

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Doktori téziszfüzetei

Közlekedésmérnöki Kar Doktori Tanácsa

Írta:

Borbás Lajos

okleveles közlekedésmérnök

Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat fejlesztése

száloptika alkalmazásával

című témakörből,

amellyel a Ph.D. fokozat elnyerésére pályázik

Budapest, 2001

1. Bevezetés

A feszültségmérő eljárások között az egyik legszemléletesebb az optikai feszültségvizsgálat. A polarizált fényben vizsgált, megfelelő optikai aktivitású átlátszó modell (vagy a tényleges alkatrészre felragasztott, hasonló méréstechnikai tulajdonságokkal rendelkező vizsgálóréteg) terhelés hatására láthatóvá teszi a nyúlás (feszültség) állapotot [1].

A vizsgált szerkezet feszültségmezejét megjelenítő eljárás révén annak szilárdsági viselkedése – kellő biztonsággal – megítélhető. Feltárhatók a kritikus igénybevételi helyek, behatárolhatók azok a területi zónák, amelyek a szerkezet teherviselésében nem, vagy csak kis mértékben vesznek részt. Elemezhetők az erő-bevezetési környezetek, az egyes feszültség koncentrációs zónák kiterjedése, a feszültségcsúcsok gradiensei. A mérési eljárás által szolgáltatott feszültségképek a számítási eredményekkel könnyen összevethetők. A szerkezeten végrehajtott módosítások feszültségeloszlásra gyakorolt hatásai nyomon követhetők. A feszültségoptikai felvételek elemzése hozzásegít olyan szemlélet kialakulásához, amelynek az alakadás fázisában történő tudatos alkalmazása eredményeként megbízható, súlytakarékos szerkezetek hozhatók létre. Az optikai

feszültségvizsgálat mérési eljárása hasznos kiegészítő eszköze a számító módszereknek, lehetőséget biztosít azok eredményeinek kontrolálására, szükség esetén biztosítja a számításokhoz nélkülözhetetlen bemenő adatokat.

A szilárdsági számítási eljárások a számítástechnika rohamos fejlődésével az 1980-as évektől forradalmi változáson mentek át. A kísérleti szilárdságtan, különösen annak sík-feszültségi problémákat vizsgáló eljárásai, mindezek miatt az 1980-as évek közepétől fokozatosan háttérbe szorultak. A különböző számítási módszerek egyre szélesebb alkalmazása következtében azok lehetőségei és határai mind finomabban kirajzolódtak. A számítástechnika ezen fejlődése ugyanakkor felhívta a figyelmet – *a számítási munka jellegéből adódóan felszínre hozott* – problémakörök kezelésének szükségességére (szerkezetekre ható külső terhek kérdései, számítások peremfeltételeinek meghatározása, éles bemetszések, keresztmetszet átmenetek, kis lekerekítési rádiuszok környezetei, bonyolult, alakos felszínű alkatrészek nyúlás- és feszültségviszonyainak elemzése), így a felhasználók részéről a számítási és mérési eljárások helyének újrafogalmazására jelentkezik igény.

A számítási eljárások 80-as évek közepétől számítható töretlen fejlődése mellett a gépek és berendezések megbízhatóságának növelésére, (meghibásodási valószínűségük csökkentésére) súlycsökkentésükre, meghibásodások okainak mind biztosabb feltárására irányuló egyre markánsabb igény *a mérési eljárások fejlesztésének szükségességét is előtérbe helyezte.*

A gazdaságos előállítás (és üzemeltetés) iránti mind fokozottabb igény természetesen követeli az ipari körülmények között is gyorsan kiértékelhető, nem túlságosan drága mérőberendezések és vizsgálati eljárások (technikák) használatát. Ezen eljárások közé sorolható a **rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat** (felszíni nyúlás – és feszültségmérés) is, mivel:

- ◆ *a tényleges alkatrészen valóságos igénybevételek hatását* méri,
- ◆ elméletileg *tetszőleges alakú alkatrész* vizsgálatára alkalmazható,
- ◆ *nem teszi szükségessé* a szerkezet *megbontását*,
- ◆ a mérési *eredmények* már első látásra is *átfogó képet adnak a vizsgált szerkezetről*. Érzékeltetik a *felszíni alakváltozási állapotot*, kimutatva a vizsgált szerkezet veszélyes, adott esetben változtatásra szoruló helyeit, így a vizsgált szerkezet adott terhelési körülmények közötti nyúlásállapotának meghatározására szolgáló *állapotfelmérő* (diagnosztikai) *eszközként alkalmazható*.

2. A kutatás célkitűzése

Jelen dolgozat célja bemutatni a rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálati (nyúlás- és feszültségmérő) eljárás módszerének, mérőrendszerének és vizsgálati anyagának (mérőrétegének) olyan kutatását és továbbfejlesztését, mely kiterjed:

- ◆ *belső üregek és sarkok környezeteiben, erősen görbült, tagolt felszíneken (is), különösen pl. járműváz szerkezeteknél alkalmazott különböző típusú hegesztés-környezeteken alkalmazható, a rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat mérőrendszere számára alkalmas mérőeszköz kidolgozására, annak mérési- és hibahatárainak meghatározására,*

- ◆ a mérőrendszerben alkalmazott száloptikás képtovábbítás alkalmazási (mérési) tartományainak kijelölésére, a mérőrendszer technikai lehetőségei és geometriai adottságai által meghatározott vizsgálati korlátok (kiértékelési szöghibák) bemutatására és értékelésére,
- ◆ a vizsgálat eredményeinek rögzítésére, (statikus, kvázi-staticus feltételek között) valamint a kapott feszültségoptikai képek utólagos elemzésére és további feldolgozására,
- ◆ a feszültségoptikai méréseknél használt vizsgáló réteg anyagának tudományos alapon nyugvó továbbfejlesztésére, amely kiterjeszti az alkalmazási területet a nem fémes anyagok (gumi, *nagy-rugalmasságú műanyagok*), valamint szálerősítésű műanyag, fa, ragasztott rétegelt fa szerkezeti anyagok, valamint *biomechanikai* anyagok vizsgálatára.

3. Létező polarizációs optikai berendezésekkel kapcsolatos egyes kérdések áttekintése

A tényleges szerkezetek nyúlás- és feszültségviszonyainak meghatározására használt eljárás során *optikailag átlátszó és aktív, homogén, izotróp* rétegbevonati anyagot ragasztunk a vizsgálni kívánt alkatrész felszínére [2]. A felragasztott vizsgálóréteg a terhelt alkatrész felszíni nyúlásait átveszi, amely jelenség polarizált fényben megvilágítva láthatóvá teszi a vizsgált alkatrész felszíni nyúlásait. A megvilágító fényforrás általában valamilyen fehér fény, azonban monokromatikus (vagy egyszínű) fényforrások is használatosak. Két polarizációs szűrő (polarizátor a megvilágító fényforrás és a tárgy, valamint analizátor a tárgy és a megfigyelő között) alkalmazásával a színsáv rendszámok (m) meghatározhatók. Amennyiben a vizsgáló berendezés negyed hullámlemezeket is tartalmaz, használatukkal mód nyílik az irányávok felvételére is.

A szokásosan alkalmazott vizsgáló berendezések alap kivitelben (a reflexiós *polariszkópok*) 2 db egymás mellett elhelyezett polarizációs szűrőből (szűrő-párból) állnak. A szokásosan alkalmazott, *körülbelül 100 mm-es szűrőátmérők* következtében a mérőberendezéssel nem közelíthetjük meg tetszőlegesen a vizsgált szerkezetünket, részben a mérőlegestől erősen eltérő sugármenet, részben a polarizált fényvel lefedett terület analizátor oldali vizsgálhatóságához minimálisan szükséges mérőleges tárgytávolság biztosítása miatt. Ezek a vizsgálóeszközök a sarkok, lekerekítések, bordák és erő bevezetések környezetének korrekt vizsgálatára (pl. mérőleges, vagy ahhoz közeli sugármenet) csak korlátozott mértékben alkalmasak.

A rétegbevonatos optikai feszültségmérés eljárásának alkalmazására tett első kísérletek az 1900-as évek elejére tehetőek. A teljesség igénye nélkül a kezdeti kísérletek közül a legjelentősebbeket [3], [4], [5] kiemelve megállapítható, a készülékek a hagyományos polarizációs optikai berendezések elvi felépítését követve épültek, azzal a különbséggel, hogy – tekintettel a vizsgált tárgy felszínéről visszavert fénymenet útjára – a vizsgálatra használt szűrő-párt egymás mellé helyezték el a készülékekben. Itt érdemes megemlíteni, hogy a mérési eljárás nemzetközi megjelenésével egyidőben hazai téren is megindult az eljárással kapcsolatos elméleti és gyakorlati kutatás [6], [7]. Napjainkban létező készülékek [8], [9], [10] általában szórt fényvel dolgozó hagyományos szerkezetű eszközök. Az irodalomban mindössze egy található, amely fény és kép továbbítása vonatkozásában hasonló elveket követ (száloptikás fénymenet), azonban csak az egész rendszámok megfigyelésére alkalmas [11].

4. Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat mérőkészülékének fejlesztése, a vizsgálati technika alkalmazási körének pontosítása és szélesítése

4.1. Mini polariszkóp koncepciójának kidolgozása

Tekintettel arra a tényre, miszerint a célkitűzésben megfogalmazottak alapján, irányított fény és képtovábbítás megvalósítása látszott indokoltnak, a fénymenetek megvalósítását száloptikák alkalmazásával oldottam meg [12] [13]. A kiindulásnál adott száloptikák geometria adottságaihoz igazítottam a célkitűzés szerinti teljes feszültségállapot megvalósítását biztosító polarizációs szűrőket befoglaló (polarizációs és negyedhullám lemez párok) és azokat távműködtetett módon mozgató szerkezeteket. Az így kialakított mérőfej (mini polariszkóp) külső átmérője 50 mm, hosszmérete is 50 mm. A készülék szűrőtartó egységében elhelyezett részegységek az 1. ábrán láthatók. A mini polariszkóp mérőfejét szétszerelt állapotban a 2. ábra mutatja. A mérőfej összeszerelve a 3. ábrán látható.



1. ábra

Mini polariszkóp mérőfejének szűrőrendszere a szűrőket forgató fogaskerék hajtással



2. ábra

Mini polariszkóp szerelt részegységei



3. ábra

Összeszerelt mini polariszkóp mérőfeje

A képtovábbító száloptika köteg megfigyelő felőli oldalához videó felvevő csatlakoztatható a képek rögzíthetősége érdekében. A szűrőegységek távszabályzóval forgathatók, a szűrőhelyzetek pozíciójának kijelzése a távszabályzón történik.

4.2. Mérőrendszer alkotó elemeinek (mérőeszköz, rétegbevonat) hibaanalízise

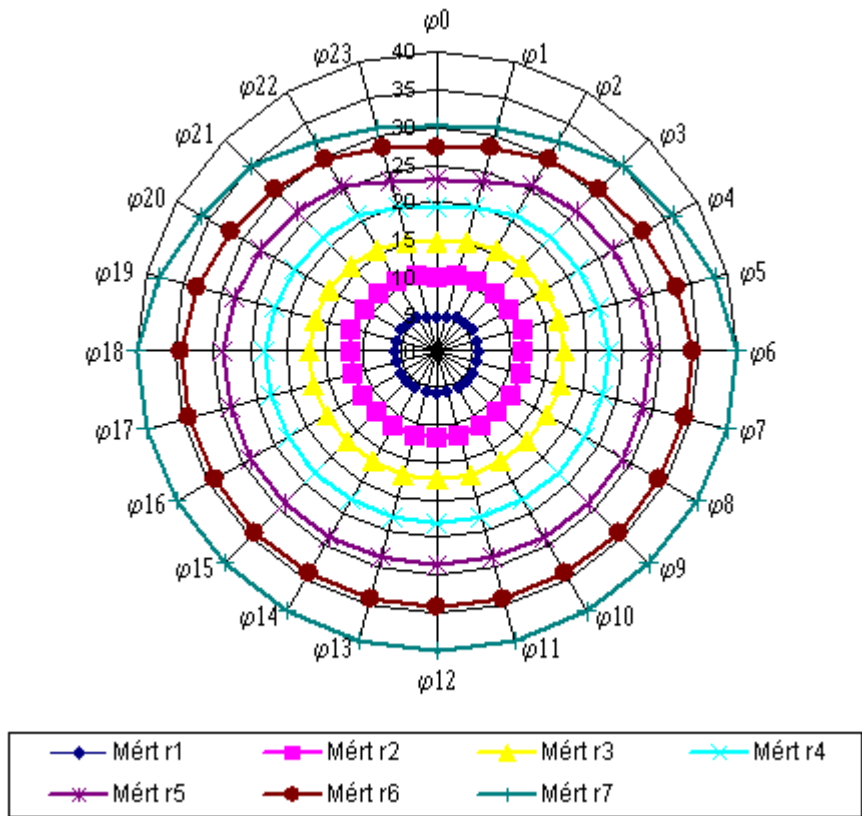
4.2.1. A mini polariszkóp lencserendszerek torzító hatásainak vizsgálata

A lencsék által leggyakrabban megvalósított leképezési hibákat röviden úgy jellemezhetjük, hogy amíg a lencse által leképezett felület közepén a kép torzításmentes, addig a kép szélei felé kifelé haladva különböző jellegű eltérések (torzulások) mutatkoznak a leképezett képpont geometriájában.

A torzulások az alábbi csoportokba oszthatók [14], [15] alapján:

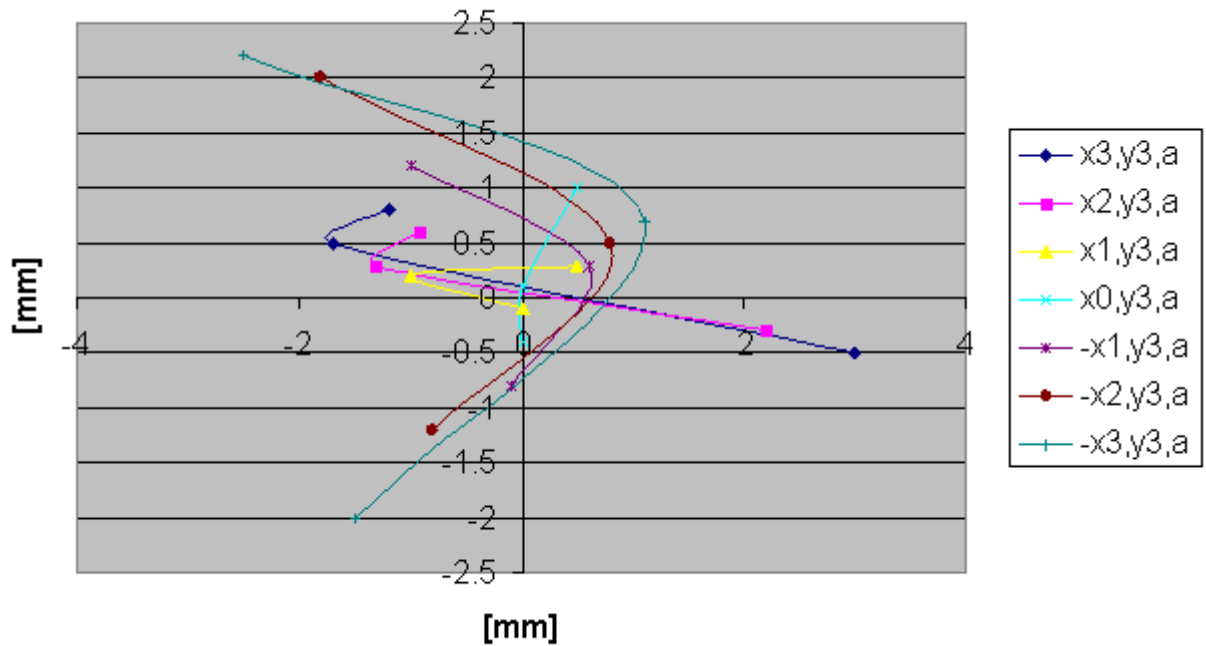
- koma (csóva képződés)
- párnatorzítás és hordósodás
- asztigmatizmus (élek elmosódása)
- (a videórendszer leképezési hibája, melyek nem képezik jelen dolgozat tárgyát)

A vizsgálatokhoz alapvetően kétféle rácsrendszert alkalmaztam, [14] szerint, az alábbi elnevezésekkel: *céltábla (minta) rács*, valamint *sakktábla (minta) rács*. A mintarácsok torzulásait sík, valamint görbült vizsgálófelületeken, merőleges sugármenetnél, valamint a mérőfej optikai tengelyéhez mérten $\pm 25^\circ$ szöghelyzetben vizsgáltam. A vizsgálatokra egy – egy példát a céltábla mintarács (4. ábra) valamint a sakktábla mintarács (5. ábra) esetére mutatok be.



4. ábra

A radiális torzítás alakulása a céltábla mintarács rádiuszai által definiált kerületek mentén, görbült felszínen végrehajtott vizsgálat, "ag" elforgatás



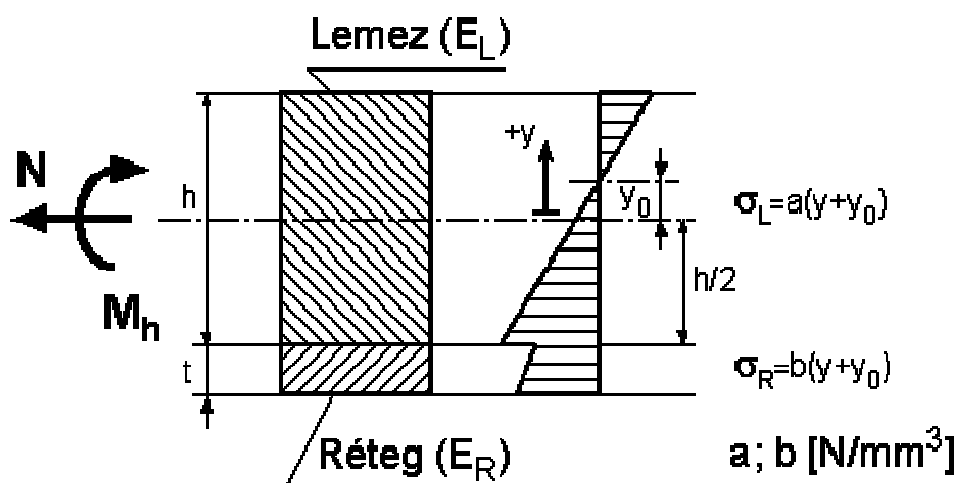
5. ábra

Sakktábla mintarács vizsgálata sík mérőfelszín esetén. Az $y = 3$ (elméleti) magassági szinthez

tartozó rácspontok vándorlása három különböző megvilágítási (torzítási) szöghelyzet esetén (“a”,
 ”m”, ”b”)

4.2.2. Vizsgálóréteg merevítő hatásának elemzése

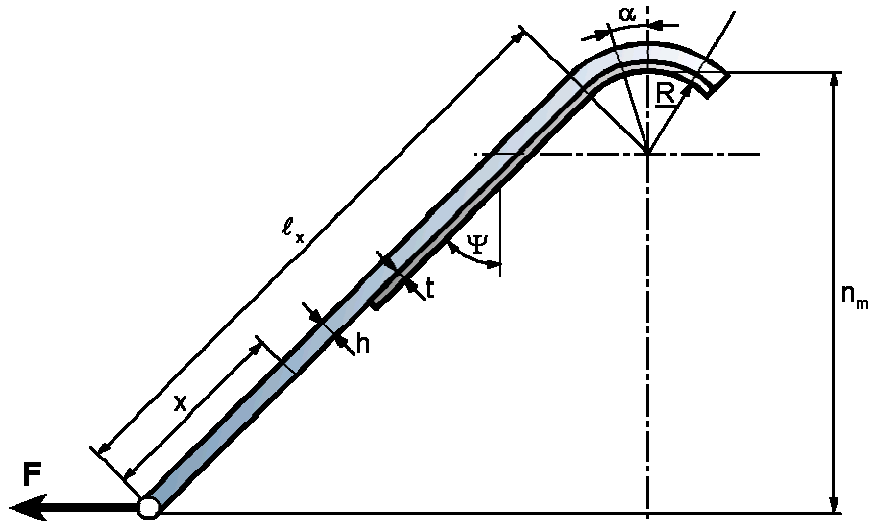
Az optikai feszültségvizsgálat mérési hibáját számos cikk, elemzés vizsgálta részletesen, elemezve a mérőrendszer egyes elemei által okozott hibák rendszerét, azok mértékét. [2], [16]. Vizsgálataim alkalmából az egyik oldalon (külső vagy belső) vizsgáló bevonattal ellátott, nyomatékka és a vizsgált keresztmetszetre ható normál erővel terhelt lemez-réteg együttes mért és elméletileg számított nyúlás- és feszültségviszonyainak elemzésén keresztül kívántam az egyes szóba jöhető hatásokat számba venni. A 6. ábra a vizsgált felszín belső oldalára felragasztott lemez-réteg együttes mechanikai modelljét mutatja



6. ábra

Vizsgált felszín (lemez) mechanikai modellje, a lemez belső felszínére ragasztott vizsgálóréteg esetén

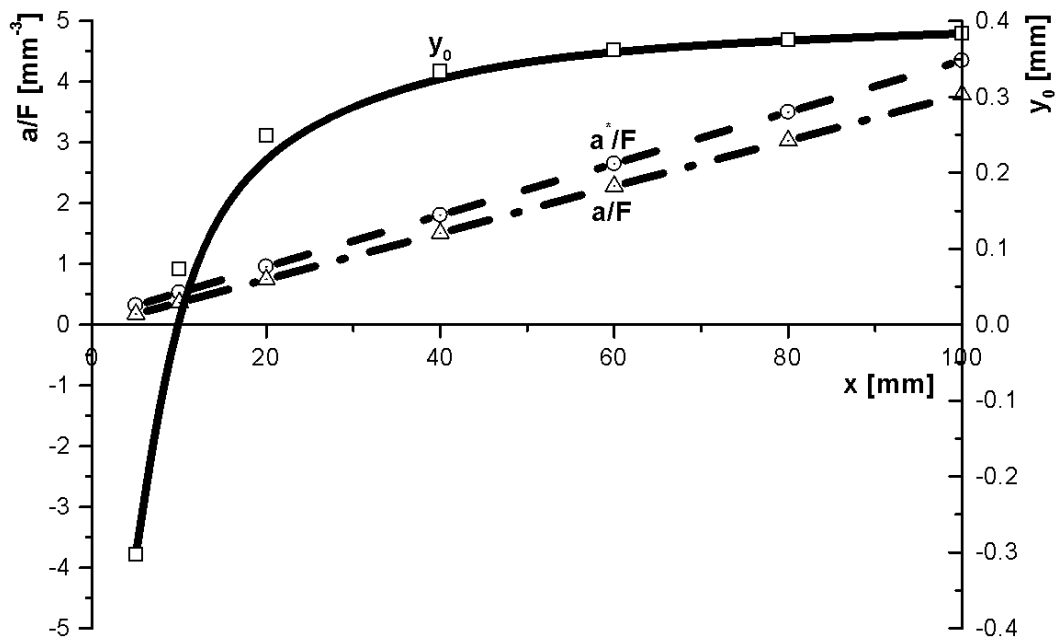
A merevítő hatások számításánál használt terhelési modellt a 7. ábra mutatja. A számításokat elvégeztem vizsgálóbevonat nélkül, és annak alkalmazásával is, melynek grafikus szemléltetése a 8. ábrán látható.



7. ábra

Terhelési modell geometriai jelölésekkel a merevítő hatás számításához

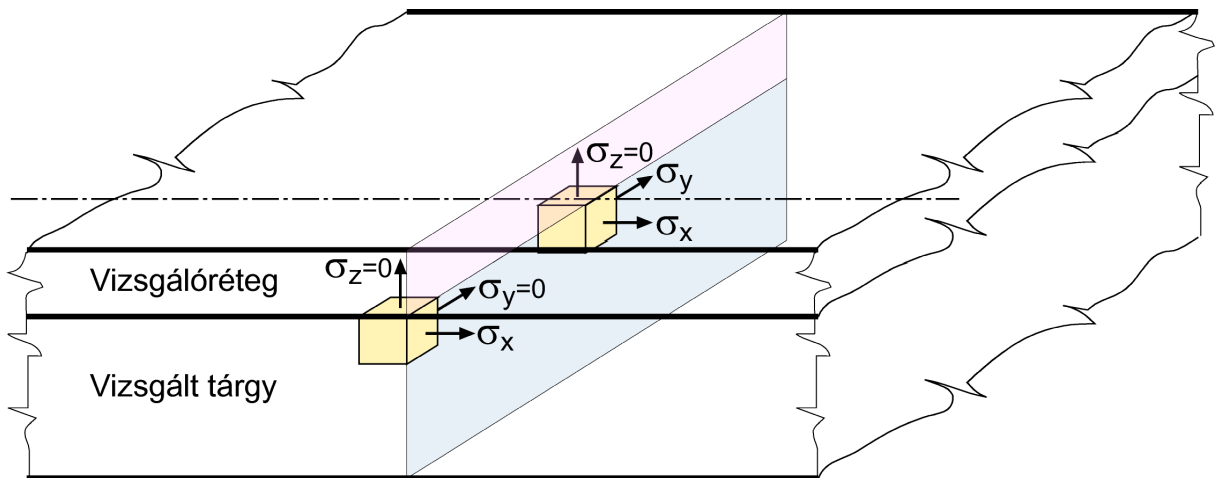
Az elméleti számítások alapján a lemez-rétegbevonat semleges szál helyzetének változása kapcsolatba hozható a vizsgálóréteg merevítő hatásával. A következtetések levonására alkalmas diagramot a 8. ábra mutatja.



8. ábra

Az y_0 semleges szál helyzetének változása a 6. ábrán bemutatott tartó egyenes szakaszán x függvényében, valamint az a/F réteggel ellátott, és a^*/F réteg nélküli tényező alakulása ugyancsak x függvényében

A vizsgálóréteg merevítő hatásának mértéke a vizsgált hely sík alakváltozási, vagy sík feszültség állapotú helyzetének függvénye, melynek szemléltetését a 9. ábrán láthatjuk [17].



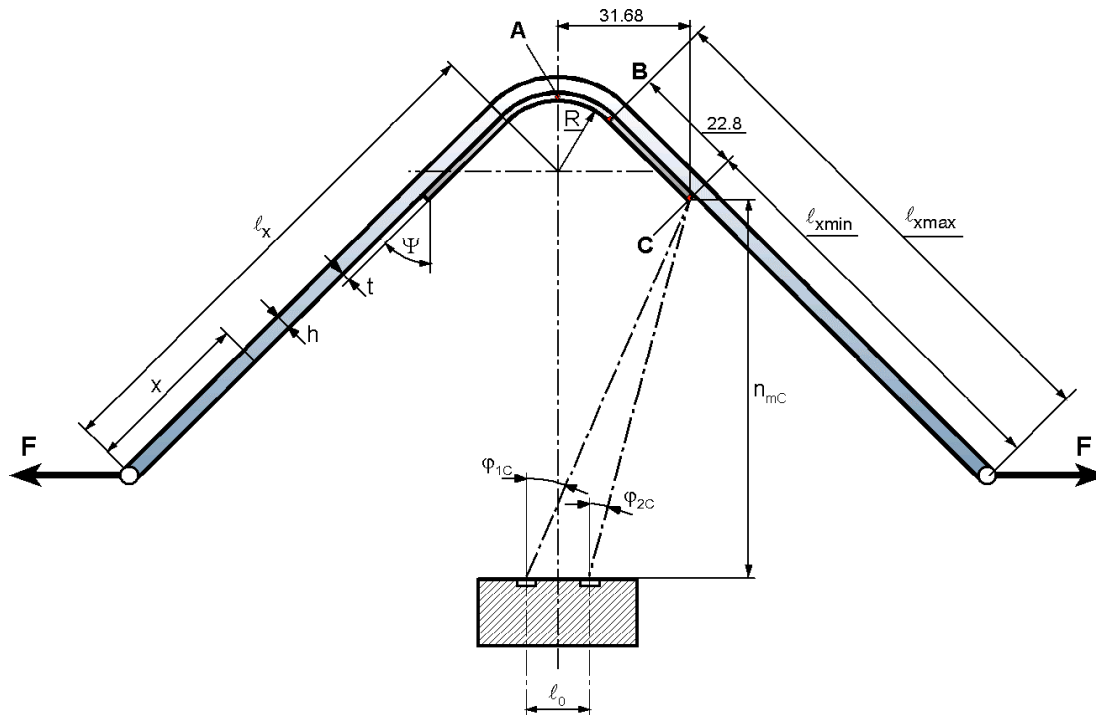
9. ábra

A sík alakváltozási és feszültségállapot helyei egy vizsgálóréteggel ellátott próbatest esetén

A számításokat elvégeztem sík alakváltozási, valamint sík feszültség állapotban lévő pontok ellenőrzésére, merőleges és ferde megvilágítás eseteire. Bebizonyosodott, hogy a merevítő hatásból származó hiba mértéke eléri az 54%-t. Ennek az értéknek a csökkentése abban az esetben lehetséges, amennyiben a vizsgáló réteg kalibrálását (hitelesítését) a szokásos hajlító kísérlettel végezzük, *de nem az eddigiekben megszokott módon az un. alumínium próbatestre ragasztva, hanem a vizsgálat tárgyát képező lemez-réteg együttesen azonos felépítésű hitelesítő próbatesten.* Ebben az esetben ugyanis a hitelesítés a fent számított eltérést már beleméri a vizsgálati eredményekbe.

4.2.3. Mini polariszkóp sugármenetének a kiértékelési hibára gyakorolt hatása.

A mérési hiba alakulását a vizsgált sík, és görbült felszíni szakaszokkal rendelkező **lemez-réteg együttes** egyes kijelölt, nevesített pontjaiban vizsgáltam. Példaként a vizsgálatra használt tartó egy jellegzetes pontjának mérés beállítását szemlélteti a 10. ábra.



10. ábra

C pont, (utolsó vizsgálóréteggel ellátott mérőpont) vizsgálata mini polarizskóp sugármenetének mérési hibára gyakorolt hatásának elemzéséhez.

A mini polarizskóp sugármenetének mérési hibáját, a vizsgált geometriai és anyagjellemző paraméterekkel jellemzett összeállítás esetén (7. ábra) az 1. táblázatban foglaltam össze.

1. táblázat

A 10. ábra egyes kiválasztott pontjaiban (*A*, *B*, *C*) számított hiba- százalékok alakulása a mini polarizskóp merőlegestől eltérő sugármenetének okán, figyelemmel a vizsgált pont feszültségi, illetve alakváltozási állapotának jellegére

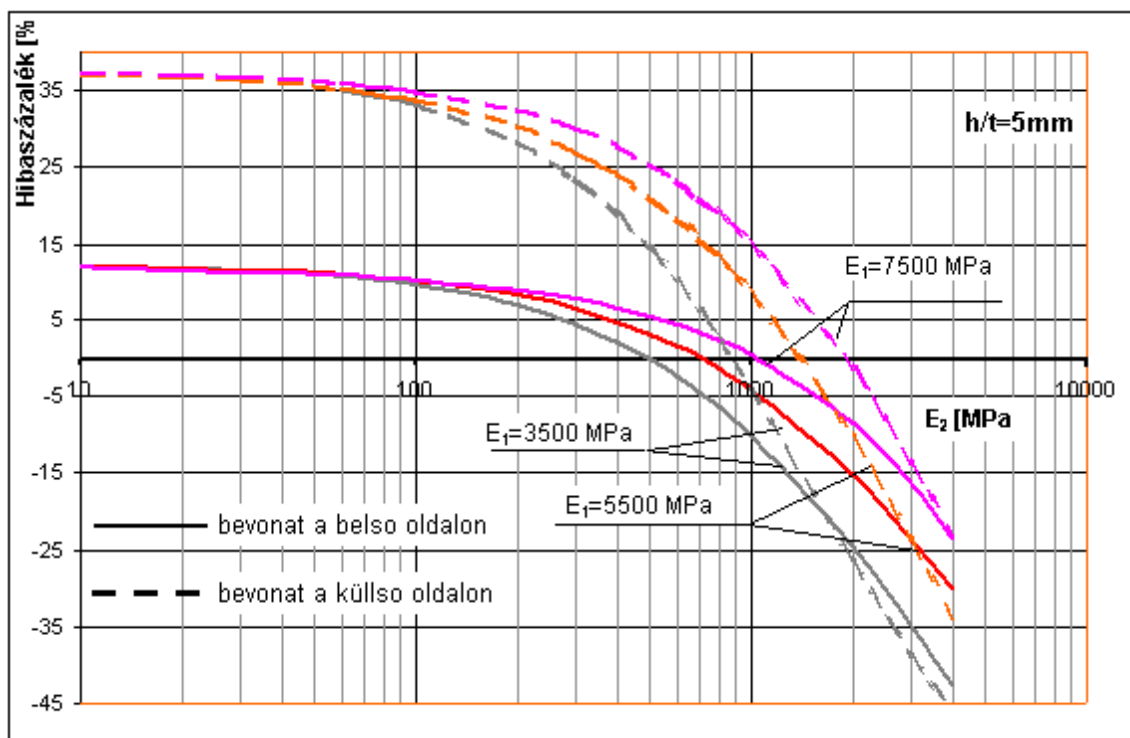
<i>A</i> vizsgált hely	<i>A</i> hiba %-os alakulása	
	<i>sík feszültségi állapotú pont esetén</i>	<i>sík alakváltozási állapotú pont esetén</i>
<i>A</i>	-0,067	-0,598
<i>B</i>	-3,91	-11,94
<i>C</i>	-2,445	-7,42

4.3. Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat alkalmazási területének kiterjesztése

A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat hagyományosan fémszerkezetek ellenőrzésére

kifejlesztett és többnyire ezen a területen is alkalmazott eljárás. A szóban forgó mérési technika elfogadott rétegbevonati anyagai túlnyomó többségükben az *epoxi gyanták* különféle csoportjai közül kerülnek ki. Az irodalomban számos cikket találunk – ha nem is receptszerűen – az egyes rétegbevonati anyagféleségek előállításának kérdéseivel [18], a bevonati anyagok különböző tulajdonságainak mérés technikai problémáival [19], a rétegbevonati anyagok sajátos viselkedésének egyes kérdéseivel [20]. Az 1980-as évektől mind gyakrabban alkalmazott műanyag, szálvázás szerkezetű anyagok vizsgálatában növekvő igény mutatkozott a fémszerkezeteken már hagyományosan elterjedt rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat mérési technikájának alkalmazására. A fémszerkezetek vizsgálatára megfelelőnek bizonyult *epoxi alapú* rétegbevonati anyagok azonban *számos oknál fogva nem alkalmasak a műanyag szerkezetek vizsgálatára*. Ezek közül egyik legfontosabbként említhetem, hogy a műanyag, és a szálvázás műanyag szerkezetek rugalmassági modulusa a fémekénél kb. egy nagyságrenddel kisebb. Ennek következtében – különösen vékonyfalú műanyag szerkezetek esetén – a vizsgáló réteg részt vesz a szerkezet erőjátékában, meghamisítva a mérési eredményeket (merevítő hatás). A másik hasonlóan fontos tény, miszerint a rétegbevonati anyagok a *laminátokon* elszenvedett nagy alakváltozás következtében olyan magas optikai aktivitást mutatnak, (túl sok a megjelenő rendszám) amely alapján a kapott feszültségoptikai képeket igen nehezen, vagy egyáltalán nem lehet kiértékelni.

Szálvázás erősített *kompozit* szerkezetek tönkremeneteli folyamatainak lefolyását, anyagjellemzőinek változásait speciális körülmények között (gamma besugárzás) volt alkalmam két, témavezetésem alatt álló OTKA kutatásban vizsgálni [21], [22]. Az itt hivatkozott kutatások számos olyan kérdést érintettek, melyek kapcsolatban vannak a műanyagok vizsgálatában alkalmazható rétegbevonati anyagok kikeresésével. A [23]–ban részletesen bemutatott eljárás felhasználásával lehetőség kínálkozik a rétegbevonati anyag szálvázás műanyagokon történő alkalmazásakor, a bevonat által okozott mérési hiba csökkentésére. A *11.ábra* szemlélteti a vizsgálóréteg azon tartományát, amelyben elméletileg a vizsgálóréteg merevítő hatása – a számításnál alkalmazott próbatest geometriai és anyagjellemzőinek figyelembevételével – nullára csökkenthető.



11. ábra

A vizsgálóréteg rugalmassági modulusának kapcsolata a kiértékelési hibával, különböző laminát rugalmassági modulusok, mint paraméterek esetén, a vizsgált laminát külső és belső ívére felragasztott vizsgálórétegre. ($h/t = 5$ vastagsági arányok esetére)

5. Az új tudományos eredmények összefoglalása tézisekben

A dolgozat kísérletet tett az optikai feszültségvizsgálat rétegbevonatos mérési eljárása alkalmazási körének pontosabb behatárolására, kiterjesztésére, az alábbiak szerint:

1. Polarizációs optikai célú berendezés mérési elvének új koncepcióját és megvalósítási tervét dolgoztam ki az alábbiak szerint (4. fejezet): a száloptikás fénytovábbítás 3mm-es fényköteg átmérője, valamint a száloptika alkalmazásával történő képtovábbítás $4 \times 4 \text{ mm}^2$ keresztmetszetű rendezett optikai kötegen keresztül megvalósított alkalmazásának újszerű megfogalmazása lehetőséget teremtett olyan polarizációs optikai célú berendezés kidolgozására, amelynek 50 mm külső átmérőjű, 50 mm szerkezeti hosszúságú mérőfejében (mini polarizskóp) megvalósíthatóvá vált távvezérelt módon mozgatott 4 db polarizációs szűrő oly módon való beépítése, amivel a vizsgálóréteggel ellátott tárgy teljes körű (rendszer és irányítás hálózatra kiterjedő) feszültségállapotának meghatározására nyílik lehetőség (görbült felszínnek, eldugott feszültségcsúcsok környezetében is), 50...350 mm tartományú tárgytávolság intervallumban. (Irodalom 10, 15, 17.)

2. Olyan optikai ellenőrző módszert dolgoztam ki, amely a kifejlesztett mini polarizskóp kisméretű optikai lencserendszer leképzési hibáinak egyenkénti és a rendszer elemek egymásra hatásának módszeres elemzésére alkalmas, az alábbi vizsgálati feltételek szerint (5.1. fejezet):

- sík, valamint 90° -os sarok próbatesteken végrehajtott merőleges, majd attól $\pm 25^\circ$ -ban eltérő ferde megvilágítások esetén az alaktorzuláson kívül színtorzulás nem lépett fel, a leképezési hibák vizsgálata a koma, párnatorzítás, asztigmatizmus mérését magában foglaló, 80 mm átmérőjű, 5 mm-es sugár lépcsőkben megvalósított céltáblarács, valamint a 10 mm-es rácsosztású, 2 mm rácspont átmérőjű saktáblarácsok alkalmazásával,
- megállapítható, hogy a fehér fényben vizsgált merőlegetől eltérő fénymenet (ferde átvilágítás) során a színsáv ábra színének megváltozása kizárólag a ferde sugármenet szöghelyzetének következménye.

3. Nyomatékkal és normálerővel terhelt vékonyfalú, kompozit laminát sarok (membránszerkezet kivételével) próbatestek feszültségállapotát leíró mechanikai összefüggések felhasználásával elméleti úton meghatároztam – vizsgált laminát/vizsgálóréteg együttes közös semleges szálának helyzetével (vándorlásával) kapcsolatba hozva – a vizsgálóréteggel ellátott szerkezetben a keresztmetszetet terhelő nyomaték és normálerő azon viszonyszámának határértékét ($M_h/N=60$), amelyen túl a vizsgálóréteg merevítő hatásának a kiértékelési hibára nincs jelentős hatása (6. fejezet), az alábbi kiindulási feltételek biztosítása esetén (6. fejezet):

- laminát/vizsgáló réteg rugalmassági modulusának (E_L/E_R) = 3,7 aránya,
- vastagsági méretük (h/t) = 3,3 aránya.

(Irodalom 8, 9, 14.)

4. A mini polarizskóp megvilágító fényforrása ferde megvilágításra vonatkozó hibaanalízise alapján – a vizsgálórétegbe be- és onnan kilépő sugármenet széttartásából adódóan – elméleti úton meghatároztam (figyelemmel a vizsgált laminát/vizsgálóréteg geometriai és rugalmassági viszonyainak arányára), hogy az ebből származó mérési hiba értéke (6.3. fejezet):

- sík feszültségállapot esetén nem éri el a 4 %-ot (6.8. ábra),

- sík alakváltozási állapot esetén 12 % alatt marad (6.8. ábra), a mini polarizskóp 22 mm-es polarizációs szűrőközep pont távolságából adódóan, az alábbi feltételek biztosítása esetén:

- mini polarizskóp mérőfejének a polarizskóp optikai tengelyén a vizsgált felszíntől mért 123,5 mm, vagy annál nagyobb merőleges távolságában,

- a felszínre 12°-ban – vagy attól kisebb szögben – beeső megvilágító fénynyaláb szöghelyzeténél,

- a vizsgált szerkezet/vizsgálóréteg vastagsági aránya $h/t = 2$, a vizsgált szerkezet (laminát/vizsgálóréteg) rugalmassági modulusainak aránya $E_L/E_R = 4$ fennállásánál.

(Irodalom 6, 9.)

5. Nyomatékkal és normálerővel terhelt, kis görbületi sugarú hengeres héjak feszültséganalízisének vizsgálóréteggel ellátott sarok kialakítású műanyag laminát próbatestekre történt alkalmazásával – a vizsgálóréteg merevítő hatását befolyásoló rendszerelemek szisztematikus elemzésével – megállapítottam, hogy létezik a vizsgálóréteg rugalmassági modulusának egy olyan tartománya, amelyben a fajlagos kiértékelési hiba a vizsgáló bevonat merevítő hatásából adódóan elméletileg zérus értékre adódik. Ez az érték a vizsgálóréteg rugalmassági modulusának $E_R = 450...1900$ MPa intervallumában található, az alábbi feltételek esetén (7. fejezet):

- a vizsgált laminátok $E_L = 3500...7500$ MPa rugalmassági modulusú tartományában,
- a rétegbevonat $E_R = 10...3500$ MPa rugalmassági modulusú tartományában,
- a laminát/vizsgálóréteg $h/t = 5$ vastagsági arányának figyelembevételével,
- a laminát/vizsgálóréteg görbületi sugarának 15-300 mm (gyakorlatilag végtelenig) intervallumában

(irodalom 13, 20, 21, 22.)

Célom szerint a dolgozat – a rétegbevonatos vizsgálati technika mérési adatait elméleti számítások eredményeivel összevetve – bemutatott néhány kiértékelési és hiba-meghatározási eljárást, amelyek alkalmazásával a rétegbevonatos feszültségvizsgálati eljárás mérési hibája szisztematikus munkával csökkenthető, mérési eredményeinek pontossága újszerű felhasználások, pl. szálváz erősítésű műanyag kompozitok esetén a gyakorlat számára elfogadható hibahatáron belül tartható.

6. A disszertáció témájához kapcsolódó tudományos közlemények

6.1. Könyvfejezet

1./ T 3./ Borbás L.: “Seminar and Workshop on **Design for Quality**, Bologna University, Training Centre, Bertinoro”, 1996. július 14...21., **IX. Fejezet: *Experimental approach to mechanical design***. Alfejezet: *Fracture mechanical analysis of reinforced plastic materials*; p.: Chapter IX. p: 17...32., a “Bolognai Egyetem” kiadványa.

2./ T 7./ Borbás L.: Course on: **Engineering Design and Industrial Design Interaction**. Bologna University International Centre – Bertinoro (Forli) Italy. (2000. November,) *Investigation of structural components by photoelastic coating technique*. Chapter II. p.: 18...37., a “Bolognai Egyetem” kiadványa.

3./ T 8./ Borbás L.: **Design for Quality**. Bologna University International Centre – Bertinoro (Forli) Italy. (2001. március.) *Simulation or Laboratory Test?: Investigation of structural components by photoelastic coating technique*. Chapter II. p.: 18...37., a “Bolognai Egyetem” kiadványa.

6.2. Nemzetközi konferencia kiadványban megjelent idegen nyelvű előadás

4./ KE 10./ Borbás, L., Zsáry, Á.: Test of rotation symmetrical parts by photoelastic coating technique.

1st Danubia-Adria-Symposion. (Experimental Methods in Solid Mechanics). Zagreb, Oct. 15-17. / 1984. (Proceedings p.: 82...83)

5./ KE 11./ Borbás, L.: A possible method to separate principal strains in case of photoelastic coating.

1st Danubia-Adria-Symposion. (Experimental Methods in Solid Mechanics). Zagreb, Oct. 15-17. / 1984. (Proceedings p.: 47...50)

6./ KE 14./ Borbás, L.: Some evaluation of the measurement results of photostress analysis.

9th Congress on Material Testing , and 3rd Danubia-Adria-Sinposion. Sept. 29-Okt.3./ 1986. Budapest.(Proceedings p.: 188-189)

7./ KE 22./ Borbás, L., Thamm, F.: Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat alkalmazásának lehetősége hegesztett járműszerkezeti egységek konstrukciójának elemzésére.

ICED, Budapest, 1988. aug. 22-25. (Proceedings p.:257...262.)

8./ KE 29./ Borbás, L.: Evaluation of measurement results of rotation symmetrical parts having curved surfaces in case of photostress analysis.

6th Danubia-Adria-Symposion. Oct.5-7. /1989. Mösern B. Seefeld. (Tirol)

9./ KE 31./ Thamm, F., Borbás, L.: Anwendungsgebiete und Genauigkeitsprobleme des Oberflächenschichtvehrfahrens der Spannungsoptik.

10./ KE 33./ Borbás, L.: Investigation of dynamic strains by reflection polariscope equipped with video camera.

IMECO Congress of: Testing Equipment for Experimental Investigation of Mechanical Properties of Materials. Oct. 9-14./1989. Moscow. Abstract on p.:47...48. IMECO kiadvány: (Proceedings p.:111...116.)

11./ KE 45./ Thamm,F., **Borbás, L.**, Gáti, R., Gál, J.: Investigation of interlaminar strength of corners of laminate parts.

12th Danubia-Adria Symposium, Sopron, 1995. Oct. 05...07. p.: 95...97.

ISBN 963 8094-974

12./ KE 50./ Thamm, F., **Borbás, L.**, Gáti, R., Gaál, J.: Measurement of the interlaminar crack-resistance of domestic GRP-laminates with different types of reinforcement. Proceedings of Joint Korean-Hungarian Symposium on Structural Reliability. 19-22 February 1997, Budapest. (Proceedings p.:83...94.)

13./ KE. 52./ Thamm, F., **Borbás, L.**: Experiments with photoelastic coatings laminated together with GRP parts. Contribution at 17th Danubia-Adria Symposium, Prague, (Czech Republic), 2000. Oct. 12 Oct. 14. p.: 325... 326.

ISBN 80-01-02234-X

6.3. Referált folyóiratban megjelent magyar nyelvű cikk, konferencia kiadvány:

14./ Pl 10./ Borbás, L.: Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat, mint a gépszerkezetek ellenőrzésének eszköze.

BME Közlekedésmérnöki Kar Tanszéki Közleményei. 1988. 52.szám.

ISSN 0139-1615

15./ Pl 11./ Borbás, L.: Törésmechanikai paraméterek meghatározási lehetősége rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálattal.

BME Közlekedésmérnöki Kar Tanszéki Közleményei. 1988. 54.szám.

ISSN 0139-1615

16./ Pl 24./ Borbás, L.: Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat ipari alkalmazási lehetősége a konstrukció fejlesztésében.

ACTA ACADEMIA Polytechnicae "Pollack Mihály" , Pécs. Jubileumi Tudományos Ülésszak. 1990.okt. 25-26. p.:91...95.

17./ Pl. 32./ Borbás, L. Thamm, F.: Száloptika alkalmazása az optikai feszültségvizsgálat rétegbevonatos eljárásánál.

Anyagvizsgálók Lapja 1. évfolyam 1991./1. szám. p.: 14...17.

ISSN 1215-8410.

18./ Pl 33./ Borbás, L.: Rétegbevonatos optikai nyúlás- és feszültségmérés szerepe a megbízhatóság növelésében, a konstrukció fejlesztésében.

Anyagvizsgálók Lapja 1. évfolyam 1992./1. szám. p.:8...11.

ISSN 1215-8410.

19./ Pl 47./ Borbás, L., Thamm, F.: Rétegbevonatos optikai feszültségmérés alkalmazhatósága szálvázaz műanyagokon. Géptervezők és Termékfejlesztők XIII. Országos Szemináriuma. 1997. november 28. Miskolc. p.: 35...39.

20./ Pl 52./ Thamm F., Borbás L., Devecz J.: Újabb réteganyagok kifejlesztése a felszíni réteges optikai feszültségvizsgálathoz. Műanyag és Gumi, 2001. 6. szám (június) (nyomdában)

HU ISSN 0027 - 2914

6.4. Referált idegen nyelvű folyóiratban megjelent idegen nyelvű cikk:

21./ Pl 40./ Borbas, L., Thamm, F.: Meßfehler des spannungsoptischen Oberflächenschichtverfahrens bei Untersuchungen an gekrümmten Oberflächen.

Österreichische Ingenieur und Architekten Zeitschrift. (ÖIAZ) 1996. 141.évf. 4.szám. p.:172...175. ISSN 0721-9415

22./ Pl 46./ Thamm, F., Borbás, L., Gáti, R., Gál J.: Measurement of the interlaminar crack-resistance of domestic GRP-laminates with different types of reinforcement.

Proceedings of Joint Korean-Hungarian Symposium on Structural Reliability. Printed by Hungarian Academy of Engineering 1997. p.:83...94.

7. A téziszüzetben hivatkozott irodalom

- [1] Thamm, F., Ludvig, Gy., Huszár, I., Szántó, I.: A szilárdságtan kísérleti módszerei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
- [2] F. Zandmann, S. Redner, J.W. Dally: Photoelastic Coatings. Society for Experimental Stress Analysis, Westport, 1977.
- [3] Opperl, G.: Das polarisationsoptische Schichtverfahren zur Messung der Oberflächen Spannung am Beanspruchten Bauteil ohne Modell. V.D.J. Zeitschrift 28.sz.1937.
- [4] Frocht, M. M.: Photoelasticity. John Wiley and Sons. 1944-48.
- [5] Zandman, F., Wood, M.: Photostress. Prod. Eng. 27. No. 27. 1956.
- [6] Vásárhelyi, D.: Determination de la reaction du terrain par expérience photoélasticimétrique. Science et Industrie Travaux. 23. pp.:491-462. 1938.
- [7] Szmodits, K.: Optikai feszültségmérés ferdén beeső sugárral. Technika. pp.: 385-386. 1938.
- [8] Kaifás, F.: Járművek, Mezőgazdasági Gépek. Nr.: 6. p.: 210.14/1967.

- [9] Thamm, F., Borbás, L.: Anwendungsgebiete und Genauigkeitsprobleme des Oberflächenschichtverfahrens der Spannungsoptik. 6. Schule. Experimentelle Methoden der Festkörpermechanik. Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik. Proceedings pp.:135...144. Karl-Marx-Stadt. DDR, 1989.
- [10] Schwieger, H.: Zeitschrift für Instrumentenkunde. pp.:34-35. 73/1965.
- [11] A., Stupnicki, J.: Polariskop do badanmetoda elastooptycznej warswy powierchniowej z zastosowanien swiatowodv. XIV. Lengyel Feszültségmérő Kongresszus. Varsó, 1990.
- [12] Hentschel C.: Fibre Optics Handbook. Hewlett-Packard GmbH, F.R. Germany, 1983.
- [13] Fiberoptics, MOM. Statisztikai Kiadó, Petőfi Nyomda, Kecskemét (83. 33826), 1987.
- [14] Naumann, H.: Das Auge meiner Kamera. Verlag von Wilhelm Knapp/Halle (Saale). Germany, 1951.
- [15] Born, I., Wolf, F.: Principles of Optics. Pergamon Press. New York, 1970.
- [16] Speer, S.: Experimentelle Spannungsanalyse. BSB. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig. 1971.
- [17] Szalai, J. : A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana. I. rész. Az OTKA, az Erdészeti és Faipari Egyetem, és többek kiadásában Hillebrand Nyomda Kft. Sopron, 1994.
- [18] Vishay, Bulletin: Anweisung zum Giessen, Bearbeiten und Aufkleben Spannungsoptischer schichten. Measurements Group Meßtechnik GmbH, Vishay München, IBP-310/320-2. 1983.
- [19] Dally, J., Alfirevich, E.: Effects of Poisson ratio mismatch. Experimental Mechanics, 9. sz. 1969.
- [20] Kawata, K.: analysis of elastoplastic behavior of metals by means of photoelastic coating method. J. Scient, Res. Inst. Vol. 52. 1958.
- [21] Borbás, L. (témavezető): Nagyrugalmasságú anyagok tönkremeneteli folyamatainak vizsgálata fotoelasztikus bevonatokkal. OTKA T 2996, BME 5-415. számú kutatási zárójelentés, 1995. április. (4 fejezetben 29 oldal, + 4 oldal függelék.)
- [22] Borbás, L. (témavezető): "Szálvázás műanyag kompozitok anyagjellemzőinek változásai sugárzás hatására, különös tekintettel a szerkezettel egybeáramított feszültségoptikai szenzor viselkedésére". OTKA: T 022073 - BME 20983-252. számú kutatási zárójelentés, 2000. július 28. (7 fejezetben 43 oldal)
- [23] Borbas, L., Thamm, F.: Messfehler des spannungsoptischen Oberflächenschichtverfahrens bei Untersuchungen an gekrümmten Oberflächen. ÖIAZ. 141. Jahrgang, Heft 4. 1996. p.:172...175. ISSN 0721-9415