

## RÉTEGBEVONATOS FESZÜLTÉGÓPTIKA ALKALMAZÁSA FAANYAGON

HANTOS ZOLTÁN\*

*A rétegbevonatos feszültségvizsgálat egy rendkívül gyors és egyszerű, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer. Az eljárás a fémiparban számos helyen kerül alkalmazásra. Előnyei ellenére faipari alkalmazására jelenleg nincs példa, aminek oka lehet, hogy sem hazai, sem külföldi szakirodalomban nem található használható segítség a szükséges módosítások kivitelezéséhez. Első kutatásaink ezen módosítások kidolgozására irányulnak, kedvező tapasztalataink arra utalnak, hogy a módszer a későbbiekben komolyabb szilárdságtani feladatok megoldására is alkalmas lehet.*

**Kulcsszavak:** Faanyag, Feszültség, Feszültségoptika, Reflexió

## PHOTOELASTIC STRESS METHOD APPLIED ON WOOD

*The method of reflection photoelasticity is a simple and quick measurement procedure. It is practical and widely applied by the metal industry. In spite of the fact that it has a lot of advantages, it is not in use by the wood industry neither in Hungary, nor abroad. The reason could be that relevant literature is scarce and there exist no publications reflecting practical experience. Our measurements were just initial trials, but we have got favourable experience, and we think, it is worth using it for solving more complicated problems.*

**Keywords:** Wood, Stress, Photoelasticity, Reflection

## Bevezetés

A legtöbb széles körben felhasznált anyag (fémek, fa, műanyagok, stb.) összetett anyagtulajdonságokkal rendelkezik, deszilárdságuktörtresztjelentő terhelések, és alakváltozások esetén a viselkedésük jól modellezhető a lineárisan rugalmas anyagként, azaz a terhelések és az alakváltozások között egyenes arányosságot feltételezünk. Vannak azonban különbségek az acél és a fa között. Az acél közel homogénnek és izotrópnak tekinthető, azaz mechanikai tulajdonságai az egyes pontokban azonosak és irányfüggetlenek. A fa sejt-szerkezete, évgyűrűs felépítése miatt inhomogén és anizotróp, azaz az egyes pontokban és irányokban eltérő tulajdonságokkal rendelkezik. Ez a különbség okozza, hogy fa esetében a legegyszerűbb szilárdságtani problémák is hosszadalmas, gyakran megoldhatatlan feladatokká válnak.

## Elméleti háttér

A rugalmasságtan feladata, hogy a külső erők hatására a testben ébredő feszültségeket, alakváltozásokat és elmozdulásokat meghatározza. A rugalmasságtan alapegyenletei, mint elemi módszer alatt olyan parciális differenciálegyenlet-rendszert értünk, melyek megoldásával ezek a mennyiségek meghatározhatóak. Keressük a feszültségi és az alakváltozási tenzor 6-6 elemét és az elmozdulásvektor 3 elemét (együttesen 15 ismeretlen). Ehhez felírhatjuk a rugalmasságtan statikai egyensúlyi egyenletrendszerét (3), a rugalmasságtan geometriai egyenleteit (3), és az anyagegyenleteket (9).

Amint láthatjuk, a 15 ismeretlenre 15 egyenlet írható fel, tehát a megoldás matematikai szempontból elvileg nem ütközik akadályokba, de összetettebb feladatok esetén a számítási módszer rendkívül bonyolulttá válik, alkalmazása nem célszerű. (Szalai 1993)

Az informatikai fejlődéssel párhuzamosan forrott ki a végeelem-módszer, mint közelítő eljárás, ami mára a műszaki életben legerjedtebb szilárdsági méretező rendszerré nőtte ki magát. A módszer hátránya a jelenleg tárgyalt eset szempontjából, hogy a felosztandó modellt a program felhasználójának kell megalkotnia. A fa különleges tulajdonságait azonban nehéz egyszerű modellekkel leírni, illetve nagymértékű egyszerűsítésekkel készült modell nem fogja a valóságot tükrözni. Amennyiben sikerül is áthidalni a modellalkotás problémáját, és megoldásra vezet a számolás, a végeredmény kísérleti visszaigazolása ezen esetben sem kerülhető el.

Egy terhelt test, vagy szerkezet viselkedésének megállapítása a különböző módszerekkel problémák elé állítja a szakembereket. A számítási eljárások energiaigényesek, rengeteg hibalehetőséget tartalmaznak, gyakorlati alkalmazásuk nehézkes. A közelítő eljárások hátránya, hogy a modell megalkotásakor ejtett (szándékos egyszerűsítésből, vagy figyelmetlenségből eredő) hibák a valóságtól teljesen eltérő eredményeket adhatnak. Mindezeket túl a termék elkészítésekor, gyártásakor is történhetnek módosítások, és módosulások, ezért is szükséges a kísérleti ellenőrzés.

\* Hantos Zoltán doktorandusz hallgató NyME FMK Építészeti Tanszék

**Alkalmazott módszer**

- *Az optikai feszültségvizsgálat, mint gyakorlati alternatíva*

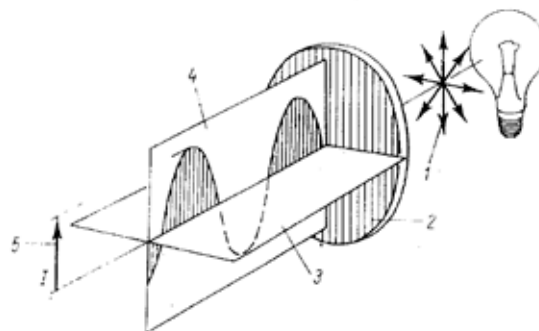
Az eljárás azon alapszik, hogy a legtöbb nem-kristályos szerkezetű átlátszó anyag (üveg, műanyagok, stb.) külső erők által létrehozott feszültség hatására optikailag kettőtörésűvé válik, és a kettőtörés mértéke arányos a feszültséggel. A terhelt kettőtörésű testet polarizációs szűrők közé helyezve és átvilágítva, azon színes és sötét sávok jelennek meg. Ez a sávrendszer utal a modellben uralkodó feszültségoszlásra, erőjátékra. A kialakult kép szűrőlemezen keresztül megfigyelhető, fényképezhető.

A feszültségoptikának két ága alakult ki. A transzmissziós feszültségoptikában az alkatrésznek kettőtörésű műgyantából készített modelljét világítják át a polarizált fényvel. A módszer csak homogén, izotróp anyagokra (pl. fémekre) ad elfogadható eredményeket, mert az alkalmazott műgyantával bonyolultabb anyagtulajdonságokat nem lehet modellezni. A reflexiós feszültségoptika abban különbözik az előző módszertől, hogy a kész, legyártott mintadarab felületére tükröződő ragasztóval rögzítik a műgyantát. A ragasztó átviszi a műgyantára a mintadarab felszínén ébredő feszültségeket és alakváltozásokat, a bevonat pedig „megjeleníti” azokat a berendezés számára. Ez a módszer inhomogén és anizotróp (pl. fa) anyagokra is alkalmazható, csupán a műgyanta helyes megválasztására kell figyelni. A célra alkalmas műgyanta nem befolyásolhatja a vizsgált szerkezet, illetve alkatrész erőjátékát. Ezt úgy érhetjük el, hogy kis merevségű, vékony réteget alkalmazunk. (Tham 1968)

- *Az optikai feszültségvizsgálat alapjai*

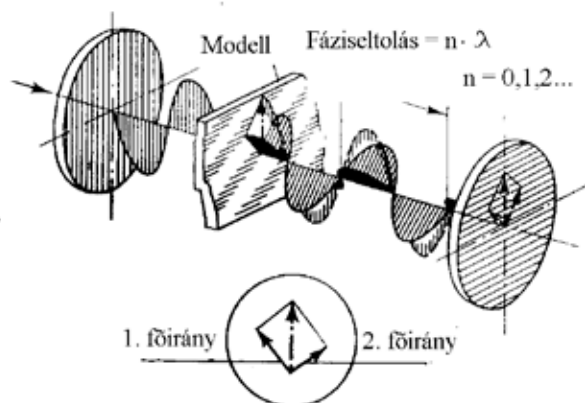
A feszültségoptikában ún. síkban polarizált fény használatos. Ilyen tulajdonságú fénysugár bármilyen fényből előállítható polarizátorszűrő segítségével. A polarizátorszűrő a térbeli transzverzális rezgésekből csak egyetlen síkban engedi át a hullámokat. Ezen rezgés síkjára merőleges síkot nevezünk a polarizáció síkjának. (1. ábra) Ha két ilyen szűrőt helyezünk egymás mögé, akkor a második szűrővel már a fény intenzitása is szabályozható, hiszen párhuzamos állás esetén a teljes fénymennyiség továbbhaladhat, míg keresztzetett állás esetén (tökéletes szűrőket használva) a szűrőpáron nem lehet keresztülmenni. Az ilyen szűrőpárban az első szűrőt polarizátornak, míg a másodikat analizátornak, a két szűrő síkjának szögét pedig polarizátorállásnak nevezzük. A síkban polarizált fényt síkbéli transzverzális szinuszhullámként értelmezzük,  $\lambda$  hullámhosszal, és  $c$  terjedési sebességgel. A szűrőn átbocsátandó fénysugár

hullámhosszát a fény színe határozza meg. A méréshez használatos berendezés több színt, illetve fehér fényt is elő tud állítani. Ezek alkalmazását mindig az adott feladat szabja meg. (Tham 1968)



1. ábra Síkban polarizált fény ( 1: polarizálatlan fény, 2: polarizátor, 3: polarizációs sík, 4: rezgés síkj, 5: polarizált fény vektora )

A fény terjedési sebessége az adott közegtől függ. A közeg törésmutatója megmutatja, hogy benne a fény hányszoros sebességgel halad a vákuumhoz viszonyítva. Az ún. kettőtörésű anyagok jellegzetessége, hogy törésmutatójuk két, egymásra merőleges (fő)irányban eltérő. Ilyen anyagokon síkban polarizált fényt átbocsátva a fény két, a főirányokban rezgő összetevőre bomlik. A két összetevő az eltérő terjedési sebességek miatt fáziseltolódással lép ki a kettőtörésű közegből, és nem tevődik össze az eredeti rezgéssé. Ha adott pillanatban a két összetevőt vektoriálisan összegezzük, egy torzult csavarvonalat kapunk, amit elliptikusan polarizált fénynek nevezünk. Ez a csavarvonal térbeli alakzat, így vannak olyan komponensei is, melyek átjuthatnak a polarizátorral 90°-ot bezáró (azaz teljesen sötét) analizátoron, és a kettőtörésű test a sötét környezetben többé-kevésbé világosnak fog látszani. (2. ábra)



2. ábra A kettőtörés jelensége

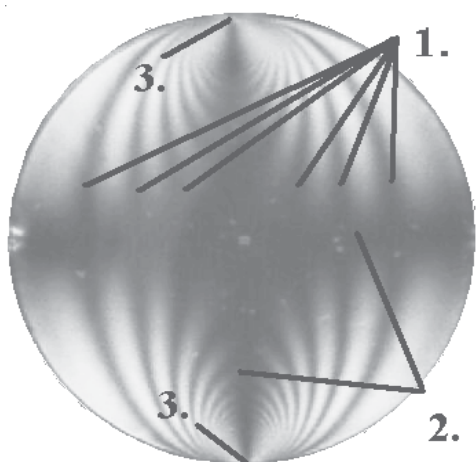
Kettőtörésű anyagok előfordulnak a természetben is (pl.: csillám), ezek kettőtörésének oka az anyagi szerkezetben (általában kristályszerkezet) keresendő. A feszültségoptika szempontjából fontosabbak azok az anyagok (pl.: egyes műgyanták), amik mechanikai igénybevétel hatására válnak kettőtörésűvé, mégpedig úgy, hogy a kettőtörés főirányai megegyeznek a feszültségi állapot főirányaival. A kettőtörés mértékéről elmondható, hogy a kilépő fény két összetevőjének fáziseltérése arányos a síkbeli feszültségi állapot két főfeszültségének különbségével. (Tham 1968)

Egyszínű átvilágítás esetén a feszültségoptikai kép sötét és világos sávokból áll, míg fehér fény alkalmazásával színes sávok is láthatók. A feszültségoptikai kép sávrendszerében az alábbi sávtypusokat találjuk (3. ábra):

1. *Iránysávok (izoklinák)*: Azokat a helyeket jelölik, ahol feszültségi állapot főirányai egybeesnek a keresztezett polarizátorállás síkjaival.

2. *Színsávok (izokromáták)*: Azokat a helyeket mutatják meg, ahol a fáziseltolódás a hullámhossz többszöröse.

3. *Szinguláris helyek (0-rendű színsáv)*: Olyan helyeken alakul ki, ahol a főfeszültségek különbsége zérus (A főfeszültségek Mohr-köre egy pontba zsugorodik össze, pl.: a teherátadás helyén)



3. ábra A feszültségoptikai kép értelmezése egy diagonálisan terhelt korong esetén

#### - A reflexiós optikai feszültségvizsgálat specialitásai faszerkezeti alkalmazás esetén

Mint minden más anyagon, a faanyagon alkalmazva a mérési módszert, a kettőtörésű bevonat tulajdonságai nagymértékben befolyásolják a szerkezetben ébredő feszültségek hiteles megismerését. A felragasztandó, kettőtörésű műgyanta rétegnek ezért a következő szempontoknak, ill. tulajdonságoknak kell megfelelnie:

1. Legyen magas a nyúlásoptikai érzékenysége, azaz már kis terhelések hatására is sok sáv jelenjen meg. Így a kiértékelés pontosabbá válhat.

2. Legyen lágú, hogy semmiképp ne befolyásolja a vizsgált fa-próbatest szabad erőjátékát.

3. Jól tapadjon a fára, hogy minden pontban kövesse annak alakváltozásait.

4. Terheletlen állapotban legyen feszültségmentes.

5. Legyen homogén, izotróp, kikeményedése során ne keletkezzenek maradó feszültségek, buborékok, melyek zavarhatnák a pontos vizsgálatot.

6. Legyen könnyen kezelhető, és lehetőleg olcsó.

Ezen tulajdonságok közül néhányról mindig le kell mondanunk, de a beszerezhető epoxigyanták közül a legtöbb alkalmas a mérések kivitelezésére.

#### - A módszer „első” alkalmazása

Horváth Balázs és Miklai Gábor okleveles faipari mérnök-hallgatók 2002-ben készültek el „A faanyag feszültségi és alakváltozási főirányainak kapcsolata a terhelés orientációja és az anyagtulajdonságok függvényében” című TDK kutatásukkal. Kutatásuk témája arra irányult, hogy a faanyagok rostlefutási szöge miként befolyásolja a terhelés hatására kialakult feszültségi- és alakváltozási állapotokat. Munkájukban kidolgoztak egy – igaz, csak speciális esetekre érvényes – összefüggést, melynek segítségével egytengelyű terhelés során adódó feszültségi ellipszoid, és az alakváltozási ellipszoid főtengelyeinek szögét lehet meghatározni a rostlefutás szögének függvényében. (4. ábra) (Horváth és Miklai 2002)

Az általuk felírt összefüggés:

$$\varphi_1 = \arcsin \left( \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3} \right) \text{ (húzásra)} \quad [1]$$

$$\varphi_3 = \arcsin \left( \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) \text{ (nyomásra)} \quad [2]$$

Ahol:

$\varphi_{11}$  és  $\varphi_{31}$  az 1-es illetve a 3-as alakváltozási főirány és az x1 koordinátairány szöge

$\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_3$  az egyes főalakváltozások értékei

$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}$  az alakváltozási tenzornak a próbatest éleihez illesztett koordinátarendszerben felírt mátrixának elemei (értelemszerűen)

Számításait kísérleti úton is ellenőrizték, de az általuk alkalmazott módszer eredményeit (a teherátadáskor jelentkező hibák miatt) maguk sem tartották tökéletesen megbízhatónak. Közös konzulensünk, Szalai József professzor úr vetette fel az ötletet, hogy találó

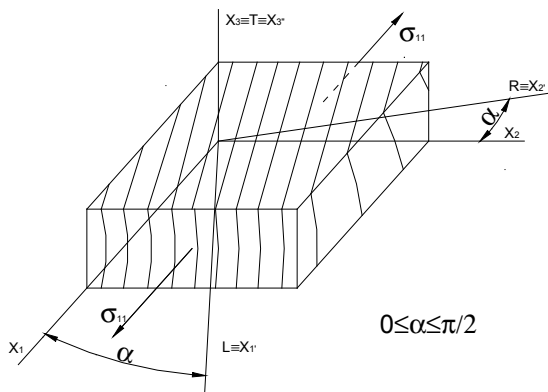
lenne a rétegbevonatos feszültségoptika segítségével is ellenőriznem számításait.

**A mérések leírása**

A mérések előtt fel kell ragasztani a próbatestekre az optikailag alkalmas tulajdonságokkal rendelkező műgyanta réteget. Az itt bemutatott mérésekhez az alábbi műgyanta-összetételt dolgoztuk ki:

- 'A' komponensként Tipox 400 E 10 tömegegység
- 'B' komponensként Epoflex B001 6 tömegegység
- 40 °C-ra felmelegítve a két komponens összekeverhető
- teflonozott fémtálcában kiöntve kb. 2-3 mm vastag rétegben

Térhálósodás után a műanyaglemez vágható, fűrészelhető, csupán arra kell figyelni, hogy túlságosan fel ne melegedjék, mert az belső feszültségeket alakíthat ki az anyagában. A felragasztáshoz készített gyanta 'A' komponensébe még az összekeverés előtt AluKon pasztát (alumíniumpor) kevertem, hogy a vizsgáló fénysugár visszatükröződjön a faanyag felületén. A ragasztóréteget a lehető legvékonyabbra választottam (kb. 0,1 mm). A ragasztó kikeményedése után a mérés elvégezhető.



4. ábra A próbatest geometriai és anatómiai koordinátarendszerei

A mérésekhez egy Tiedemann Reflecta AF 1800 típusú reflexiós polarizskópot használtuk. A próbatesteket a NYME FMK Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézet anyagvizsgáló laborjának szakítógépjével terheltük meg. A mérésekről egy digitális fényképezőgéppel készítettünk felvételeket. Mivel az adott feladat csupán, Horváth és Miklai összefüggésének ellenőrzése volt, ezért csak a főalakváltozási állapot ellipszoidjának a helyzetét kerestük. Ehhez a polarizátor- és analizátorszűrőt keresztezett állásban olyan helyzetbe kellett forgatni, ahol a feszültségoptikai kép a legsötétebb homogén képet mutatta. Ilyenkor a szűrők párhuzamosak a főfeszültségi irányokkal, a berendezés által mutatott szögérték az ellipszoid állását jelző  $\varphi_{31}$  szöggel egyenlő. (1. táblázat)

1. táblázat A számított és a mért szögértékek összevetése

Sorszám	a	$f_{31}$ (elméleti)	$f_{31}$ (mért érték)	eltérés (%)
1	24°	21°	20°	4,76
2	26°	20,5°	22°	-7,32
3	30°	26°	26°	0,00
4	29°	26°	28°	-7,69

**A mérések értékelése**

A mért értékek csak kis mértékben térnek el a számított értéktől, ami a Horváth-Miklai összefüggés helyességét igazolja. Az eltérés okai között szerepelhet, hogy a számításhoz választott irodalmi adatok (a közismert nagy szórások miatt) eltérnek a próbatest jellemzőitől. Egy másik, feltételezhetően jelentősebb ok a teherátadás során fellépő súrlódás. Megfigyelhető ugyanis, hogy kis terhelés (legfeljebb 1 kN) esetén kialakuló, egytengelyűnek tekinthető feszültségállapotban érvényesek a Horváth-Miklai összefüggés eredményei, míg nagyobb terhelés esetén a fellépő súrlódás összetetté torzítja a feszültségállapotot, az eredmények alkalmazhatatlanná válnak.

**Összefoglalás**

A rétegbevonatos feszültségoptikának a fejlődő műszaki életben és az anyagkutatásokban egyaránt van létjogosultsága. A fémiparban kiforrott eljárás a felhasznált segédanyagok módosításával a faiparban is alkalmazható. A módszer tökéletesítése még várat magára, de egyszerűbb anyagvizsgálati feladatokban már nagy segítséget nyújt. Idővel alkalmas lehet komplex problémák megoldására, illetve szerkezetek vizsgálatára is.

**Felhasznált irodalom**

Thamm 1968: *A szilárdságtan kísérleti módszerei* Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1968. 340. o.  
 Horváth – Miklai 2002: *A faanyag feszültségi és alakváltozási főirányainak kapcsolata a terhelés orientációja és az anyagtulajdonságok függvényében.* TDK dolgozat NYME Sopron  
 Szalai 1998: *Műszaki Mechanika II. Szilárd Testek Sztatikája (Rugalmas- és szilárdságtan)* Egyetemi Jegyzet, Soproni Egyetem