és tsai. 2005) (matracrugó, felhasználás kárpitozott bútorokhoz) (5. ábra)
- késelt furnér 3 dimenziós felületre
- egyedi berendezési tárgyak (lámpabúra- és test, szobainas, kabátakasztó, stb.).

Belsőépítészet:

- korlát karfa (6. ábra), korlátlécek (csavart megoldások is)
- önálló szobadísz, szobrászat, iparművészet
- növelt hanggátlású falburkolat, térplasztika
- sarokléc/takaróléc íves nyílászárhoz, építészeti elemekhez, íves beltéri ajtóalkatrészek
- egyéb beltéri tárgyak (7. ábra).

Egyéb:

- hangszerkészítés, különleges igényeknek megfelelő hangszeralkatrészek előállítás
- sportszer (ütők, dobantó, stb.)
- logó (faragás helyett térben hajlított fából)
- szerszámnyél, egyéb rezgéscsillapító alkatrész
- használati tárgy (sétabot, teáskanna fogantyú, fejhallgató, nyakék, fülbevaló és egyéb ékszer, kulcstartó, szalvétatartó, stb.)
- járműalkatrészek (autó műszerfal, hajó tölgyfabordák, stb.) (8. ábra)
- játékok
- talpbetét
- egészségügyi segédeszköz.



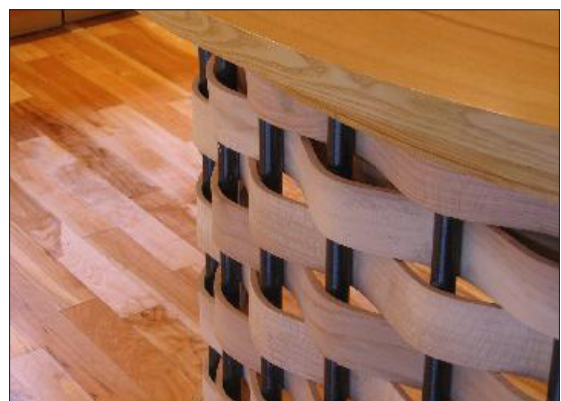
5. ábra Bükk farugós matrac (forrás: Bio-Textima 2015)

Figure 5 Mattress with compressed beech coil springs (source: Bio-Textima 2015)



3. ábra Japán szék tömörített-hajlított faanyagból (forrás: Sandgren Jakobsen H. 2015)

Figure 3 Japanese chair made of compressed-bent wood (source: Sandgren Jakobsen H. 2015)



4. ábra Konyhapult tömörített-hajlított faanyagból (forrás: Fluted B. 2008)

Figure 4 Kitchen counter made of compressed-bent wood (source: Fluted B. 2008)



6. ábra Fa korlát tömörített bükkfából (forrás: Q-railing 2015)

Figure 6 Wooden handrail made of compressed beech wood (source: Q-railing 2015)

Összefoglalás, következtetés

A cikk áttekintést ad a fa rostirányú tömörítésének hatására bekövetkező mechanikai változásokról és tulajdonságokról, valamint a megmunkálási folyamatokról és a felhasználási lehetőségekről.

A longitudinális irányú tömörítés hatására a fa néhány mechanikai tulajdonsága kedvezően változik (Kuzsella és Szabó 2006). A tönkrementelhez tartozó alakváltozás növekszik, míg a rugalmassági modulus csökken, könnyebb alakíthatóságot biztosítva. A fajlagos ütőmunka növekszik, a faanyag szívósabbá válik (a ridegsége csökken), a tömörítés csökkenti a hajlíthatósági sugarat. A lényegesen alacsonyabb hajlítási végerő mellett is a törésig elnyelt energia a többszörösére növekszik, tehát a tömörített faanyag a normál fához képest viszkoelasztikusabb viselkedést mutat. A hosszirányban tömörített, nedvesen hajlítható fa szilárdsági értékeinek mindegyike gyengébb lesz, a rostirányú nyújthatósága javul, míg a szárazon hajlítható tömörített faanyag hajlítószilárdsága növekszik a kezeletlen faanyaghoz képest. A keménység és a csavarállóság csökken, a sűrűség és az ütő-hajlító szilárdság növekszik. Az eljárást követően a klasszikus Thonet-tecnológiánál is jobb hajlítási viszonyszámokat lehet elérni, valamint a rostirányban tömörített fa hideg állapotban alakítható, tehát készletezhető, egyszerűbben kezelhető. A tömörítés célja pontosan a hajlíthatóság javítása és könnyítése, tehát segítségével valóban a kitűzött irányban változtathatóak a faanyag tulajdonságai.

Az ultrahang terjedési sebességének vagy a logaritmus hullám sajátfrekvenciájából megállapított rugalmassági modulusnak a meghatározásával a tömörödöttség mértéke ellenőrizhető. Mivel a tömörített anyag készletezhető, ez a kontroll lehetőség nagyon fontos lehet a félkész alapanyagok ellenőrzésénél a sorozatgyártásban.

A longitudinálisan préselt fa kis repedés és törés miatti veszteséggel hajlítható bármely irányban. Ezen felül a hajlítás egyszerű eszközökkel és sablonokkal megoldható, melyek használatát könnyű megtanulni (Anssary 2006). Tömörítés után a faanyag rögtön alkalmas a hajlításra, de szükség esetén tárolható is. Nedvesen hajlítható faanyag esetén a tárolást úgy kell megoldani, hogy a nedvességtartalom ne csökkenjen 20% alá (Báder és tsai. 2015). A beállított alakjában rögzített alkatrész alacsony rugalmasságnak köszönhetően szárítás után megtartja a formáját. Szárítást és lehűtést követően normál faanyagként megmunkálható lesz. Beépítéskor lehetőség van a hajlítási sugár kismértékű változtatására.

A rostirányban tömörített faanyagok az egyensúlyi nedvességtartalom változása miatt fellépő, jelenleg megoldatlan alaktartóssági problémái következtében kültérben nem jellemző az alkalmazása. A fakárosítókkal szembeni ellenállása megegyezik tömörítetlen faanyagéval, a rostlágyítás során viszont előnyösen, a technológiából kifolyólag bizonyos fokú hőkezelésen esik át a fa. Sok esetben a jelenleg felhasznált ragasztott alkatrészek helyettesíthetők tömörített fával, de többszörösen görbített felületekhez illeszthető furnér szintén készíthető belőle. A viszkoelasztikusabb viselkedés következtében rezgécscillapító alkatrészeknek is előnyösen használható. A rostirányban préselt fából előállított normál méretű termék kémiai adalékanyagoktól mentes, környezetbarát, ezért alkalmazása a bútoriparon, belsőépítészetben, építőiparon, hajógyártáson és képzőművészetben kívül a játék- és sportszergyártás, valamint az egészségügy területére is kiterjeszhető.

A rostirányú tömörítés egyértelmű előnye, hogy hidegen is hajlítható természetes faanyagot eredményez,



7. ábra Fogasok tömörített-hajlított kőris faanyagból (forrás: Harrison 2012)

Figure 7 Coat hooks made of compressed-bent wood (source: Harrison 2012)



8. ábra Kormánykerék tömörített-hajlított faanyagból (forrás: Pure Timber 2015)

Figure 8 Steering wheel made of compressed-bent wood (source: Pure Timber 2015)

melyet más technológiával eddig nem sikerült megvalósítani a hajlíthatóságtól független fizikai tulajdonságok viszonylagos állandósága mellett.

Napjainkban több különleges feladathoz az ipari termelésben főként a belsőépítészet és a bútortermelés területén használják fel, sok esetben speciális igényeknek megfelelő egyedi termékek elkészítéséhez és felújításokhoz. A termék és tulajdonságainak ismertebbé válásával növekvő érdeklődés és kereslet várható a tömörített faanyagra a versenyszféra felől. Mindehhez természetesen szükséges, hogy a faiparban dolgozók tudatában legyenek ezen anyag létezésének, tulajdonságainak és ezen keresztül felhasználási lehetőségeinek.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Talentum Műhely - a tudományért és tehetségekért a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0005 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Anssary E. A. (2006) An Approach to Support the Design Process Considering Technological Possibilities. Doktori értekezés. University of Duisburg-Essen, Department of Art and Design, Essen, Németország, 207 o.
- Báder M. (2015) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése 1. rész: Az alapanyagok és előkészítésük, a tömörítés elmélete. *Faipar*, 63. évf. 1. szám - <http://dx.doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.8>
- Báder M., Németh R., Ábrahám J. (2015) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése 2. rész: Történelem és szabadalmak. A tömörítés tulajdonságai és a tömörítést követő eljárások. *Faipar*, 63. évf. 1. szám <http://dx.doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.13>
- Bio-Textima Kft. (2015) Vitalwood Premium Selection. <http://vitalwood.hu/vitalwood-premium-selection_matrac.php> Megtekintve: 2015.09.26.
- Buchter J., J. Adelhoej, J. Ljoerring, O. Hansen (1993) Introducing Compressed Wood. Danish Technological Institute, Department of Wood and Furniture, Taastrup, Dánia, 27-28. o.
- Candidus P. Sas. (2013) Bendywood – 1st Time User Guide. Candidus Prugger Sas, Bressanone, Olaszország, 3. o.
- Candidus P. Sas. (2014a) Bendywood applications. <http://www.bendywood.info/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=4&lang=english> Megtekintve: 2014.01.29.
- Candidus P. Sas. (2014b) Technical Details. <http://www.bendywood.info/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=18&lang=english> Megtekintve: 2014.01.29.
- Candidus P. Sas. (2014c) Benefits Bendywood. <http://www.bendywood.info/index.php?option=com_content&task=view&id=5&Itemid=5&lang=english> Megtekintve: 2014.01.29.
- Compwood M. Ltd. (2008) English Manual. <<http://www.compwood-eng.dana8.dk/data/images/man%20eng.pdf>> Megtekintve: 2008.09.14.
- Compwood P. Kft. (2007) Bendable hardwood manual. Compwood Products Kft., Budapest, 3–15. o.
- Csóka L. (2003) Fa csillapítási tényezője. *Faipar*, 51(2): 4–6.
- Deibl H-J., J. Illhardt, H-J. Walter (1999) Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen aus biegbarem Holz. Deutsches Patent- und Markenamt, DE19913775 A1 sz. szabadalmi leírás, 1–2. o.
- Dienes Zs. (2013) Terméktervezés tömörített faanyag felhasználásával. Szakdolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 58 o.
- Fluted Beams Llc. (2008) Curved Kitchen Island <<http://www.woodweb.com/galleries/project/posts/1298.html>> Megtekintve: 2015.06.12.
- Hanemann M. (1917) Holzaufbereitungsverfahren. Deutsches Reich Reichspatentamt, 318197 sz. szabadalmi leírás, 1. o.
- Harrison D. (2012) The Homelife Blog - Wacky ways with wood <<http://blogs.homelife.com.au/homelife/article/wacky-ways-with-wood/>> Megtekintve: 2015.06.12.
- Ivánovics G. (2005) A fa hajlításának technológiája napjainkban. In: Konferencia kiadvány, Danyi, J. et. al. szerk. AGTEDU 2005, Műszaki és Természettudományi Szekció, Kecskeméti Főiskola, Kecskemét, 2005. november, 189–193. o.

- Ivánovics G. (2006) Rostirányban tömörített faanyagok szilárdsági vizsgálata. In: Konferencia kiadvány, Belina, K. és tsai. szerk. AGTEDU 2006, Műszaki és Természettudományi Szekció, Kecskeméti Főiskola, Kecskemét, 2006. november, 171–176. o.
- Ivánovics G. (2012) Nyomott faanyag alakváltozási folyamata. Kézirat, Kecskeméti Főiskola, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskemét, 2–6. o.
- Komáromy G. (1999) A fa hajlításának elméleti alapjai és néhány gyakorlati kérdése. Szakdolgozat, Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 41 o.
- Kovács Zs., Süveg J., Papp T. (2006) Mechanikai megmunkálás II. – A fa hajlítása. Kézirat, NymE Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 57–68. o.
- Kuzsella L., Szabó I. (2006) A fa tömörítésének hatása a mechanikai tulajdonságokra. In: Konferencia kiadvány, Bitay E. szerk. XI. Fial Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2006.03.24–25., 233–236. o.
- Kuzsella L. (2011a) Rostirányú tömörítés hatása a bükk faanyag szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira. Doktori értekezés, Miskolci Egyetem Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Miskolc, 151 o.
- Kuzsella L. (2011b) Rostirányú tömörítés hatása a bükk logaritmikus dekrementumára. In: konferencia kiadvány, XVI. Fial Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2011.03.24–25., 173–176. o.
- Kuzsella L., Bárczy P., Szabó I. (2011) Ősi anyag új feldolgozása, avagy tömörített fából energiatároló rugó. *Bányászati és Kohászati Lapok*, 144(2): 40–41.
- Pure Timber Llc. (2015) Steering Wheel <<http://www.puretimber.com/automotive/>> Megtekintve: 2015.06.12.
- Q-railing Europe Holding GmbH (2015) Bandywood korlát. <<https://www.q-railing.com/en-hu/content/service/assembly-maintenance>> Megtekintve: 2015.10.06.
- Sandgren Jakobsen H. (2015) Eri tatami szék <<http://www.scandinaviandesign.com/miniature/400/ERI.jpg>> Megtekintve: 2015.09.26.
- Segesdy F. (2003) Modern konyhabútor tervezése tömörített anyag felhasználásával. Diplomamunka, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 32–83. o.
- Sőregi R. (2007) Vitorláshajó kabinbelső kialakítása tömörített fa alkalmazásával. Diplomamunka, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 55 o.
- Sparke B. (1989) Fremgangsmåde til fremstilling af træ med blivende fleksibilitet, især til anvendelse som kantlister, møbeldele og lignende formål, hvor der stilles s tore krav til træets bøjelighed (Eljárás tartósan rugalmas faanyag előállítására részben élzáró anyagnak, bútoralkatrésznek és ahol igény van a fa hajlíthatóságára). Danmark Patentdirektoratet, 170364 sz. szabadalmi leírás, Dánia, 1–6. o.
- Szabó I. (2002) A fa hajlítása. In: Molnárné Posch P. szerk. Faipari kézikönyv II., Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, 60–61. o.
- Szabó I., Eckhardt L., Czél Gy. (2005) Energiatároló tömörített farugó. Magyar Szabadalmi Hivatal, 226783 sz. szabadalmi leírás, 2–5. o.
- Thomassen T., Ljorring J., Hansen O. (1990) Eljárás és berendezés fatömb összenyomására. Magyar Szabadalmi Hivatal, HUT63087A sz. szabadalmi közzétételi példány, 2–19. o.
- Volkmer T., A. Wagenführ, B. Buchelt (2001) Verfahren zur Herstellung von dauernd weichbiegsamen Holz sowie Einrichtung hierzu. Deutsches Patent- und Markenamt, 10141391 C1 sz. szabadalmi leírás, 1–4. o.