

Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése

I. rész: Az alapanyagok és előkészítésük, a tömörítés elmélete

BÁDER Mátyás¹

¹ Nyugat-Magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faanyagtudományi Intézet

Kivonat

A fa longitudinális tömörítésének célja annak hajlékonyabbá, alakíthatóvá tétele. A megfelelő minőségű tömörített faanyag előállításának meghatározó tényezői a fafaj, alapanyag minősége, nedvességtartalom, hőmérséklet, tömörítési arány, stb. A legtöbb 20% feletti kezdeti nedvességtartalommal rendelkező jó minőségű keménylombos fafaj tömöríthető. Az általában gőzöléssel plasztifikált faanyag rostirányú tömörítése során a faanyagot meg kell támasztani az oldalirányú kihajlás megakadályozására, csökkentve eközben a fellépő súrlódási erőknek az egyenletes tömörítést hosszirányban gátló hatását. A rostirányú préselés hatására a fa hidrotermikus kezeléssel meglágyított és folyamatosan legalább 80 °C hőmérsékleten tartott sejtszerkezetében a nagyrészt lignin és hemicellulóz alkotta középlemez engedi elcsúszni egymáshoz képest a magas cellulóztartalmú, szilárdítást biztosító farostokat és egyéb szöveteket, miközben ezeknek a longitudinális irányultságú hosszúkák szöveti elemeknek a sejtfa meggyűrődik. Az eljárással a fa rugalmassági modulusa lecsökken, így a kezeletlen faanyaghoz képest lényegesen könnyebben hajlíthatóvá válik, egyes módszerek szerint akár szárított és szobahőmérsékletű állapotban is.

Kulcsszavak: rostirányú tömörítés, rostlágyítás, famodifikáció, hajlítás, bútoripar

Practical Issues of Longitudinally Compressed Wood

Part 1: The raw material and its preparation; the theory of compression

Abstract

The purpose of the longitudinal compression of wood is to make it bendable. Several factors influence the outcome of compression (wood species and quality, moisture content, temperature, compression rate, etc.). Most hardwood species with initial moisture contents above 20% can be compressed. The wood is normally softened by steaming and, during the process, kept at a temperature above 80 °C. While compressed in fibre direction it needs to be restricted within the compression chamber to prevent the wood from suckling. Frictional forces need to be minimized so that the transformation is performed at even rate. The middle lamellae, mostly consisting of lignin and hemicelluloses, are softened by thermo-hydro wood processing, allowing of the wood fibres with high cellulose content to slip during compression, and the longitudinal cell walls crinkle. Consequently, the elasticity of the wood decreases, thus it will be much easier to bend, even when dry and at room temperature.

Keywords: compression in the fibre direction, longitudinal compression, fibre softening, wood modification, bending, wood industry

Bevezetés

A gőzöléses fahajlítást sorozatgyártás céljából Michael Thonet alkalmazta elsőként ipari körülmények között. A technológia alkalmazása körülményes, mert a felmelegített faanyag kihűlés után ismét nehezen hajlíthatóvá válik (Kuzsella és Szabó 2006). Ennek során a belső, kisebb íven nyomás alá kerül a fa, míg a külső oldalon a feszültségmentes réteg (semleges szál) elhelyezkedésétől függően húzásnak lehet kitéve. Utóbbit jóval rosszabbul tűri a faanyag, mint a tömörítést.

A rostirányú tömörítésen alapuló eljárás új lehetőségeket mutatott a fa hajlításának technológiájában, mert a folyamat gyakorlatilag bármilyen keresztmetszetben, elsősorban nedvesen, de esetenként hideg és száraz állapotban is a tömörítetlen faanyagnál lényegesen könnyebben hajlítható alapanyagot eredményez a lecsökkent rugalmassági modulus hatására. Az elsődleges probléma a hosszirányú préselés közben fellépő oldalirányú kihajlás, minek következtében a teljes hosszra és keresztmetszetre vonatkozó egyenletes, szabályozott tömörödés elmaradna, valamint a törés veszélye is megnövekedne.

A megfelelő körülményeket legegyszerűbben egy erős falú préhüvellyel lehet biztosítani, mely képes a kihajlást megakadályozni, viszont hátránya, hogy a falának feszülve a faanyag megszorulhat és ekkor a tömörítés szintén nem lesz teljes hosszban azonos mértékű. Tömörítés közben a présforma oldalfalain, illetve bélésén, amely a fa mozgásában nem vesz részt, súrlódás keletkezik és a tömörítő erő nagy részét felemészti (Magyar–Amerikai Faipari Rt. 1927). Ez számottevő különbséget okoz a hossz mentén a mechanikai tulajdonságokban, azaz az egyenletes, jó minőségű hajlíthatóságot befolyásolja. A probléma kiküszöbölésére több megoldást is kidolgoztak, így napjainkban már lehetséges a jó minőségű tömörített faanyag előállítás.

Az eljáráshoz jelenleg alkalmazott fafajokat főként gőzöléssel plasztifikálják és a tömörítés aránya jellemzően 20%, ennek hatására a faanyag hajlítási viszonzyszáma akár 1/4 fölötti érték is lehet. A hajlítási végerő felére és a hajlítószilárdság is harmadára–felére redukálódik éppúgy, mint a rugalmassági modulus. A törésig elnyelt energia többszörösére emelkedik és az ütő-hajlító szilárdság másfél-kétszeresére javul. A nyomóerő megszűnése és a szárítás után a tömörített fa statikus szilárdsági tulajdonságai gyengébbek lesznek, míg a dinamikus tulajdonságai javulnak a kezeletlen faanyaghoz viszonyítva. A rostirányban préselt faanyagok napjainkban elsősorban beltérben vagy fedett helyen alkalmazhatók, mert a tömörített-hajlított fa a nedvességtartalmának növekedésével igyekszik felvenni eredeti alakját és méretét. Felhasználható alapanyagként a bútortiparban (szék, párkány, élléc, farugó, stb.), belsőépítészetben (korlát, szegélyléc, beltéri ajtóalkatrész, iparművészet, stb.) és egyéb célokra is (hangszer, sportszer, szerszámnyél, játék, stb.).

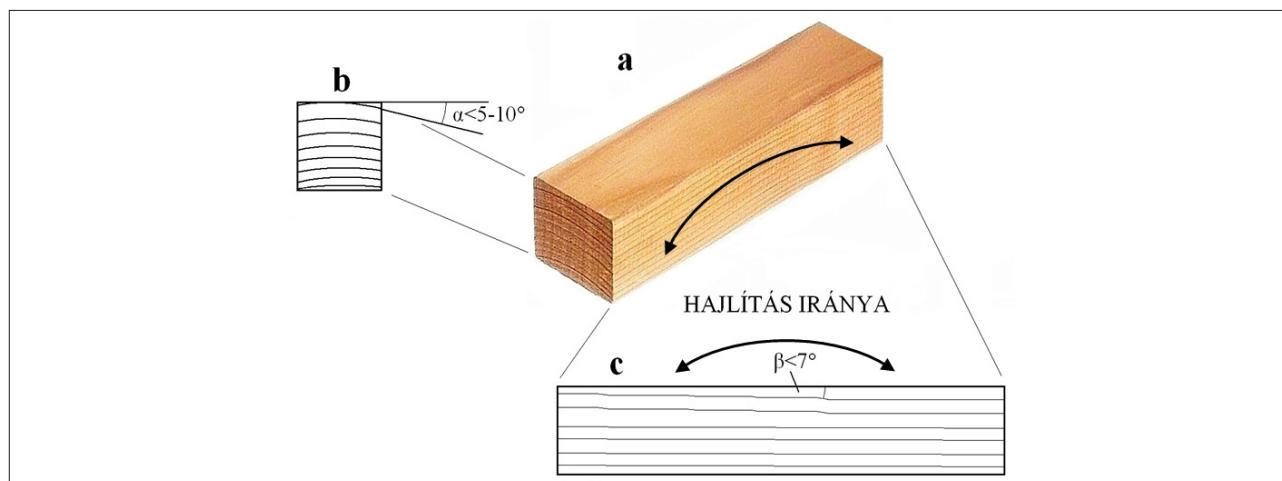
A cikksorozatban a fa tömörítésével kapcsolatos tudnivalók, eddigi fontos kutatási eredmények és alkalmazott módszerek, valamint ipari tapasztalatok, a termékek fizikai-mechanikai tulajdonságai kerülnek bemutatásra, azok kritikai értékelésével. Jelen cikk áttekintést ad a tömörítéshez megfelelő alapanyagokról és ezek előkészítéséről, a fában végbemenő változásokról, míg a következő rész a témával kapcsolatban megjelent szabadalmakkal, a tömörítési folyamat tulajdonságaival és a faanyag tömörítését közvetlenül követő kezelési lehetőségekkel foglalkozik.

A rostirányú tömörítéshez alkalmas szöveti felépítés, fafajok, nedvességtartalom

Ebben a fejezetben ismertetésre kerülnek a rostirányú tömörítéshez alkalmas alapanyagok és az ezekkel szemben támasztott minőségi igények. A megfelelő alapanyagok és előkészítési eljárások ismeretében a tömörítési folyamat elméletének tárgyalása a későbbiekben következik.

A longitudinális tömörítés célja a természetes faanyag hajlíthatóvá tétele. A tömörítés és a hajlítás egymástól függetlenül is jó minőségű alapanyagot igényel, így a fának például a hordógyártásnak, vagy a Thonet-féle hajlításnak megfelelően egyaránt magas minőségi követelményeknek kell eleget tennie. Kovács és tsai. (2006), valamint Szabó (2002) egybehangzóan nyilatkoznak a hajlításra alkalmas alapanyag tulajdonságairól: az egyenes növésű, göcsmentes, keskeny évgyűrűs fák (bükk, kőris, szil, tölgy, akác, nyír, juhar, cseresznye, dió) a legalkalmasabbak. A fa az évgyűrűre merőleges irányban, tehát a bélsugar irányában ideálisan hajlítható (1.a ábra). Az évgyűrűk kismértékű dőlése megengedett ($\alpha=0-10^\circ$), mert ekkora eltérés még nem befolyásolja a hajlítás minőségét (1.b ábra). A száliránynak a munkadarab élével párhuzamosnak kell lennie, mivel a hajlításnál fellépő feszültségek hatására a túlzott rosteltérés (szálkifutás) töréshez vezet. Párhuzamos szálirány mellett maximálisan $\beta=7^\circ$ -os rostelhajlás engedhető meg (1.c ábra).

A Compwood M. (2008) kiadványa a következőket adja meg a faanyag minőségével és a fafajok egyedi tulajdonságaival kapcsolatban: a rönk felfűrészelésének módja a tömörítés szempontjából gyakorlatilag mindegy, lehet élesvágás, negyedelő vágás vagy átmeneti a kettő közt. A felhasznált pallóknak fűrészpormentesnek kell lenniük. A bútortipar minőségű alapanyagok göcsössége azok tömöríthetőségét nem befolyásolja, viszont a hajlításnál problémákat okozhatnak ezek a fahibák, így lehetőleg göcsmentes alapanyag ajánlott a tömörítő gépeket gyártó cég szerint is. Ennek ellenére a kőrisben és szilben legfeljebb 3 db kisméretű, 10 mm átmérőjű göcs megengedett pallónként. A szilfának nem szabad szijácsosnak lennie. Bükkfa tömörítése esetén minden



1. ábra Faanyag ideális szálszerkezete hajlításhoz (a), évgyűrűk megengedett dőlésszöge (b) és a megengedhető rostelhajlás (c)

Figure 1 The ideal wood structure for bending (a), allowed angular offset of the annual rings (b) and the allowable grain deflection (c)

oldalon hibátlan alapanyag szükséges és az álgeszt – éppúgy, mint a kőrisnél – nem megengedett. Utóbbi oka nem a mechanikai tulajdonságok eltérésében keresendő, hanem az értékes végtermék egységes megjelenésében, mert a jó minőségű, drága alapanyag és a magas hozzáadott érték megkívánja a legjobb kihozatalt és megjelenést. Minden fajtára vonatkozóan az egyenetlen, durva élek, repedések, íves növekedés és a csavarodottság tömöríthetőséget kizáró fahibák.

Napjainkban elsősorban négyzetes vagy téglalap keresztmetszetű fa tömörítését végzik, de megfelelő megtámasztás mellett a longitudinális préselés szempontjából az alapanyag lehet bármilyen más keresztmetszetű, így például háromszögletű, négyszögletű, ötszögletű, hatszögletű stb. vagy kör, ellipszis, igény szerint bármely más lekerekített idom és ezek kombinációja (Thomassen és tsai. 1990). A kádáripárban a bélsugárnak a hordó palástját alkotó dongák lapjával párhuzamosan kell állnia, vagyis a hajlítás iránya a bélsugárra merőleges, mert így előzhető meg, hogy a bélsugár, mint a fa keresztirányú szállító és raktározó egysége, a folyadékot a hordóból kivezesse. Ebben az esetben a Kovács és tsai. (2006) és Szabó (2002) által leírtakkal ellentétben az évgyűrűkre merőlegesen végzett hajlítás szükséges, még ha nem is ez az ideális. Továbbá minden szignifikáns fahiba és szöveti elváltozás (göcs, repedés, stb.) kizáró okot jelent egyrészt a megfelelő hajlítás, másrészt a folyadékmegtartás biztosítása érdekében. Az előzők alapján kitűnik, hogy magas minőségű, egységes felépítésű és egészséges alapanyag szükséges a fa hajlításához, mely sugárirányban és húrirányban egyaránt elvégezhető.

Néhány tulajdonság meghatározza, hogy a tömörített fa milyen mértékben hajlítható, például a fafaj, minőség, méretek és a tömörítés aránya éppúgy, mint az alkatrészek alakja és a felhasznált eszközök (Anssary 2006). A tömöríthetőség – ezen keresztül a hajlíthatóság – a sejtszerkezettől függ, ezért fafajonként változó (Szabó 2002). A következő fafajok tömörítéssel kezelhetőnek bizonyultak Dánia, Japán és az USA területéről: bükk (*Fagus sylvatica* v. *Fagus ssp.*), ezüst juhar (*Acer saccharinum*), fekete cseresznye (*Prunus serotina*), fekete dió (*Juglans nigra*), kőris (*Fraxinus excelsior* v. *Fraxinus americana*), hegyi szil (*Ulmus glabra*), tölgy (*Quercus ssp. deciduas*, *Quercus petraea* v. *Quercus velutina*) (Kovács és tsai. 2006). A Compwood Machines Ltd. (2001) a fenti fajok és alfajok többségét szintén megadta a fafajváltozatok említésének mellőzésével, általános nevükön. Emellett tömörítésre alkalmasnak találta a ciprusfát (Észak-Amerika), afzéliát (Észak-Afrika), pau marfimot (Dél-Amerika) is. Deibl és tsai. (1999) és a Material Archiv (2013) az európai választék egy részét említették a korábbi felsorolásból, rajtuk kívül Kuzsella és tsai. (2011) az akácot, hársat sorolták még a tömöríthető fafajok közé. Sparke (1989) csak a keménylombosokat említette általánosságban, kiemelve közülük a bükköt és a tölgyet.

Hyams (2008) ausztrál területen nagy mennyiségben megtalálható ipari fákkal foglalkozott. A hegyi kőris (*Eucalyptus regnans*) jól tömöríthető, hasonlóan az előző keménylombosokhoz. A hamis mahagóni (*Eucalyptus marginata*) a ferdeszalúsága miatt nehezen kezelhető, de a 20% tömörítési arány elérése itt sem okoz problémát. A foltos gumifa (*Corymbia maculata*) szintén nehezen tömöríthető, a származási helyétől függően maximum 12–15%-ban.

Szabó és tsai. (2005) vizsgálatai alapján tömörített alapanyagból lehetséges energiatároló farugó készítése, a kocsánytalan tölgyet és a Magyarországon élő bükkfa fajokat alapul véve. Kutatásaik alapján a Föld más konti-

nensein található fafajok csak igen korlátozott mértékben alkalmasak energiatároló tömörített farugó előállítására. Ivánovics (2012) szerint a fenyőfélék korai pásztáját alkotó vékonyfalú tracheida sejtek szerkezete hajlamos a mikro-kihajlásos tönkrementelre és szálszakadásra, ami alkalmatlanná teszi a fenyőt a tömörítéses hajlításra.

A különböző források által felsorolt fajok jelentős része keménylombos fafaj a világ minden részéről, alkalmanként egy-egy alfaj külön kiemelésével, de a megállapítások ezekre a fafajokra egységesen vonatkoztathatóak. Általánosságban elmondható, hogy a keménylombosok jól tömöríthetőek, a lágylombos fajokról kevés információ áll rendelkezésre, míg a fenyőfélék a fent tárgyalt okból, a gyenge tracheida sejtek miatt nem tömöríthetőek. Peres és tsai. (2013), Kuzsella és tsai. (2011) és Szabó (2002) egyaránt megállapították, hogy a szijács és a geszt aránya, valamint az évgyűrűk elhelyezkedése a tömörítés minőségét nem befolyásolja.

Hajlításkor a faanyagnak lehetőleg a bélhez közelebb eső oldalát (jobb oldal) kell a nyomott részen használni, mert a bél felőli részen a fa érettebb és kevésbé tűri a húzást. Egységesen tömöríthető és hajlítható alkatrészek sorozatgyártásban történő előállításához az alapanyag kiválasztásánál célszerű meghatározni annak a fatörzsből elfoglalt helyét, tekintettel az alkotók arányára és a mikrofibrilla-szögére, ezeken keresztül pedig a mechanikai tulajdonságok, tehát a tömöríthetőség változékonyságára.

Az alapanyag kiindulási nedvességtartalma szintén fontos tényezője a tömörítési folyamatnak. A víz a fában négy formában lehet jelen: szabad folyadékvízként és vízgőzként a sejtüregekben, kötött vízként a sejtfalakban és kristályvízként a fa kémiai alkotórészeihez kapcsolódva (Németh 2002). A tömörítés előkészítéseként szükséges rostlágyítás szempontjából a kötött víznek van fontos szerepe, mint a rosttelítettség legjelentősebb tényezőjének. A rosttelítettség az elsődleges meghatározás szerint a második deszorpciós görbe 100%-os relatív páratartalomra való extrapolálása, gyakorlatilag valamely fizikai jellemző és a nedvességtartalom összefüggésének megváltozásához tartozó, általában 24–30%-ra becsült nedvességtartalom (Németh 2002).

Kuzsella (2011a) a 32% nedvességtartalmú akácfát sikertelenül próbálta tömöríteni, viszont 20–25% közötti nedvességtartalommal már a 7,5% és 15% tömörítési arány sem okozott problémát. A nyár faanyag tömörítése gyűrődések keletkezése miatt még kisebb mértékben sem sikerült. Deibl és tsai. (1999) szabadalmukban a tömörítéshez elsősorban nyers, élőnedves állapotú fűrészárut ajánlanak körülbelül 100x120 mm keresztmetszettel, melyet hozzávetőleg 6 órán keresztül kell gőzölni, amíg nedvességtartalma rosttelítettség közeli állapotba áll be. A tömörítéshez a 20–25% közti nedvességtartalmú faanyagot autoklávban vagy gőzölő berendezésben kell kezelni (Compwood M. 2001, Szabó 2002 és Szabó és tsai. 2005, Rasmussen 2014). A Compwood M. (2008) által közzétett információk szerint a frissen kitermelt faanyag az ideális, egyéb esetben a fűrészáru minden pontján minimum 16% fölötti nedvességtartalom szükséges. „A rosttelítettségi ponttól 2...8%-kal kisebb nedvességtartalmú faanyag alkalmas rostirányú tömörítésre” (Kuzsella és tsai. 2011).

Megállapítható, hogy tömörítéssel a faanyag hajlíthatóvá tétele és ezt követően az előre meghatározott célnak megfelelő felhasználása a legtöbb keménylombos fa esetében lehetséges. Magas minőségi követelményeknek kell megfelelnie az alapanyagoknak, így a lehető legjobb kihozatal elérése rendkívül fontos a költséghatékony termelés érdekében. A szakirodalom a tömörítéshez szükséges nedvességtartalmat legalább 20%-nak javasolja, mely a rosttelítettségig emelkedhet.

Rostlágyítás

A plasztifikálás elve a faanyag nedvesség jelenlétében történő termikus kezelésén alapszik. Az alkalmazott hőmérséklet és nyomás a kívánt eredményektől függően széles skálán mozoghat. A sejtfal nagyrészt cellulózból és hemicellulózból épül fel, elsősorban ezek hidroxil csoportjai okozzák a sejtfal higroszkópikus tulajdonságait. A lignin összetartja a rostokat és merevíti a sejtfalat (Rowell és tsai. 2005). Németh (2002) a disszertációjában megállapította, hogy a cellulóz áll leginkább ellen a hidrotermikus kezelésnek, és a gőzölés különösen a hemicellulóz állományra van hatással. A szerző szerint a bomlást a hemicellulózokból, fapoliózkodokból és ligninből lehasadó ecetsav és hangyasav gerjeszti, a folyamatok eredményeként a szövetek fellazulása következik be, mivel az említett savak többek között a középlamellában található pektint is megtámadják, melynek a sejtek egymáshoz ragasztásában van szerepe. Bak (2012) egyértelműen rámutatott, hogy a sejtfalalkotó makromolekulák közül a hemicellulózok a legérzékenyebbek a hőhatásra, ezek roncsolódása a legnagyobb 160–200 °C közötti tartományban. Németh (2002) munkája szerint a kiindulási nedvességtartalmon keresztül az átmelegedés ideje lényegesen befolyásolja a hemicellulózok degradációját. Alacsonyabb nedvességtartalom esetén az adott keresztmetszetű faanyag lassabb átmelegedésével, azaz nagyobb mértékű hemicellulóz bomlással kell számolni.

Mivel a felületükön található a legtöbb víz megkötésére alkalmas hidroxil-csoport, a hemicellulózok az egyen-súlyi nedvességtartalomban is kulcsfontosságú szerepet játszanak.

„Ha a fát felmelegítjük, abban a hőmérséklet és a melegbehatás időtartamától függően vegyi folyamatok mennek végbé. E vegyi folyamatok közül a lignin oxidációja a faanyag fokozatos lágyítását eredményezi, mivel a lignin és cellulóz-hemicellulóz közötti kötés az oxidációs-redukciós folyamatok következtében meglazul. Ha a hőt vízgőzzel közvetítjük, a hemicellulózok egy része kilúgozódik. A kilúgozott hemicellulózok túlnyomó részben nedvszívó tulajdonságúak, tehát kilúgozódásuk után a fa kevésbé lesz nedvszívó, annál is inkább, mert az oxidálódott, illetve degradációt szenvedett lignin víztaszító képessége is megnövekszik” (Barlai 1955).

Németh (2002) munkájában bemutatottak alapján a kezelt tölgy egyes kémiai alkotórészeit és termikus bomlásukat vizsgálva 100–150 °C-on az tapasztalható, hogy a cellulóz csekély degradáción ment keresztül, a hemicellulózok a kezelési időtől függetlenül jelentős bomlást szenvedtek, a lignin a legstabilabb. Alpár (2011) szerint víz jelenlétében a lignin-hemicellulóz és a lignin-cellulóz kötések már 90 °C-on felszakadnak, magasabb hőmérsékleten (180–220 °C) pedig a lignin viszkózussá alakul. A hemicellulózok 150 °C fölött kezdenek bomlani, némely összetevőnek azonban már 100 °C alatti hőmérsékleten megindul az átalakulása (Hofmann 2013). Oxidatív atmoszférában, jelen esetben vizes-párás közegben a bomlásfolyamatok alacsonyabb hőmérsékleten indulnak (Németh 1998). Kovács és tsai. (2006) munkájukban megállapították, hogy a fa gőzöléssel történő lágyítása utáni jó hajlíthatóságának az a magyarázata, hogy a fában a lignin amorf állapotban van jelen, és a cellulózzrostokat úgy veszi körül, mint beton a vasbetétet. Ezért főzés vagy gőzölés hatására a faanyag plasztikussá válik, ami hajlításkor lehetővé teszi a rostok elmozdulását. Megállapították továbbá, hogy a fa maximális plaszticitása 25–30% nedvességtartalom és legalább 70–80 °C hőmérséklet mellett érhető el, majd lehűlést, ill. száradást követően újra megszilárdul a sejteket összekapcsoló középlemez.

Kuzsella és Szabó (2006), valamint Rasmussen (2014) szerint tömörítés előtt a faanyagot plasztifikálni kell kb. 100 °C-on, minek következtében nyomószilárdsága lecsökken, alakíthatóbbá válik és képes elviselni a zsugorodást jelentősebb károsodás nélkül. A hőközlés idejét az alkatrész geometriai méretei határozzák meg, elsősorban a keresztmetszete. Ivánovics (2008) kutatásai alapján a tömörítéshez alkalmas, rosttelítettségi határnak megfelelő nedvességtartalmú faanyag normál nyomáson 90–100 °C hőmérsékletre gőzölve megegyezik a Thonet-technológia hajlítás előtti anyagával. Az előkészített fahasáb csak melegen tömöríthető megfelelően. A Compwood M. (2001) leírása szerint a fa gőzölése meglágyítja a hemicellulózokat, ezután hosszirányban, a rostok irányában tömöríthetővé válik egy különleges hidraulikus présben. Végül a fa rostjainak a falai meggyűrődnek.

A Holzveredelung (1926) szabadalmában a következők találhatók a plasztifikálásra vonatkozóan: a fát csökkentett légnyomáson tartva, majd főzve vagy gőzölve a lágyítás idejét 1/3-ra lehet rövidíteni. Még gyorsabb és egyszerűbb eljárás az alacsony légnyomáson tartott fát rövid ideig gőzöléssel, vagy víz jelenléte mellett történő gőzöléssel kezelni, így kb. 1/5–1/6-ra rövidül a lágyítás ideje. Ehelyett a fát tartalmazó légritka térbe csupán kis mennyiségű forró vizet engedve a fa bármilyen további kezelés nélkül megfelelően meglágyul. Ebben az esetben a lágyítási idő 1/3–1/4-e a korábban szükséges időnek. Az egyenletesebb lágyítás segít az egységes tömörítést, és ezáltal a fa megfelelő hajlíthatóságát elérni. A fa szerkezete nem egyenletes, ezért főzés vagy gőzölés előtt, vagy még inkább a főzés vagy gőzölés közben vákuumot alkalmazva a fa különböző szerkezeti egyenetlenségeiből származó eltérő lágyítása lényegesen csökkenni fog, és következőképpen a tömörített fa is egyenletesebben és nagyobb méretben hajlítható lesz.

Az egységes előkezelés szerepe tehát rendkívül fontos a megfelelő tömörödés és egyenletes hajlíthatóság elérésében. A megfelelő rostlágyítás alapfeltétele nedves alapanyag felhasználása és a víz forráspontjához közeli hőmérsékleten történő kezelése (90–110 °C), mely során a cellulóz tulajdonságai annak stabil felépítése és erős kötései miatt nem módosulnak. Minimálisan 80 °C hőmérséklet megtartása szükséges az anyag teljes hosszában és keresztmetszetében a tömörítés folyamán. A tömörítési rostirányú tömörítése és hajlítása szempontjából egyaránt az erős és ellenálló cellulózzrostokat összekapcsoló részek a leglényegesebbek, vagyis a P-M-P kötőszövet (elsődleges sejtfa-középlemez-elsődleges sejtfa), melyek jelentős részben ligninből és hemicellulózokból épülnek fel és hidrotermikus kezeléssel lágyíthatóak. A lignin stabil rostlágyítási hőmérsékleten, de kötései gyengülnek vagy megszűnnek, míg a hemicellulózok egy része módosul. A plasztifikálásnak köszönhetően a nagyrészt cellulózból felépülő rostkötegek el tudnak csúszni egymáshoz képest, de a köztük lévő kötést a középlemez a hűtés és szárítás, vagyis a lágyított állapotot követő visszasilárdulás után továbbra is biztosítani képes.

A rostirányú tömörítés elmélete

Az előzőekben bemutatott tulajdonságoknak megfelelő, jól előkészített alapanyagok felhasználásával lehetséges megfelelő minőségű rostirányú tömörítést kivitelezni. A fát általában teljes hosszában egyenletes előkezelésnek vetik alá, azonban a fatömb hosszmenti részleges összenyomása szakaszos rostlágyítással vagy a préselés során a melegítés változtatásával is elérhető (Thomassen és tsai. 1990).

A rostirányú fatömörítési eljárás lényege a rúd alakú faanyagok keresztmetszet változása nélküli, hossz-tengely mentén végrehajtott zömítése (Kuzsella és Szabó 2006). A folyamat a fa gőzöléses lágyításán alapszik, ezután tömöríthető hosszirányban különleges szerszámok segítségével (Anssary 2006). Tömörítés közben az alkatrészeket oldalról meg kell támasztani a nyomás hatására fellépő kihajlás megakadályozására (Szabó 2002). A fatömb végein bevezetett ellentétes irányú tömörítő erők az oldalfelületeken is hatnak, mint súrlódási erők (Thomassen és tsai. 1990). A rostirányú zsugorítás hatására a rostfalak harmonikaszzerűen gyűrődnek, a fa tömörödik, ezáltal a faanyag hajlíthatóvá válik (Szabó és tsai. 2005). Tömörítés után fokozatos nyomáscsökkentéssel a rugalmas deformáció kiegyenlítődik az anyagban, végül a tömörítés fokától függő, maradandó hosszcsökkenés figyelhető meg. A faanyag kiválóan hajlítható lesz, majd száradás után a kívánt formában újra merevvé válik (Kuzsella és Szabó 2006). Ideális tömörítés során minden keresztmetszet alakváltozása körülbelül azonos mértékű, nagyobb tömörítésnél kisebb változékonysággal, és a faanyag tönkremenetele nem kezdődik meg a leggyengébb helyen. A nagyobb mértékű tömörítéshez nagyobb erő szükséges, így a kevésbé tömörödött részek, melyeknek adott tömörítési arány eléréséhez nagyobb erőre van szükségük, szintén elszenvedik a többi résznél már korábban létrejött tömörödést. Az elérhető legnagyobb tömörítési fok legfeljebb 25–28% lehet, utána egy vagy több helyen nem kívánt károsodásokat szenved, tehát a művelet kitűzött céljához képest tönkremegy a faanyag (Ivánovics 2012).

A tömörítés lehetőségét a faszövet üreges volta adja, illetve azon tulajdonsága, hogy plasztifikált állapotban a fa a szerkezet tönkremenetele nélkül összenyomható (Ivánovics 2008). A kezeletlen faanyaghoz képest a tömörített faanyag mechanikai tulajdonságainak változása (statikus tulajdonságok romlása és dinamikus tulajdonságok javulása), a rostszerkezet bizonyos mértékű változásán kívül a lignin-kötések gyengülésének és a hemicellulózok plasztifikálás során végbemenő részleges átalakulásának is tulajdonítható. A rostirányú tömörítés hatására az anyag szerkezetében szükségszerűen módosulások történnek, amelyek a fizikai-mechanikai tulajdonságok megváltozását okozzák. A tömörített faanyag előállításakor a faanyag hosszirányú merevségét biztosító rostok helyzete és alakja ugyan megváltozik, de felépítésük változatlan marad a tömörítési eljárás következtében megrövidült faanyagban (Ivánovics 2012).

A különböző mértékű tömörítések által okozott mikroszkopikus szintű elváltozások vizsgálati kimutatták, hogy a bükkfában a 15%-os tömörítési arány eléréséig már szinte az összes edény (a vízszállításért felelős tracheák) sejtfa meggyűrődik, egyúttal valószínűsíthető, hogy a farostok is hasonlóan viselkednek. *„A bükk faanyag rostirányú makroszkopikus tömörítésének mikroszkopikus szerkezetre gyakorolt hatásának vizsgálata megmutatta, hogy hogyan változott az egy látótérben felfedezhető gyűrődött falú tracheák aránya a látótérben lévő összes tracheák számához képest. A vizsgált tömörítési szinteken az azonos látótérben látható gyűrődött tracheák aránya növekedett (0%; 13%; 63%; 98%; 99%) a tömörítés mértékének növelésével [mely rendre 0%, 5%, 10%, 15%, 23% volt]”* (Kuzsella 2011).

Egy tömörítetlen állapotú bükkfa metszetről készült elektronmikroszkopos felvételhez képest (2.a ábra) jól látható, hogy a rostirányú tömörítés hatására az edény fala hullámossá válik (2.b ábra). A trachea gyűrődéséről készült felvételek mutatják legjobban a fa szerkezetének változását tömörítés hatására, de fontos szem előtt tartani, hogy a fatest legjelentősebb, nagy arányban megtalálható mechanikai eleme a farost, amely vastagabb fallal rendelkezik és a szilárdítás a fő feladata (Ivánovics 2012). A farostokról készített felvételek kevésbé látványosak, de a változások egyértelműen megmutatkoznak a tracheákról készült képekkel összehangban.

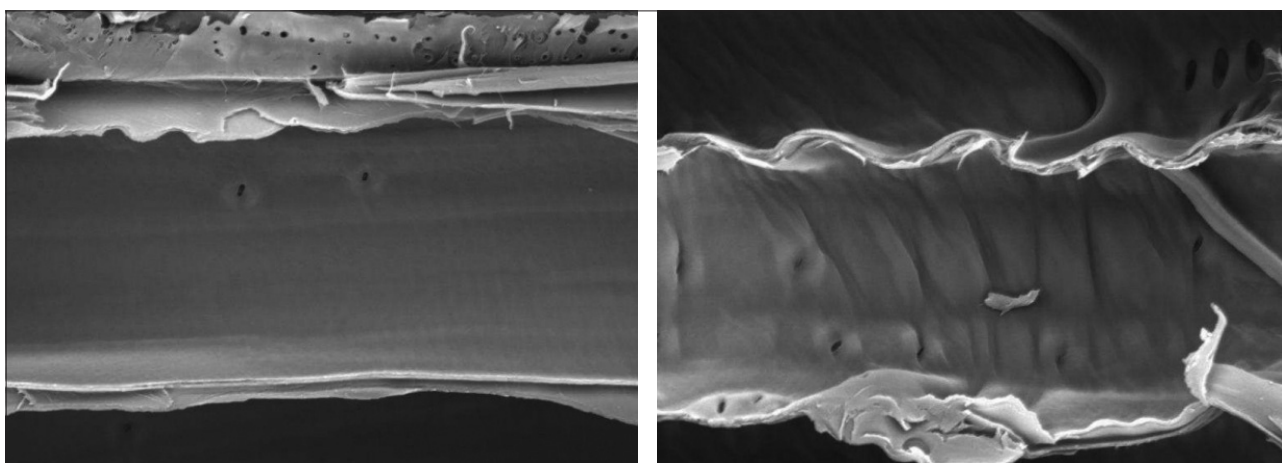
A makroszkopikus alakváltozás a bükkfa mikroszerkezetében is változásokat idéz elő, a sejtfaakat harmonikaszzerűen összegyűri, ami egyértelműen összefüggésbe hozható a makroszkopikus tulajdonságok nagymértékű megváltozásával (Kuzsella 2011). A rostkötegek a plasztifikált mátrixban elmozdulnak, esetleg sejtek közti repedések is megjelenhetnek. A sejtek elcsúszása a szomszédos sejtfaalak mentén, és a sejtfaalak vastagodása egyaránt megjelenhet a tömörödés hatására. Mindkét alakváltozás eredménye a keresztmetszet kismértékű növekedése, de jelentős az anyag sejtüregbe való benyomódása is (3. ábra) (Ivánovics 2012). Az előző megállá-

pításokkal konszenzusban Deibl és tsai. (1999) szerint a 20% mértékű rostirányú tömörítés folyamán a farostok egymásba csúsznak, míg a Compwood Machines Ltd. (2001) a fa rostfalainak meggyűrődéséről tájékoztat. Elektronmikroszkópos szöveti vizsgálatok azt mutatták, hogy a tömörített faanyag képlékeny alakíthatóságát a sejtfalak alakváltozása teszi lehetővé. Tömörítéskor harmonikaszzerűen hullámosodnak, majd a továbbalakítás, hajlítás során a húzott oldalon újra kiegyenesednek (Ivánovics 2006).

Amennyiben longitudinális irányú préselés hatására a minta nem tud kihajolni, törni, vagy nem szenved egyéb mechanikai sérüléseket, a rövidülés miatt az előbbieken megállapított mikroszkopikus változásoknak szükségszerűen nem csak a bükk, hanem az összes rostirányban egyenletesen tömöríthető fafaj esetében végbe kell menniük. A szilárdságot biztosító farostok elcsúsznak egymáshoz képest, meggyűrődve roncsolódnak és ennek köszönhetően válik plasztikusabbá, nagyobb mértékben hajlíthatóvá a végtermék.

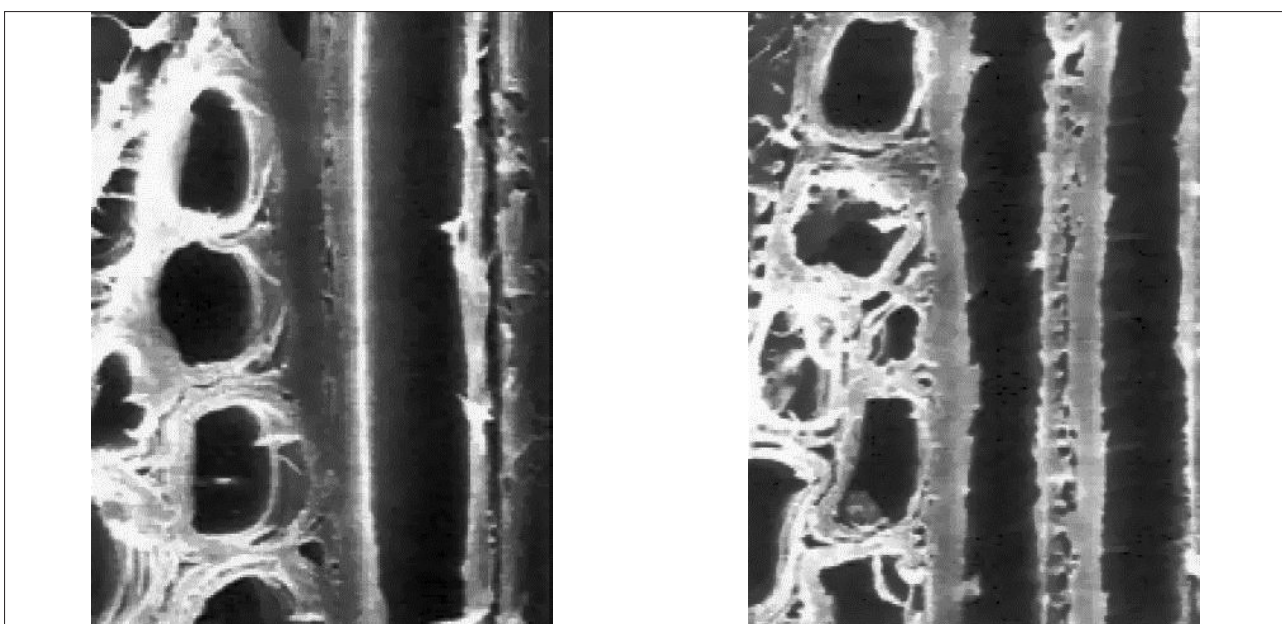
A tömörítés miatt a bélsugáron és a farostokon bekövetkező változásokat szemléltetik Buchter és tsai. (1993) által bemutatott felvételek. A 3.a ábrán egy normál bükkfa, a 3.b ábrán a rostirányú tömörítés során mechanikai változásokat szenvedett bükkfa metszete látható.

A nagymértékű tömörítés hatására végbemenő változások, a sejtszintű, és utána szabad szemmel is láthatóvá váló tönkremenetel Ivánovics (2012) szerint a következő módon történik: a hosszanti sejtek igen rövid szak-



2. ábra Bükkfa vízszállító edényéről készített SEM felvételek normál fa (a) és tömörített fa (b) esetében (forrás: Kuzsella 2011)

Figure 2 SEM photographs of the beech wood's trachea in case of a normal wood (a), and a longitudinally compressed wood (b) (source: Kuzsella 2011)



3. ábra Bükkfa mikroszkopikus fényképe tömörítés előtt (a) és tömörítés után (b) (forrás: Buchter és tsai. 1993)

Figure 3 Microscopic photographs of beech wood before compression (a) and after compression (b) (source: Buchter és tsai. 1993)

szon kihajlanak, esetleg jelentős nyírási alakváltozást szenvednek. A terhelés növekedésével a mikro-kihajlások vagy az elnyíródások kiterjednek az egész keresztmetszetre, melyeket a sejtfalak tönkremenetele (szakadása, felrepedése, réteg-elválása) kíséri. A terhelést tovább növelve egyre több keresztmetszet megy tönkre állandó rostirányú feszültségérték mellett. Sejtek közötti törések jönnek létre a bélsugarak alatt és felett, majd makroszkopikusan is láthatóvá válik, ahogy a rost és bélsugár határfelületeken is megkezdődik az elválás a legtöbb esetben. A tömörítés, és az azt követő hajlítás során bekövetkező veszteségek minimalizálása érdekében célszerű próbatömörítéseket végezni nagyobb mennyiségű termék előállítására, esetleg sorozatgyártás megkezdése előtt, hogy szükség esetén az adott alapanyag legnagyobb hajlékonyságát lehessen elérni minél jobb kihozatal mellett.

Összefoglalás

Jelen cikk áttekintést ad a fa rostirányú tömörítéséhez megfelelő alapanyagokról és ezek előkészítéséről, a fában végbemenő változásokról.

Magas minőségű, egységes felépítésű és egészséges alapanyag szükséges a fa tömörítéséhez és a következő kényes művelethez, a sugárirányban és húr irányban egyaránt elvégezhető hajlításához. A következő fafajok – többnyire keménylombosok – bizonyultak eddig tömörítéssel eljárásal kezelhetőnek: afzélia, akác, bükk, ciprusfa, cseresznye, dió, foltos gumifa, hamis mahagóni, hárs, juhar, kőris, pau marfim, szil, tölgy. A fenyőfélék alkalmatlanok a tömörítéssel hajlításra. A szijács és a geszt aránya a tömörítés minőségét nem befolyásolja, ez az évgyűrűk elhelyezkedésére is vonatkozik, viszont rendkívül lényeges a párhuzamos szálirány és a minimális rostkifutás. A hosszirányú tömörítés akkor valósítható meg, ha a faanyag egyenes állapotban marad a teljes folyamat alatt és nem tud kihajolni.

Minimálisan 20% nedvességtartalmú fa 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 rostlágyítás hatására a cellulóz tulajdonságai annak stabil felépítése és erős kötése miatt nem módosulnak. A fa plasztifikálódását a ligninnek és a hemicellulózoknak – mint a sejtek közti P-M-P kötőszövet fő alkotóinak – a változása okozza, minek következtében a nagyrészt cellulózból felépülő, szilárdságot biztosító farostok elcsúsznak egymáshoz képest, meggyűrődnek, esetleg roncsolódnak és ennek köszönhetően válik plasztikusabbá, nagyobb mértékben hajlíthatóvá a végtermék. 15% tömörítési arány eléréséig már szinte az összes nedvességszállító edény sejtfala meggyűrődik, a tracheák átalakulásával összhangban a farostok is hasonlóan módosulnak. A rövidülés miatt a bemutatott mikroszkopikus változásoknak szükségszerűen az összes, rostirányban egyenletesen tömöríthető fa esetében végre kell menniük. Nem megfelelően kivitelezett vagy túl nagy mértékű préselés esetén apró, sejtszintű kihajlások és elnyíródások következnek be egyre több helyen, ami a faszervezet szabad szemmel is láthatóvá váló tönkremeneteléhez vezet.

A sorozat következő cikke a témával kapcsolatban megjelent szabadalmakkal, a tömörítési folyamat tulajdonságaival, változatos lehetőségeivel és a faanyag tömörítést követő kezelésének ismertetésével foglalkozik, majd a harmadik részben a mechanikai tulajdonságok kerülnek bemutatásra.

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.
- Alpár T. (2011) Faalapú lemezek. Kézirat, NymE Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 118, 259–275. o.
- Bak M. (2012) Növényi olajokban hőkezelt nyár faanyag tulajdonságainak vizsgálata. Doktori értekezés, NymE Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola, Sopron, 247 o.
- Barlai E. (1955) Az akác ipari felhasználhatósága. Erdészeti Lapok, 97(02): 62.
- Buchter J., J. Adelhoej, J. Ljoerring, O. Hansen (1993) Introduction to Compressed Wood. Danish Technological Institute, Department of Wood and Furniture, Taastrup, Dánia, 2–32. o.
- Compwood M. Ltd. (2001) Advanced wood bending technology - Compressed hardwood for easy and cold bending. Compwood Machines, Slagelse, Dánia, 2–3. o.
- Compwood M. Ltd. (2008) English Manual. <<http://www.compwood-eng.dana8.dk/data/images/man%20eng.pdf>> Megtekintve: 2008.09.14.

- 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.
- Hofmann T. (2013) Fakémia – Fakomponensek bomlása hő hatására. Kézirat, NymE Erdőmérnöki Kar, Sopron, 8. o.
- Holzveredelung GmbH. (1926) Verfahren zum Biegsammachen von Holz. Deutsches Reich Reichspatentamt, 488765 sz. szabadalmi leírás, 1–2. o.
- Hyams M. L. (2008) Can design generate information to aid in technological innovation? An investigation using industry based case studies. Diplomamunka, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Ausztrália, 165 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. (2008) Fatömörítő célgép tervezése. Gép, 59(10-11): 56–59.
- Ivánovics G. (2012) Nyomott faanyag alakváltozási folyamata. Kézirat, Kecskeméti Főiskola, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Gépszerkezettani és Terméktervező Tanszék, Kecskemét, 2–6. o.
- Kovács Zs., J. Süveg, T. Papp (2006) Mechanikai megmunkálás II. - A fa hajlítása. Kézirat, NymE Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 57–68. o.
- Kuzsella L., I. Szabó (2006) A fa tömörítésének hatása a mechanikai tulajdonságokra. In: Konferencia kiadvány, Bitay Enikő szerk. XI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2006.03.24–25., 233–236. o.
- Kuzsella L. (2011) 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., P. Bárczy, I. Szabó (2011) Ősi anyag új feldolgozása, avagy tömörített fából energiatároló rugó. Bányászati és Kohászati Lapok, 144(2): 40–41.
- Magyar–Amerikai Faipari Rt. (1927) Eljárás és berendezés hosszabb fahasábok állandó hajlékonytételére. Magyar Királyi Szabadalmi Bíróság, 96736 sz. szabadalmi leírás, 1–2. o.
- Material Archiv (2013) Patent-Biegeholz (MA-1493). <<http://www.materialarchiv.ch/detail/1493/cms/de/cms/de/cms/de/sponsoren.html#/detail/1493/patent-biegeholz>> Megtekintve: 2014.02.02.
- Németh K. (1998) A faanyag degradációja. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 11–29. o.
- Németh R. (2002) A hidrotermikus kezelés hatása az akác faanyagának szorpciós tulajdonságaira. Doktori értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 105 o.
- Peres M. L., D. A. Gatto, R. A. Delucis, R. Beltrame (2013) Vergamento de Madeira Sólida: Quallade de Processo e Matéria-Prima (Tömörfa hajlítása: a folyamat és az alapanyag minősége). Nativa-Agricultural and Environmental Research 01(01): 56–61.
- Rasmussen Engineering Aps. (2014) Bendwood Engineering. <<http://bendwoodengineering.com/>> Megtekintve: 2014.02.13.
- Rowell R. M., R. Pettersen, J. S. Han, J. S. Rowell, M. A. Tschabalala (2005) Cell Wall Chemistry. In: Rowell, R. M. szerk. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, Amerikai Egyesült Államok, 37–45. 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, bútorkatrésznek és ahol igény van a fa hajlíthatóságára). Denmark Patentdirektoratet, 170364 sz. szabadalmi leírás, 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., L. Eckhardt, Gy. Czél (2005) Energiatároló tömörített farugó. Magyar Szabadalmi Hivatal, 226783 sz. szabadalmi leírás, 2–5. o.
- Thomassen T., J. Ljorring, O. Hansen (1990) Method and Apparatus for Compressing a Wood Sample. United States Patent Office, 5190088 sz. szabadalmi leírás, 1–5. o.