

Optikai feszültségvizsgálat
Kísérleti eljárás a konstrukció
fejlesztésére, szerkezetek
anyagfelhasználásának és
teherviselésének optimalizálására



**Magyar Mérnöki Kamara
Kiadványsorozata 69.**

Optikai feszültségvizsgálat

**Kísérleti eljárás a konstrukció fejlesztésére,
szerkezetek anyagfelhasználásának és teherviselésének
optimalizálására**

**MMK FAP azonosító:
2020/102-GPT**

Budapest, 2020. szeptember

A sorozat szerkesztője:
NAGY GYULA
a Magyar Mérnöki Kamara elnöke

Készült a Magyar Mérnöki Kamara Gépészeti Tagozatának gondozásában, a 2020. évi Feladat Alapú Pályázatok pénzügyi keretéből.

A kiadvány a Magyar Mérnöki Kamara tulajdona. Másolása, teljes terjedelmében való közzététele csak a Kamara engedélyével lehetséges. Minden jog fenntartva.

Szerzők:
Dr. Borbás Lajos
Gonda Zoltán
(társszerző)

Lektorálta:
Dr. Gelencsér Endre

Kiadó:

Magyar Mérnöki Kamara
1117 Budapest, Szerémi út 4.
info@mmk.hu, www.mmk.hu

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó.....	7
1. Bevezetés	9
2. Kísérleti eljárás és numerikus módszer összevetése	11
3. Az optikai feszültségvizsgálat – mint a kísérleti mechanika egyik eljárása.....	14
3.1. A kísérleti mechanika eljárásainak osztályozása.....	14
3.2. Optikai feszültségvizsgálat elméleti alapjai	16
3.2.1. A mérési eljárás alapvető módszerei	17
3.2.1.1. Színsávábura (izokromáta hálózat), izoklínák, trajektória.....	19
3.2.1.2. A polarizációs szűrők helyzete	21
3.2.2. Az optikai feszültségvizsgálat alapegyenlete, kalibrálás.....	21
3.2.2.1. Kalibrálás	22
3.2.2.2. Iránysáv	23
3.3. Lineáris – átvilágító vagy transzmissziós – optikai feszültségvizsgálat	24
3.3.1. Transzmissziós optikai feszültségvizsgálat berendezései.....	25
3.3.2. Átvilágító (modellezési) eljárás eredményeinek értékelése	27
3.3.2.1. Átszámítás	28
3.3.2.2. Rendszámeloszlásokon alapuló kiértékelés hárompontos hajlított modell esetén	29
3.3.2.3. Négypontos hajlított modell esete.....	31
3.3.2.4. Háromdimenziós kiterjedésű modellek.....	32
3.3.2.5. Törésmechanikai vonatkozások.....	33
3.3.2.6. Térbeli alkatrészek (3D) vizsgálati lehetősége átvilágító polarizáció eljárásával	41
3.3.2.7. Az iránysávok (izoklínák), és a trajektória hálózat képeinek kiértékelése	45
3.3.2.8. Az optikai feszültségvizsgálat képeinek teljes kiértékelése numerikus integrálással	49
3.4. Reflexiós – aktív rétegbevonatos, visszavert fényes – optikai feszültségvizsgálat.....	51
3.4.1. Reflexiós polarizációs optikai vizsgálat berendezései	53
3.4.2. Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat mérőbevonata	58
3.4.2.1. Mérőbevonat készítése	59
3.4.2.2. Bevonat készítés additív gyártástechnológia alkalmazásával.....	61

3.4.3.	A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat eredményeinek kiértékelése	62
3.4.4.	Rendszámeloszlások kiértékelése: feszültségeloszlások vizsgálata	64
3.4.4.1.	Vékonyfalú szelvények csomópontja.....	64
3.4.4.2.	Forgó szerkezeti egység - tengelykapcsoló ház	66
3.4.4.3.	Rendszámeloszlások vizsgálatának szerepe az egymásra épülő terhelések hatásainak (szerelési, üzemi) szétválasztásában	68
3.4.4.4.	Rendszámeloszlások vizsgálatának szerepe a numerikus eljárások peremfeltételeinek meghatározásában	71
3.4.4.5.	Rendszámeloszlások vizsgálatának lehetősége túlfedéssel rögzített szerkezetek esetén	73
3.4.4.6.	Rendszámeloszlások vizsgálatából levont következtetések dinamikus, időben változó terhelések esetén	76
3.4.4.7.	Kisméretű szerkezeti elemek - erőmérő cellák - vizsgálati lehetőségei	83
3.4.4.8.	Polimer szerkezetek vizsgálati lehetőségei.....	85
3.4.4.9.	Biomechanikai alkalmazások, valós csontállományok vizsgálatai....	90
4.	Mellékletek.....	98
M1.	Rendszámok értelmezése, kettőstörés	98
M2.	Használatos modellanyagok és mérés technikai jellemzőik.....	100
M3.	Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat lehetséges bevonati anyagai.....	101
M4.	Esettanulmány az eljárás konstrukció javításában történt alkalmazásáról	103
M5.	Fogalmak és jelölések jegyzéke.....	113
5.	Irodalomjegyzék.....	115

Az elmúlt évtizedekben Magyarországon - európai viszonylatban is - jelentős optikai feszültségvizsgálattal kapcsolatos kutatások folytak, amelyek eredményeiről viszonylag kevés információ jutott el a köztudatba. Jelen pályázati anyag az optikai feszültségvizsgálat alkalmazási módjainak megismerési lehetőségét is biztosítja, a magyar kutatók munkásságának, eredményeinek ismertebbé tétele mellett.

Jelen összeállításnak nem feladata egyes szakterületek, fejezetek személyekhez kötése, ez az adott téma irodalmi hivatkozásakor minden esetben megtörténik. Ugyanakkor a szerzők fontosnak tartják megemlíteni azokat a szakma szempontjából meghatározó egyéniségeket, akik a szakterület hazai művelésében meghatározó módon vettek részt, annak eredményeinek formálói voltak (itt kérve elnézést mindazoktól, akik a munkákban részt vettek, de személyük nem került kiemelésre).

A témakör elméletének és gyakorlatának magyarországi megismertetésében és elterjesztésében meghatározó és iskolateremtő Dr. Thamm Frigyes (1925-2017) - a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem tanára – munkássága, aki a kísérleti mechanika hazai és nemzetközi közösségének egyik meghatározó személyisége volt 1949 óta. Demonstrátor a BME Mezőgazdasági Géptan Tanszékén, résztvevője a hazai felsőoktatásnak, kidolgozója és művelője számos kísérleti eljárásnak. Személyére támaszkodva számos hazai iskola jött létre az ország több felsőoktatási intézményében. Legyen egy tőle idézett gondolat ennek az összeállításnak a mottója: *„Egyszer látni több, mint százszor hallani.”*

A pályamű bevezetése áttekinti a kísérleti mechanika egyik eljárásának, az optikai feszültségvizsgálatnak a helyét, szerepét a mérnöki tudományokban, röviden összegzi és osztályozza a kísérleti mechanika eljárásait, elemzi a numerikus számításokkal való kapcsolatot. Ezt követően részletesen bemutatásra kerül az optikai feszültségvizsgálat két klasszikus eljárása: a modellezési és a konkrét szerkezeti elemen mérő rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat módszere. A pályamű foglalkozik az optikai feszültségvizsgálat alkalmazásával nyert feszültségoptikai képek értékelésével, az azokból levonható információk mérnöki gyakorlatban történő alkalmazásával.

Főbb fejezetek:

- az optikai feszültségvizsgálat elméletének, fizikai hátterének bemutatása,
- az alkalmazási területek, gyakorlati alkalmazások rövid ismertetése,
- az optikai feszültségvizsgálat modellezési eljárása. Ebben a fejezetben bemutatjuk a rendszámeloszlások elemzését (terhelés nagyságára kialakuló interferencia képek), és az irányávok hatásainak vizsgálatát,

- törésmechanikai paraméterek meghatározásának lehetősége a modellezési eljárás rendszámeloszlásának alkalmazásával,
- a rétegbevonatos mérési eljárás fejezet kitér a fém és polimer alkatrészek vizsgálatának lehetőségére,
- biomechanikai alkalmazások (csontok feszültségoptikai elemzése).

A pályamű mint oktatási segédlet a Magyar Mérnöki Kamara továbbképzési rendszerében olyan háttéranyagként használható, amely a felsőfokú képzésben elsajátított mérnöki ismeretek kiegészítését szolgálja, számos alkalmazási példán keresztül bemutatva a kísérleti mechanika helyét és szerepét a tervező, fejlesztő, üzemeltető mérnökök napi gyakorlatában.

1. Bevezetés

A kísérleti mechanika feszültségmérő eljárásai 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 polarizált fényben láthatóvá teszi az alakváltozási (feszültségi) állapotot [1]. A vizsgált szerkezeti elem deformációs mezejét interferencia sávok formájában (hasonlóan a szintvonalas térképekhez, vagy a numerikus számítási eljárások deformáció, vagy feszültségképet mutató színsáv rendszeréhez) megjelenítő eljárás révén annak szilárdsági viselkedését – kellő biztonsággal – megítélhetjük. Feltárhatók a kritikus igénybevételi helyek, behatárolhatók azok a területi zónák, amelyek a szerkezet teherviselésében nem, vagy csak kis mértékben vesznek részt. Elemezhetők az erőbevezetési környezetek, az egyes feszültségkoncentrációs zónák kiterjedése, a feszültségcsúcsok gradiensei.

A mérési eljárás által szolgáltatott deformációs állapotok, majd az anyagtulajdonságok ismeretében ezekből számított feszültségeloszlások a numerikus eljárások által számított eredményekkel (melyek többnyire egyenértékű feszültségállapotot számolnak) könnyen összevethetők. A modelleken, vagy a szerkezeti elemeken az eredmények ismeretében végrehajtott módosítások deformációeloszlásra (számított feszültségeloszlásra) gyakorolt hatásait könnyen és egyszerűen nyomon követhetjük. A feszültségoptikai felvételek elemzése hozzásegít olyan szemlélet kialakításához, amelynek a szerkezetek alakadási fázisában történő tudatos alkalmazása eredményeként megbízható, tömeg azaz anyagtakarékos, deformációra illetve feszültségeloszlásra optimalizált szerkezetet hozhatunk létre. Az optikai feszültségvizsgálat mérési eljárása [2] hasznos kiegészítő eszköze a számító módszereknek, lehetőséget biztosít azok eredményeinek ellenőrzésére, szükség esetén biztosítja a számításokhoz nélkülözhetetlen kiindulási adatokat. Alkalmazásával a numerikus eljárások peremfeltételei ellenőrizhetők, a valós viselkedéshez igazíthatók, módosíthatók.

A számítástechnika igen fejlett szintje lehetőséget biztosít számos, alakadási folyamat különböző szempontok szerinti optimalizálására (alakadás optimalizálási programok vagy „generatív tervezés”), amely számítási eljárások sem nélkülözhetik az eredmények validálását. A számítási eredmények igazolása kísérleti eljárásokkal lehetséges, melyek sorában az optikai feszültségvizsgálat – (2D) síkfeszültség vizsgálatok, (3D) térbeli vizsgálatok, vagy valós szerkezetek (3D) rétegbevonatos vizsgálatai - napjainkban is az egyik legkönnyebben alkalmazható mérési módszer.

Az eljárás a világ számos országában (pl. Amerikai Egyesült Államok, Németország, Olaszország, Oroszország, India, Brazília, Nagy-Britannia, Lengyelország és mások) rendszerszinten alkalmazott technika, illetve olyan társaságok K+F tevékenységének része, mint a NASA, autógyárak és repülőgépgyártók.

2. Kísérleti eljárás és numerikus módszer összevetése

A szilárdsági számítási – numerikus - eljárások a számítástechnika rohamos fejlődésével az 1980-as évektől forradalmi változáson mentek át. A kísérleti szilárdságtan, különösen annak síkfeszültségi problémákat vizsgáló eljárásai mindezek miatt az 1980-as évek közepétől fokozatosan háttérbe szorult. 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 sugarak környezetei, bonyolult, - alakos felszínű alkatrészek nyúlás- és feszültségviszonyainak elemzése), így a számítási és mérési eljárások helyének újrafogalmazására jelentkezett igény a felhasználók részéről. Az 1980-as évek közepére kialakult helyzet vizsgálatakor, nevezetesen a kísérleti és számítási eljárásoknak a szerkezetek feszültséganalízisében játszott szerepének megítélésénél számos tényező hatását mérlegelhetjük.

Ezek közül néhány az alábbiakban foglalható össze:

- a számítógépek processzorainak sebessége töretlenül növekszik és a szimuláció területén eddig sosem képzelt területekre jutottunk, úgymint virtuális prototípus gyártás, virtuális gyártás, virtuális szerszámozás,
- a 90-es évek elején úgy tűnt, a számítási és számítógépes modellezési módszerek fejlődése a szerkezetek feszültséganalízise területén szükségtelenné teszi a különböző mérési eljárások alkalmazását,
- a számítógépes szoftverek területén ugrásszerű fejlődés figyelhető meg, a lineárisan rugalmas feladatok területeiről kilépve eljutottunk a plasztikus megnyúlások, nemlineáris geometriai kérdések kezeléséig, a különböző „végelelemes” módszerek fejlődésének köszönhetően,
- a 2010-es évek közepétől napjainkban is elérhető „generatív” tervezési programok új lehetőségeket nyitottak alkatrészek funkcionális összevonására, a legkülönbözőbb optimalizálási eljárások alakadásra gyakorolt hatásainak számítási eljárásokkal történő vizsgálatára.

A fentiekben röviden bemutatottak – és az ebből fakadó várakozások - ellenére a különböző mérési eljárások nem vesztek annyit jelentőségükből, mint azt egyes szakértők ezt előre jelezték munkáikban.

Az okokat az alábbiakban kereshetjük:

- a feszültségeloszlások számítási úton történő meghatározásához a vizsgált alkatrészek „végelelemesítésére” van szükség. Ez a feladat sokszor eltereli a műveletet végző (operátor) figyelmét a szerkezet mechanikai kérdéseiről.

- a számítógépes programokat többnyire olyan szakértők írják, akik a kérdéses feladat sem mechanikai, sem matematikai kérdéseivel nincsenek teljes egészében tisztában. A feladat megoldásának megközelítése általában a matematika oldaláról történik, aminek következtében az alkalmazott elemtípus és megoldás nem mindig illeszthető a vizsgált problémára. Különösen igaz mindez a mérnöki gyakorlatban igen sűrűn előforduló érintkezési kérdések vizsgálatára.
- a bonyolult, alakos felszínű szerkezeti elemek magas elemszámú FEM hálózatot igényelnek. Ilyen esetekben a szükséges számítási idő az elemszám növekedésével jelentősen emelkedik. A feltételezett feszültségcsúcsok – nagy feszültséggradiensű helyek – területén a hálózat sűrítése szükséges, ami szintén az elemszám növekedéséhez vezet. Mindez a számítások idejét, költségét jelentősen növeli. A futási idő, költségek, pontosság területén kompromisszum meghozatala látszik szükségesnek. A számítási eljárások továbbra is kritikus területei az összetett, görbült felszínű szerkezeti elemek, alkatrészek, azoknak is a helyi feszültségcsúcsokkal tarkított részei.

Az itt megfogalmazott néhány gondolat megfontolásával felállítható egy szempontrendszer, amely alapján – figyelemmel a számítási módszerek alkalmazásának adott területre vonatkozó nehézségeire – a kísérleti eljárások használatának megalapozott területeit körvonalazhatjuk [1]:

- feszültségkoncentrációs helyekkel rendelkező szerkezeti elemek nyúlás és feszültség eloszlásainak meghatározása, különösen ha a szerkezet terhelése ismétlődő igénybevétel,
- valós szerkezetek anyaghibás, inhomogén területeinek vizsgálati kérdései (azok helyének, méretének felderítése). Ezek az esetek a számítógépek számára – a még oly fejlett programok használata esetén (bemenő adatok, peremfeltételek) – sem minden esetben (ha egyáltalán...) írhatók le. Ezek az esetek – tényleges szerkezeteknél – a kísérleti eljárások alkalmazásának szükségességét hangsúlyozzák és feltételezik, sőt megkövetelik,
- szerkezetekre ható külső terhek, a szerkezetek merevségi kérdéseinek tisztázása a mérési eljárások egyik leggyakrabban alkalmazott területe.

A megfelelő eljárás kiválasztásánál a költségek, a mérési eljárás reakcióideje meghatározó tényezők. A kiválasztott eljárást a tervezési folyamat lehetőség szerinti legkorábbi szakaszában célszerű alkalmazni, tekintettel a megvalósítás későbbi fázisaiban jelentkező tetemes többletköltségekre („*olyan korán, amennyire csak lehetséges*” elv alkalmazása).

Utalva a számítási és mérési eljárások alkalmazástechnikai területei között jelen levő versenyre, a „*számítás vagy mérés*” dilemmára az alábbi válasz fogalmazható meg:

- mind a számítási, mind a mérési eljárások saját területükön megfelelően alkalmazva a tervezési folyamat nélkülözhetetlen elemei,
- kiegészítik egymást, hibrid eljárásként történő párhuzamos használatuk biztosítja a felhasználói igényeknek megfelelő termék megvalósítását.

A számítási eljárásoknak a 80-as évek közepétől való töretlen fejlődése mellett a gépek és berendezések megbízhatóságának növelésére, meghibásodási valószínűségük csökkentésére, tömegcsökkentésére, a meghibásodások okainak mind biztosabb feltárására irányuló egyre markánsabb igény a mérési eljárások fejlesztésének szükségességét is előtérbe helyezte. A terhelési folyamatok - különösen járművek esetén - egyre gyorsabb lefolyása és ezzel együtt járóan a tranziens folyamatok jelentőségének növekedése egyre magasabb szilárdsági követelményeket kielégítő szerkezeti anyagok alkalmazását tette szükségessé.

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

- **a tényleges alkatrészben valós igénybevételek hatását** méri,
- elméletileg **tetszőleges alakú alkatrész** vizsgálatára alkalmazható,
- a vizsgált alkatrész anyaga tetszőleges, pl. lehet fém, polimer (természetes és mesterséges egyaránt), vagy akár üveg is,
- nem szükséges a szerkezetet megbontani,
- **a mérési eredmények** már első látásra is **átfogó képet adnak a vizsgált szerkezetről**, érzékeltetik a felszíni alakváltozási állapotot, kimutatják a vizsgált szerkezet veszélyes, adott esetben változtatásra szoruló helyeit, így a kérdéses szerkezet adott terhelési körülmények közötti nyúlásállapotának meghatározására szolgáló állapotfelmérő (diagnosztikai) eszközként alkalmazható.

A leírtakból következik, hogy a termékfejlesztés megfelelő szakaszában vagy a használat közben feltárt meghibásodás okainak feltárására alkalmazott mérési eljárások a szerkezetek elvárt viselkedésének leírásában, vagy a tönkremeneteli okok feltárásában meghatározó szerepet játszanak, és mint a fejlesztés módszertanában hibrid megoldásként (számítás – mérés együttes alkalmazása) ismert megközelítés a szerkezetek optimalizálásának egyik leghatékonyabb eszköze.

Az ábrákat a forrásokból célszerűen az idegen nyelvű szövegek magyar nyelvre fordítását követően illesztettük be. A digitalizálás illetve újraserkesztés során a jobb követhetőség érdekében valamint a kiadvány tipográfiai egységességére törekedve tartalmi változtatás nélküli átszínezéseket, illetve színjelöléseket alkalmaztunk.

3. Az optikai feszültségvizsgálat – mint a kísérleti mechanika egyik eljárása

3.1. A kísérleti mechanika eljárásainak osztályozása

Az optikai feszültségvizsgálat a kísérleti mechanika azon eljárásainak egyike, amelynek segítségével alkalmasan megválasztott modellen vagy alkatrészen, esetleg szerkezeten terhelések hatására kialakuló alakváltozási állapotok meghatározhatók, amelyekből az anyagjellemzők ismeretében a feszültségállapot számítható.

A kísérleti mechanikában a makroszkopikus nyúlás- és feszültségállapotok meghatározásának számos eljárása ismert. Az eljárásokat különböző szempontok szerint csoportosíthatjuk, melyek közül egy lehetséges osztályozási módot az 1. táblázatban adunk közre.

*1. táblázat
Makroszkopikus nyúlás és feszültségmérés fontosabb eljárásai [3]*

Nyúlás- és feszültségeloszlást meghatározó eljárások	Eljárások peremfeltételek meghatározása	Eljárások, mérések stabilitási kérdések felderítésére
Mérések mechanikus nyúlásmérőkkel	Nyúlásmérő ellenállások alkalmazása	Árnyék Moire-eljárás
Nyúlásmérő ellenállások alkalmazása	Nyomáseloszlási vizsgálatok	Speckle-interferometria
Optikai feszültségvizsgálat eljárásai	Rezgőhúros vizsgálati eljárás	Holografikus interferometria
Moire-eljárás	Optikai feszültségvizsgálat eljárásai	Optikai feszültségvizsgálat eljárásai
Thermo-emissziós vizsgálat	Digitális képkorreláció eljárása (DIC)	
Digitális képkorreláció eljárása (DIC)		
Röntgen-diffrakciós mérések		
Neutron sugárzás kísérleti alkalmazása		

Egy másik lehetséges osztályozási módszer, amikor konkrét meghibásodások okainak felderítése a feladat. Ezen eljárásokból láthatunk példákat a 2. táblázatban.

2. táblázat
Meghibásodási okok felderítése érdekében alkalmazott eljárások [3]

Maradó feszültségek mérése	Törésmechanikai vizsgálatok
Specle-interferometria (optikai eljárások)	Optikai feszültségvizsgálat eljárásai
Szeletelési eljárás (roncsolásos eljárás)	Digitális képkorreláció eljárása (DIC)
Fel- vagy szétvágási technika (roncsolásos eljárás)	Árnyék Moire-eljárás
Furatkészítési módszer (részlegesen roncsolásos eljárás)	Holografikus interferometria
Röntgen diffrakció	Thermovízió
Ultrahang sebesség mérése	
Barkhausen-zaj vizsgálatok	
Neutron sugárzás kísérleti alkalmazása	

A fentiekben röviden összegzett (makroszkópikus szinten értelmezett) eljárások lehetőségeinek áttekintésével megfogalmazhatjuk a kérdést: mit is várunk a kísérleti mechanika eljárásaitól?

A kérdést tehát a működés vagy használat kapcsán vizsgálhatjuk, valamint külön tárgyalási területként kezelhetjük egy bekövetkezett meghibásodással kapcsolatos kérdéskör áttekintését.

A szerkezetek működése vagy használata kapcsán elsősorban nyúlás- és feszültségeloszlások vizsgálatát, peremfeltételek meghatározását, stabilitási kérdések megoldását várjuk az alkalmazott mérés technikai eljárástól.

Sérülés, integritásvesztés, meghibásodás esetén az okok feltárása során maradó feszültségek mérését és meghatározását, törésmechanikai ellenőrzéseket, a törésmechanika egyes paramétereinek meghatározását és nem utolsósorban a szerkezetekre ható külső terhek megismerését várjuk vizsgálataink eredményeként. Vizsgálódhatunk modelleken vagy tényleges szerkezeteken, melyek kiterjedhetnek az alkatrészek teljes felületeire, azok egy részfelületére (field measurement), vagy pontszerű környezetekre. Mindezt 2D-s vagy akár 3D-s környezetben, síkfeszültségi vagy térbeli vizsgálattal elvégezhetjük.

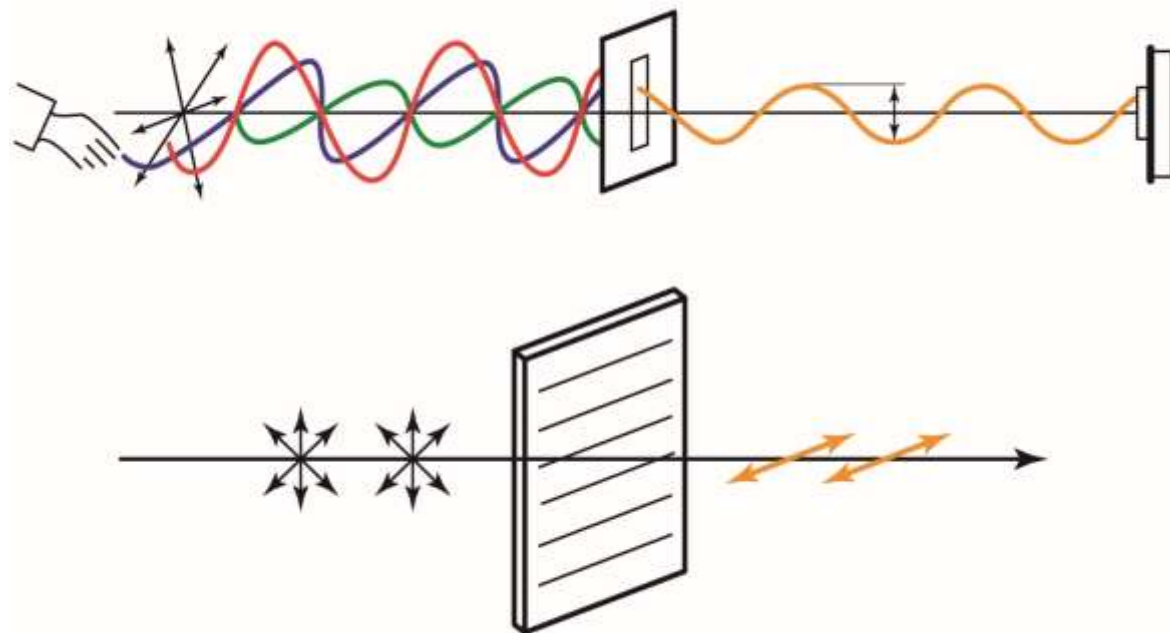
Célunk elmozdulások, nyúlások, deformációk, (adott esetben rezgések, lengések mérése, amely terület érintése nem célja jelen összeállításnak) meghatározása. Vizsgálatainkat elvégezhetjük statikus, valamint időben változó terhelések esetén egyaránt.

3.2. Optikai feszültségvizsgálat elméleti alapjai

A vizsgálat elve: az optikailag átlátszó, amorf szerkezetű, homogénnek tekinthető anyagokban a külső erő hatására kialakuló feszültségállapot kettőtörés változást idéz elő a feszültség összetevőkkel arányosan, amely jelenség polarizációs szűrők között interferencia jelenséggé megfigyelhető. A kialakuló kettőtörés főirányai egybeesnek a feszültségi állapot főirányaival, azaz az optikai és mechanikai főirányok azonosak.

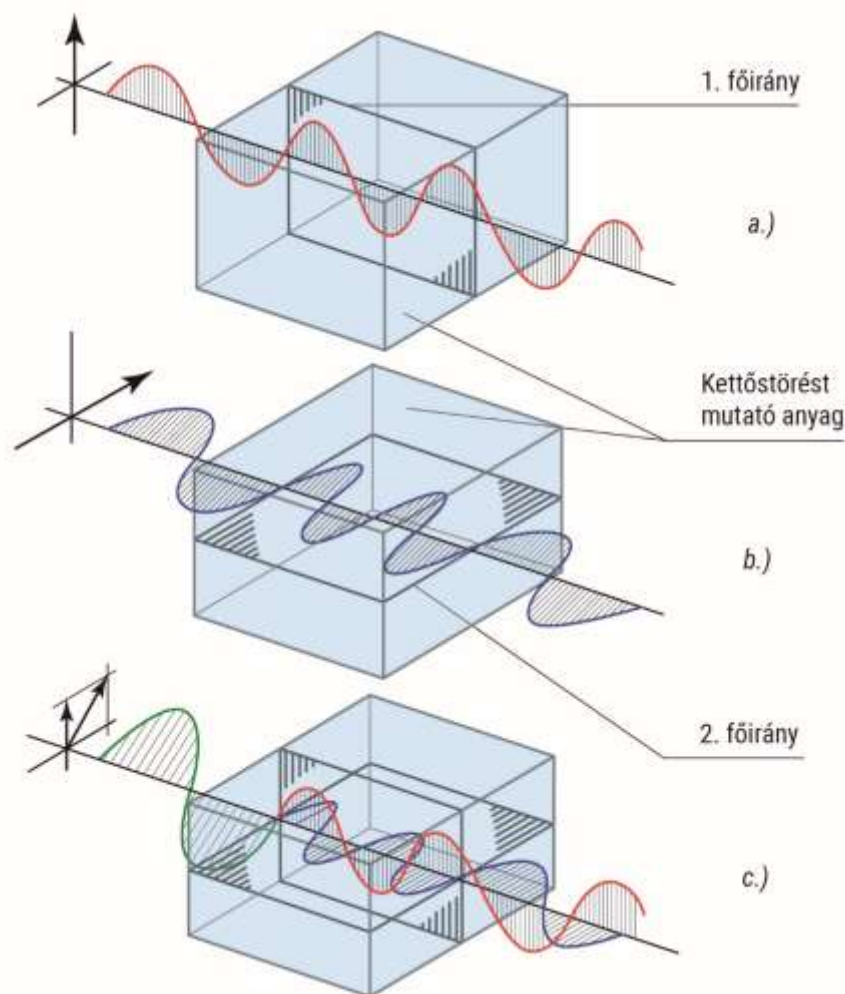
A törésmutatók változása eredményeként a terhelés alatt lévő testből kilépő fényhullámok fáziseltérésének mértéke arányos a feszültségállapot két főfeszültség komponensének különbségével (1), (2). Ezt az arányosságot az optikai feszültségvizsgálat alapegyenlete (5) írja le a feszültségek és nyúlások egyenesen arányos – lineáris összefüggésű – tartományában.

A fény a tér minden irányában terjedő hullámjelenséggé írható le (itt annak korpuszkuláris tulajdonságától most eltekintünk). A polarizáció jelenségét lineáris polarizációs szűrő alkalmazásával a tér minden irányában egyenletesen terjedő fényhullám esetén a 3.1. ábra szemlélteti.



3.1. ábra Polarizáció jelensége lineáris polarizációs szűrő alkalmazásával [4]

Kettőtörés tulajdonságával rendelkező anyagokban a síkban rezgő fényhullám (polarizált fényhullám) útja a 3.2. ábrán követhető [2] alapján.

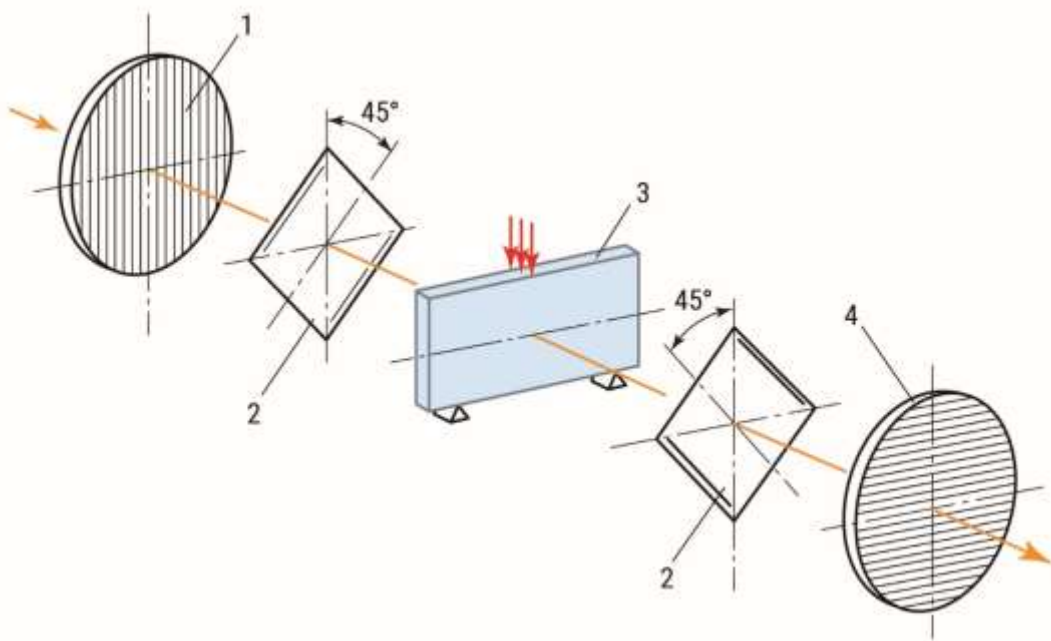


3.2. ábra Síkban rezgő polarizált fénycsugár útja a kettőtörés tulajdonságával rendelkező anyagban [2]

3.2.1. A mérési eljárás alapvető módszerei

A mérési eljárásnak alapvetően két módszere ismert. Időrendben a modellezési, átvilágítós eljárás volt az első (Oppel, 1937), amikor is a vizsgálni kívánt szerkezeti elemet 2D (síkbeli) átlátszó modell segítségével vizsgálták alkalmasan megválasztott terhelő berendezésben, polarizációs szűrők között. A másik eljárás, amely az 1950-es években (Kuske, 1954, [7]) indult fejlődésnek, az optikailag érzékeny, átlátszó anyagot (kétkomponenses epoxy gyanta) a konkrét szerkezeti elemre ragasztva vizsgálta, így a modellezéssel járó valóságra történő átszámítás nehézségeit meg lehetett takarítani, az azon, hogy a vizsgált szerkezeti elem valóságos terhelési körülmények között lehetett vizsgálni.

A fényintenzitás alakulásának mértékét a rendszerbe belépő fényforrás esetében, a szűrőkön áthaladva, a polarizációs optikai berendezés elvi elrendezését (összeállítását) bemutató 3.3. ábra jelöléseivel követhetjük nyomon [2] alapján.



3.3. ábra Polarizációs optikai berendezés elvi összeállítása [2]

ahol: 1 - polarizátor ($\lambda/2$) szűrő,
 2 - negyedhullám lemez ($\lambda/4$),
 3 - kettőtörés tulajdonságával rendelkező vizsgált test,
 4 - analízátor ($\lambda/2$)szűrő, és
 λ - a fény hullámhossza

Amikor a 3.3. ábrán bemutatott polarizációs szűrők (polarizátor és analízátor, a $\lambda/2$ szűrők) helyzete merőleges, - azaz ezen a rendszeren áthaladó fény intenzitása (amennyiben nincs terhelés hatására kettőtörést mutató anyag a rendszerben) - a kilépéskor zérus értéket mutat.

A törésmutató változásának feszültség összetevőkkel kapcsolatos összefüggését az (1) valamint (2) egyenletek írják le [5]:

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2 \quad (1)$$

$$n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1 \quad (2)$$

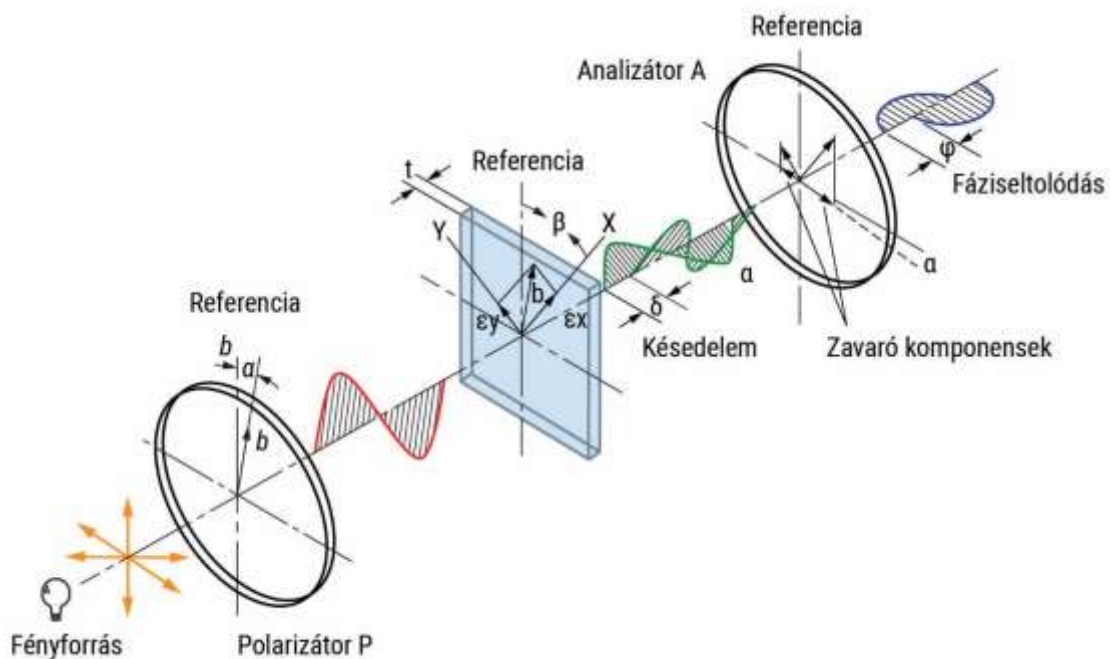
ahol: n_0 - a terheletlen állapotban mért kettőtörés mértéke,
 n_1, n_2 - a főirányokban mérhető kettőtörés mértéke (1. főfeszültség, 2. főfeszültség irányában),
 σ_1, σ_2 - a két főirányban kialakuló főfeszültségek
 C_1, C_2 - a vizsgálati anyag 1. és 2. főirányokban mérhető feszültségoptikai jellemzői.

A 3.3. ábrán további polarizációs szűrőket látunk, ezek a negyedhullám lemezek ($\lambda/4$).

3.2.1.1. Színsávára (izokromáta hálózat), izoklínák, trajektória

A polarizációs berendezésben tehát kétféle szűrőrendszer helyezhető el.

A $(\lambda/2)$ polarizációs szűrők segítségével a terhelések hatására bekövetkező kettőtörés hatását követjük nyomon a rendszámeloszlások megfigyelésével és rögzítésével. A vizsgált tárgyban a terhelés hatására bekövetkező kettőtörés megváltozása eredményeként a testből kilépő fényhullám a két főirányban más-más sebességgel halad át, ami interferencia sávrendszerként figyelhető meg az analízátor szűrő után (fáziseltolódás, 3.4. ábra).



3.4. ábra Terhelt, kettőtörés tulajdonságával rendelkező anyagon áthaladó fényhullám áthaladási sebességének változása a két főirányban [8]

Ez a sávrendszer a színsávára, vagy izokromáta hálózatot mutatja.

A negyedhullám lemezek $(\lambda/4)$ az iránysávok, a terhelések hatására kialakuló deformáció – feszültség vektorok irányainak meghatározását teszik lehetővé. Ez a sávrendszer az iránysávok, vagy más néven izoklínák hálózata.

Összegezve és leegyszerűsítve a fentiekben bemutatottakat elmondhatjuk, hogy egy polarizációs berendezés segítségével, amely polarizációs szűrőket (polarizátor és analízátor) és alkalmasan megválasztott megvilágító fényforrást tartalmaz, a terhelések hatására kialakuló sávrendszer, a rendszámok figyelhetők meg (a rendszámok, azaz az interferencia sávok számát „ m ”-el szokás jelölni, ez az *izokromáta* hálózat).

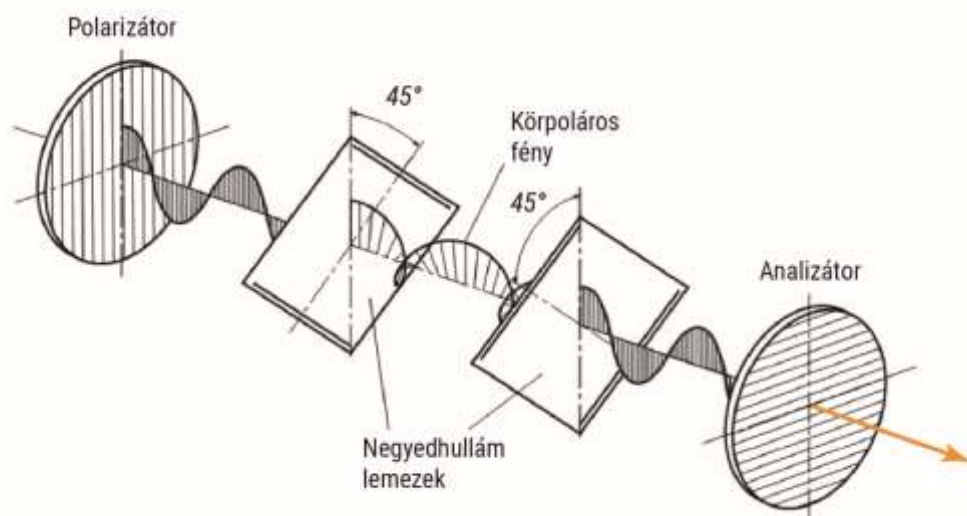
A megvilágító fényforrás kapcsán megjegyezzük, hogy tapasztalatunk szerint a fény elektromágneses sugárzás (390 és 750 nanométer hullámhossz tartományban), amelyet szemünkön át érzékelünk.

A „fehér fény”, - amelyet egyes irodalmakban szokás színtelen fénynek is nevezni - összetett, a színek színeinek a keveréke. A fehér fény útjába helyezett prizma a különböző színeket különböző mértékben téríti el, így a fehér fényt színeire bontja. Amikor a fehér fény egy komponensét kioltjuk (pl. kialakuló interferencia következtében) annak kiegészítő színeit fogjuk látni.

A terhelés hatására kialakuló rendszámok megfigyelésekor különbséget kell tennünk az alkalmazott megvilágító fényforrás hullámhossza, valamint összetétele (lehet a fényforrás egyrészt egyszínű azaz monokromatikus vagy másrészt fehér sugárzó) alapján kapott analizátor szűrő után észlelt interferencia képben. Monokromatikus – adott hullámhosszúságú – fényforrás esetén az interferencia kép az alapszín és annak kioltása esetén fekete sávok formájában jelenik meg. Ha fehér megvilágító fényforrást alkalmazunk, akkor az interferencia jelenség kialakulásakor a kioltott színek komponens kiegészítő színeit látjuk az analizátor szűrő után, azaz színes sávok formájában jelenik meg az interferencia kép. A megjelenő interferencia kép a vizsgálat során alkalmazott anyag kettős törés mértékének a függvénye, azaz a kialakuló rendszámok nagysága is a vizsgálati anyag ezen tulajdonsága szerint változik. A kettőstörés fogalmának – a rendszám bemutatásának - részletesebb ismertetését az M1. melléklet tartalmazza.

Amennyiben a polarizációs berendezés negyedhullám lemezeket is tartalmaz az irányterek is megfigyelhetők/rögzíthetők, amelyek a vizsgált elem bármely pontjában a deformáció – feszültség vektor irányát mutatják meg (3.3. ábra elrendezése). Ez a sávrendszer az izoklínák hálózata, összerajzolt rendszerüket (pl. 10°-ként felvéve) trajektória hálózatnak nevezzük.

A negyedhullám lemezek fényterjedésre gyakorolt hatását, a „körkörös” polarizált fénymenetet a 3.5. ábra mutatja.



3.5. ábra Negyedhullám lemezek hatása a polarizált fény hullámterjedésére [3]

3.2.1.2. A polarizációs szűrők helyzete

A polarizált fény terhelés hatására kettőtörő testen áthaladó intenzitás mértékének változása a polarizációs szűrők helyzetének függvénye. Lehetnek merőleges és párhuzamos állásban. Merőleges állásukban a fényintenzitás változásakor keletkezett interferencia kép rendszámainak egész értékei figyelhetők meg (3), míg párhuzamos polarizátor állás esetén az interferencia sávok a fél rendszámokat jelenítik meg (4).

$$I^{\perp 2} = I^2 \sin^2 \pi m \quad (3)$$

$$I^{\parallel 2} = I^2 (1 - \sin^2 \pi m) \quad (4)$$

ahol:

merőleges (\perp) polarizátor állásban (sötét képmező) a rendszámok:

$m = 1; 2; 3; \dots$;

párhuzamos (\parallel) polarizátor állásban (világos képmező) a rendszámok:

$m = 0,5; 1,5; 2,5; \dots$;

3.2.2. Az optikai feszültségvizsgálat alapegyenlete, kalibrálás

A törésmutatók változása eredményeként a terhelés alatt lévő testből kilépő fényhullámok fáziseltérésének mértéke arányos a testben kialakuló nyúlás- és feszültségállapot két főfeszültség komponensének (legnagyobb és legkisebb) különbségével. Ezt az arányosságot az optikai feszültségvizsgálat alapegyenlete írja le (a feszültségek és nyúlások egyenesen arányos tartományában), melyet levezetésének mellőzésével az alábbi, gyakorlatban alkalmazható összefüggéssel írhatunk le [3] (5):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{S}{\nu} m \quad (5)$$

ahol:

σ_1 és σ_2 - a két főirányban kialakuló főfeszültségek,

S - feszültségoptikai arányossági tényező (figyelembe veszi a megvilágító fényforrás hullámhosszát, a vizsgálati anyag mérés technikai jellemzőit),

ν - a vizsgált modell vastagsága,

m - az észlelt interferencia kép, a kialakult kettőtörés változása, melyet rendszámnak hívunk.

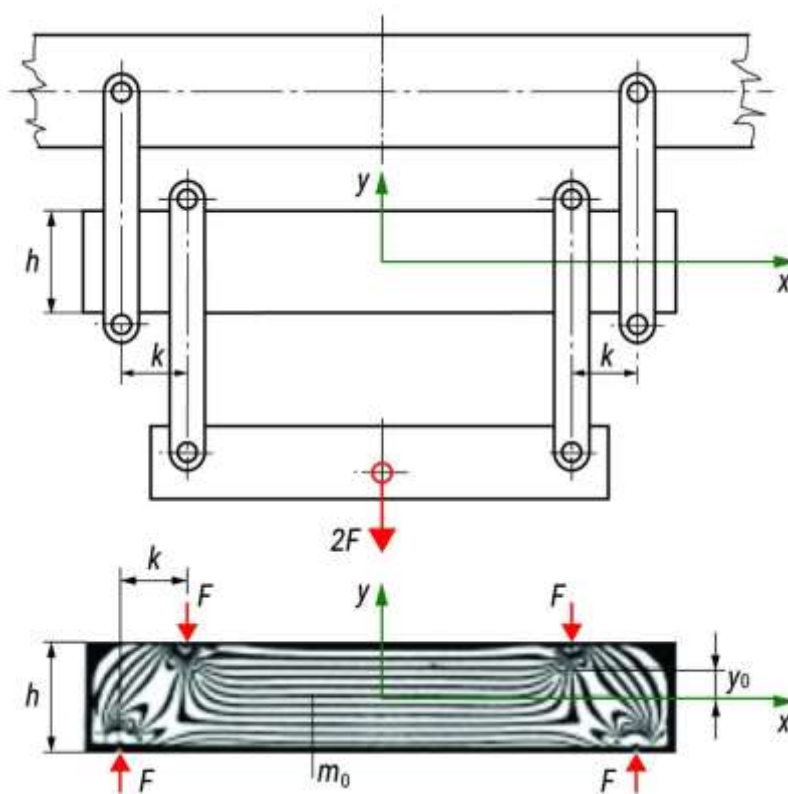
Az analízort követően megjelenő interferencia (optikai kép) sávrendszer a vizsgált elem „ ν ” vastagsága menti kettőtörés változásának átlagértéke.

3.2.2.1. Kalibrálás

A feszültségoptikai arányossági tényező, az S meghatározását – a vizsgálati feltételekkel megegyező megvilágítás használatával – célkészülékben, ismert terhelési feltételek alkalmazásával, kalibrálással végezzük. A kalibrálás során az ismert terhelési és geometriai adatokkal rendelkező próbatest feszültség és nyúlás állapota számítható, amely egyértelműen hozzárendelhető az interferencia kép sávrendszeréhez.

A transzmissziós optikai feszültségvizsgálat modellen mérő eljárásánál a kalibrálás során tiszta igénybevételt (pl. húzás, hajlítás) alkalmazunk és mérjük az optikai hatást, amely alapján az alkalmazott modellanyag kalibrálási tényezője – feszültségoptikai állandója – meghatározható [8].

A kalibrálás menetét, négyponthoz hajlított tartó esetén, monokromatikus megvilágítás alkalmazásával a 3.6. ábra szemlélteti.

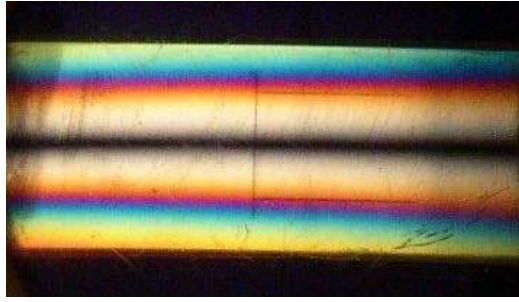


3.6. ábra Kalibrálás négyponthoz hajlított tartó alkalmazásával [8]

A tartó terhelése és geometriai adatai ismeretében az optikai állandó S , (6) alapján:

$$S = \frac{12Fky_0}{h^3m_0} \quad (6)$$

Fehér fényforrás alkalmazásával a kalibrálási eljárás során kapott interferencia képet (rendszámeloszlást) – a hasonló geometriájú, de más terhelési állapotú négyponthoz hajlított tartó esetén a 3.7. ábra mutatja.



3.7. ábra Példa rendszámeloszlás bemutatására [3]

A 3.7. ábra rendszámeloszlásának vizsgálatából néhány közvetlenül a gyakorlat számára felhasználható következtetést tudunk levonni. Mindenek előtt a tartó vízszintes középvonalában húzódik a semleges réteg, melynek feszültségállapota zérus. Alatta és felette a nyomott és a húzott zónák találhatók szimmetrikus elhelyezkedésben. Megfigyelhetjük a lila – kék szín átmenetét, amely monokromatikus megvilágítás alkalmazásával az egységnyi rendszámnak felel meg.

A 3.7. ábrán látható kalibrációs rendszámeloszlás a numerikus számítások egyenértékű feszültségállapotának feleltethető meg (bővebben [2]–ben kifejtve).

A 3.5. ábrán látható átvilágító – más néven lineáris – polarizskóp tartalmazza a körkörösen polarizált fény kialakulásához szükséges negyedhullám lemezeket ($\lambda/4$). Ebben az elrendezésben az átvilágító polarizskópon áthaladó fény intenzitását merőleges, valamint párhuzamos polarizátor állások esetén a (7), valamint (8) összefüggésekkel írhatjuk le [8] alapján:

$$I_{\perp} = A_0^2 \sin^2 2\varphi \sin^2 \pi m \quad (7)$$

$$I_{\parallel} = A_0^2 [1 - \sin^2 2\varphi \sin^2 \pi m] \quad (8)$$

ahol:

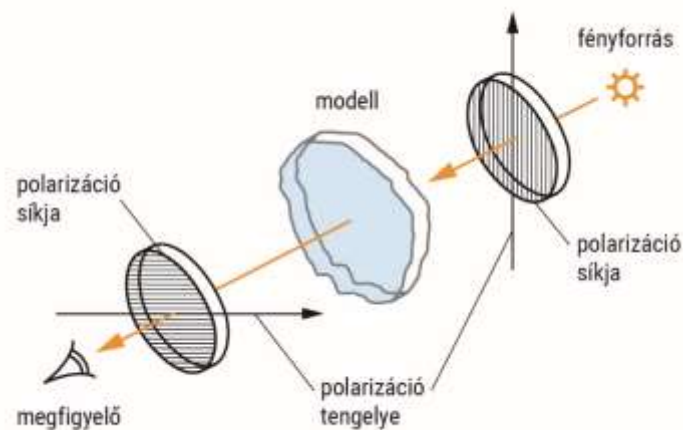
A_0 - a fényhullám zérus szöghelyzetben lévő amplitúdója,
 m - a rendszám.

3.2.2.2. Iránysáv

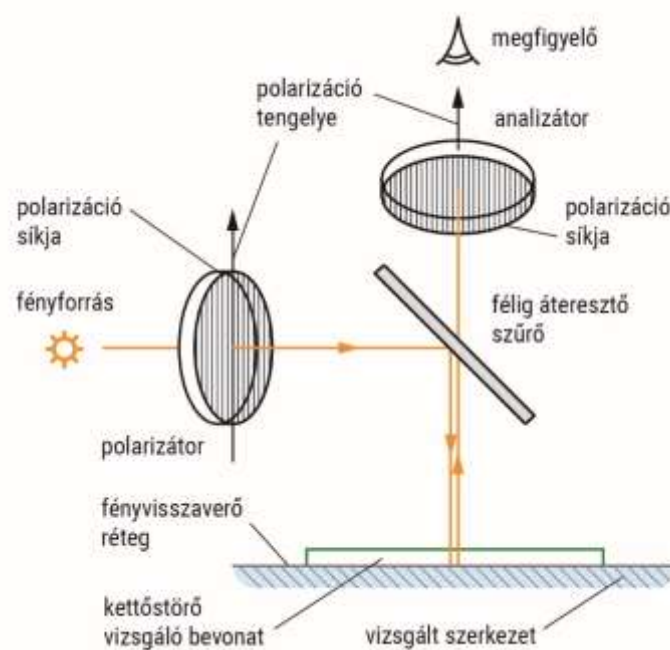
Az analizátor szűrőhöz abban az esetben sem jut fény, amennyiben a feszültségi főirányok a polarizskóp polarizációs tengelyeivel egybeesnek. Ezt a feltételt kielégítő pontok összessége az iránysáv, vagy izoklín vonalsereg. A keresett hálózatot a polarizációs szűrők adott értékű (pl. 10° -os) elforgatásával, és az ezekből összerajzolt hálózat rögzítésével határozhatjuk meg. Amennyiben az így összerajzolt iránysáv hálózat minden egyes pontjában a polarizációs szűrők szöghelyzetét rögzítjük, a trajektória hálózatot hozhatjuk létre, amelynek szerepét a későbbiekben tárgyaljuk.

3.3. Lineáris – átvilágító vagy transzmissziós – optikai feszültségvizsgálat

A kísérleti szilárdságtan optikai feszültségvizsgálati eljárása az átvilágító vagy transzmissziós, más néven modellezési technika alkalmazásával indult útjára. Ennél az eljárásnál a vizsgált próbatest síkfeszültségi állapotában a terhelés hatására kialakult rendszámeloszlását vizsgáljuk. A modellezési – átvilágító – elrendezés mellett az eljárás tényleges szerkezeti elemeken történő, ún. rétegbevonatos megoldása is ismert, amely eljárást a későbbiekben szintén ismertetünk. Emlékeztetőül az optikai feszültségvizsgálat kétféle eljárásának elvi összeállítását (elvi elrendezését) a 3.8. ábrán mutatjuk be.



a.)



b.)

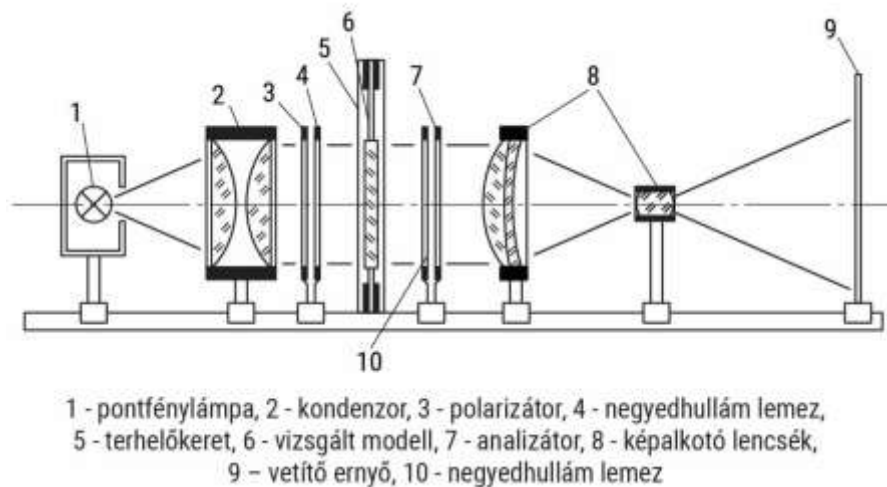
3.8. ábra Optikai feszültségvizsgálat

a.) transzmissziós és b.) reflexiós eljárásának egy-egy lehetséges elvi elrendezése [3]

3.3.1. Transzmissziós optikai feszültségvizsgálat berendezései

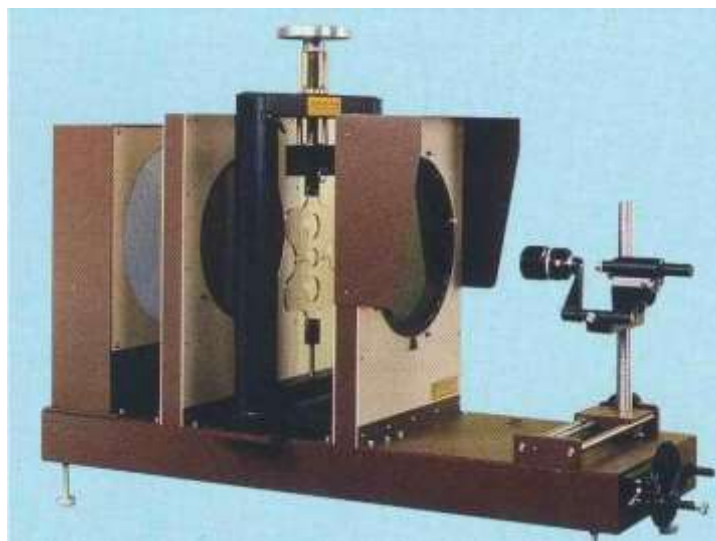
Az átvilágítós berendezések igen széles skáláját találhatjuk úgy a kutatási, oktatási, mint az ipari gyakorlat területén. A berendezések elsősorban a polarizációs szűrők méretében, a megvilágító fényforrások kialakításában, valamint a berendezésben alkalmazott terhelő készülékekben különböznek. A megfigyelő helyén napjainkban elsősorban digitális képrögzítésre alkalmas berendezéseket találunk.

Az átvilágítós, párhuzamos fénymenetet biztosító berendezések kutatási célokra is alkalmas elvi elrendezését a 3.9. ábrán adjuk közre.



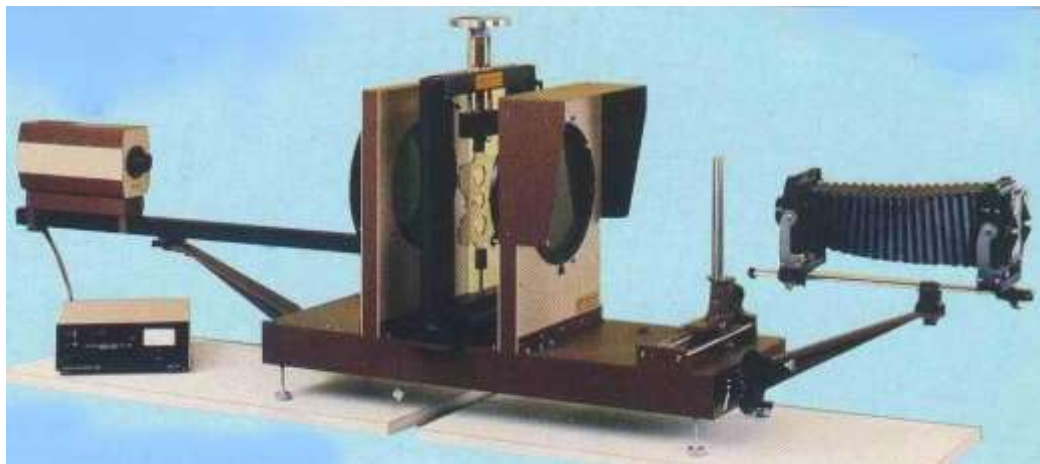
3.9. ábra Párhuzamos fénymenetet biztosító, lencserendszerrel felszerelt átvilágítós berendezés elvi összeállítása [2]

A 3.10. ábrán egy alapkészüléket mutatunk be, amely modellkísérletek elvégzésére alkalmas.



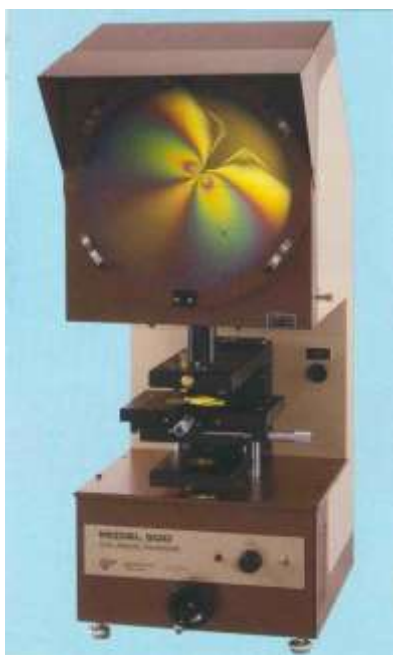
3.10. ábra Vishay 060 Series, átvilágítós berendezés [10]

Ugyanezen gyártó készüléke alkalmasan megválasztható fényforrással, a képek rögzítésére alkalmas berendezéssel felszerelve látható a 3.11. ábrán.



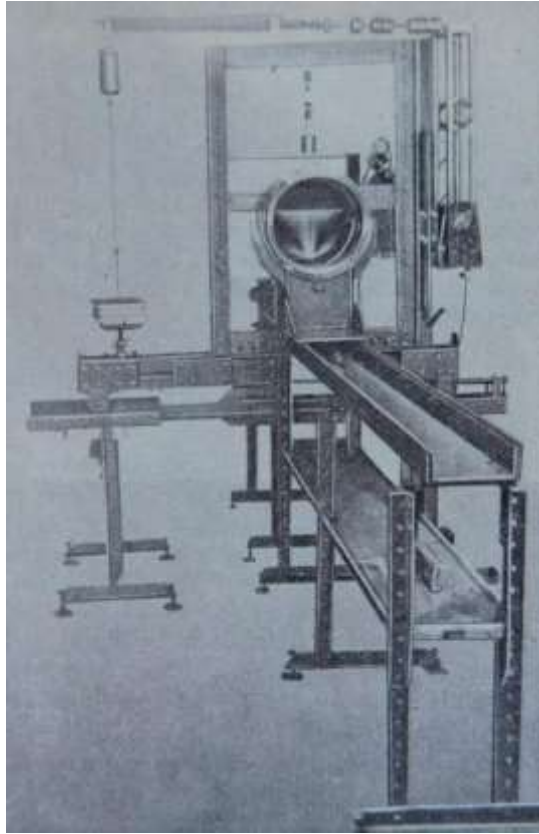
3.11. ábra Vishay 060 Series, átvilágító berendezés, moduláris fényforrással és speciális fényképezőgéppel ellátva [10]

Az egyes vizsgált részletek kivetítésére alkalmas projektoros berendezést láthatunk a 3.12. ábrán.



3.12. ábra Vishay Series 500, átvilágító projektoros polariszkóp [11]

Természetesen számos egyéb erre a célra gyártott, úgymond gyári optikai berendezés valamint célkészülék létezik, melyek az ipari gyakorlatban vagy az oktatás különböző szintjein kerülnek felhasználásra, bemutatásra. Egy Magyarországon gyártott (ma már nem létező, MTA KUTESZ nevű vállalkozás által), Magyarországon tervezett berendezést mutat a 3.13. ábra.



3.13. ábra MTA KUTESZ gyártmányú átvilágító berendezés (1985) laboratóriumi célokra [2]

Itt említjük meg, hogy a hazai optikai feszültségvizsgálat történetének áttekintése 1989-ig bezárólag a [12]-ben áttekinthető.

3.3.2. Átvilágító (modellezési) eljárás eredményeinek értékelése

Mint a korábbiakban láthattuk, az optikai feszültségvizsgálatból kétféle sávrendszert kapunk vizsgálatunk eredményeként.

A terhelés nagyságát a rendszámok vagy izokromáták mutatják. A polarizációs szűrők helyzetének függvényében beszélhetünk egész (keresztezett vagy „sötét képmezős” polarizátor állás), vagy fél rendszám (párhuzamos vagy „világos képmezős” polarizátor állásról). Természetesen nem csak egész és fél rendszámú kiértékelést végezhetünk. A tört rendszámok meghatározására kompenzációs eljárások szolgálnak [2].

A kiértékelésre kapott rendszámeloszlás függ a megvilágító fényforrástól. Monokromatikus megvilágítás esetében alapszín és fekete a sávok rendszere, míg fehér fényforrás alkalmazása esetén színes sávok mezejét kapjuk, hiszen az interferencia jelenség hatására a kioltott szín kiegészítőit látjuk az analizátort követően.

A kialakuló nyúlás- illetve feszültségmező másik jellemző sávrendszere az iránysvonalak vagy izoklínák hálózata, melyet a polarizációs rendszerben elhelyezett negyedhullám lemezek segítségével nyerhetünk. A polarizációs szűrők együttes elforgatásának szöghelyzetében rögzített iránysvonalak összerajzolásával a trajektória hálózatot tudjuk megrajzolni. Ezen hálózat minden pontjába húzott érintő és az arra állított merőleges a feszültségvektor irányát adja meg.

Természetese lehetőségünk van az ún. teljes kiértékelésre is, amikor nem egyszerűen a rendszámeloszlás színsvonal ábráinak kalibrálási folyamatban meghatározott értékeit számítjuk át pl. a vizsgált elem határfelületén feszültségértékekre, hanem egy tetszőlegesen kiválasztott sáv mentén a teljes feszültségmező értékeit pontról pontra meghatározzuk. Ezt az eljárást teljes kiértékelésnek hívjuk, melynek egy lehetséges eljárása a kiválasztott sáv mentén végrehajtott numerikus integrálás (pl. Frocht-módszer, [2]).

3.3.2.1. Átszámítás

A modellkísérletek esetén további kérdést jelent a kapott eredmények valóságra történő átszámítása. Ebben a modelltörvények előírásait kell követnünk.

Ha a vizsgált szerkezetről készített modell geometriai hasonlósága és terheléseloszlása megállapítható, ebben az esetben a modell és az eredeti szerkezet mechanikai jellemzőinek átszámítása megoldható. Kiindulásként megállapítható, hogy sík feszültségi állapotban levő test feszültségértékei a vastagság mentén állandónak tekinthetők (az átvilágított modell vastagsága menti átlagértéket látjuk az analizátort követően) így a vastagsági átszámítással nem kell foglalkozni.

Még egy egyszerűsítéssel kell élnünk kiindulásként: nevezetesen a keresztirányú viselkedést leíró Poisson-tényező hasonlóságát feltételezzük a modell és a szerkezet vonatkozásában.

Sík feszültségi állapot vizsgálatánál a modellen mért feszültségi értékeket a tényleges szerkezetre a (9) összefüggés alkalmazásával tudjuk átszámítani [9]:

$$\sigma_{sz} = \frac{F_{sz}}{F_m} \left(\frac{L_m}{L_{sz}} \right)^2 \quad (9)$$

ahol:

- σ - a feszültség,
- F - a terhelő erő,
- L - a geometriai méret,
- m - a modellre, sz - a szerkezetre utaló index.

Teljes hasonlóság feltételezésével a modell és a vizsgált szerkezet alakváltozási állapota egymásnak megfeleltethető, (feltételezve a Poisson-tényezők azonosságát is), az alakváltozásokra a (10) szerinti összefüggés írható fel [9]:

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{sz}} = 1 = \frac{\sigma_m}{\sigma_{sz}} \frac{E_{sz}}{E_m} = \frac{F_m}{F_{sz}} \left(\frac{L_{sz}}{L_m} \right)^2 \frac{E_{sz}}{E_m} \quad (10)$$

ahol:

ε - a fajlagos nyúlás, m - a modellre, sz - a szerkezetre vonatkozóan.

Fenti összefüggés alapján a terhelésekre vonatkozó hasonlóság (a modellen alkalmazandó terhelés) a (11) alapján [9]:

$$F_m = F_{sz} \left(\frac{L_m}{L_{sz}} \right)^2 \frac{E_m}{E_{sz}} \quad (11)$$

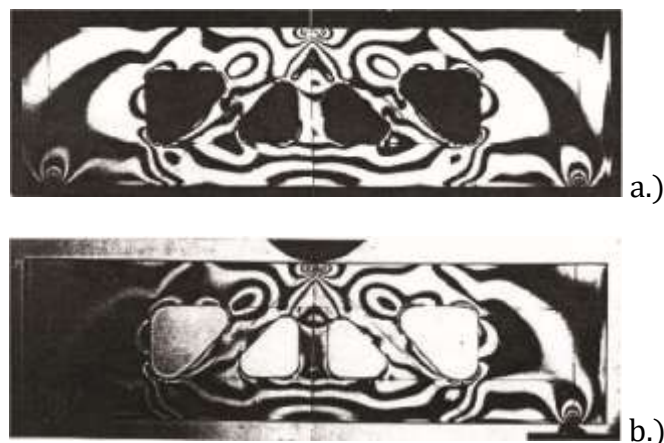
ahol:

E - rugalmassági modulus, m - a modellre, sz - a szerkezetre vonatkozóan.

3.3.2.2. Rendszámeloszlásokon alapuló kiértékelés hárompontos hajlított modell esetén

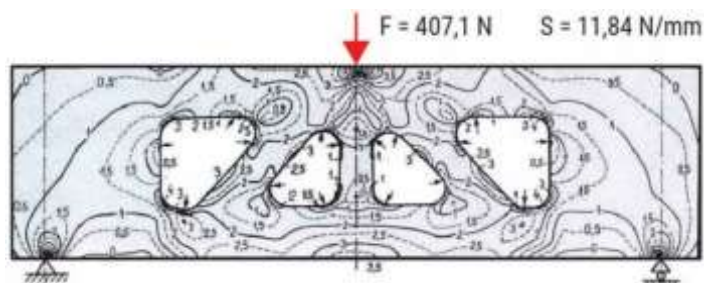
A rendszámeloszlásokon alapuló kiértékelést egy hárompontos, hajlított, üregekkel gyengített modell síkfeszültségi állapotának szélső rétegekben ébredő feszültségeloszlásának a kiértékelésével mutatjuk be.

Elsőként a rendszámeloszlásokat rögzítjük előbb keresztezett majd párhuzamos polarizátor állásban, amelyeket a 3.14. ábrán mutatunk be [13].



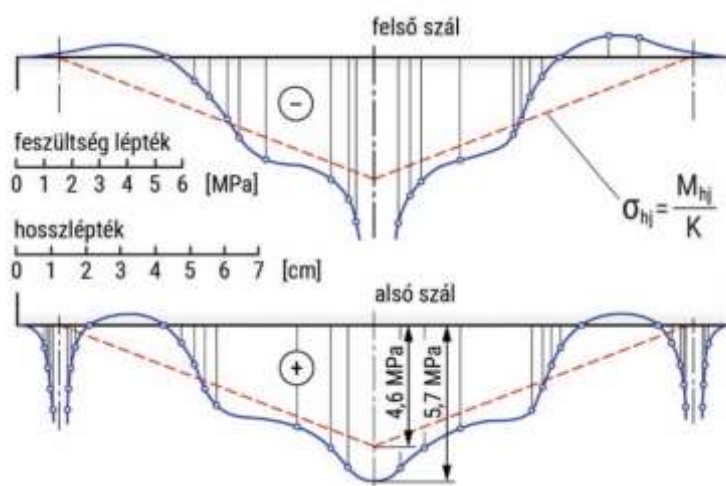
3.14. ábra Hárompontos hajlított tartó modelljének rendszámeloszlása: egész rendszámok keresztezett polarizátor állásban a.), valamint fél rendszámok párhuzamos polarizátor állás b.) esetén [13]

A rendszámeloszlások alapján elkészítjük az ún. összerajzolt rendszámeloszlást (3.15. ábra, [13]), amely már – az egységnyi rendszámhoz tartozó feszültségérték, vagyis a kalibrálási adatok ismeretében - konkrét feszültségi számítások elvégzését is lehetővé teszi.



3.15. ábra Összerajzolt rendszámeloszlás hárompontos, könnyített tartó esetén [13]

A rendszámeloszlások alapján a szélső szálakban (alsó, felső szál) a feszültségeloszlást közvetlenül felrajzolhatjuk. Érdekes a mérési eredményeket az elemi szilárdságtan számításával egybevetni, amelyet a 3.16. ábrán mutatunk be.



3.16. ábra Hárompontos, könnyített tartó rendszámeloszlása alapján mért feszültségeloszlások a tartó alsó és felső szálában [13]

A kiértékelést a hajlított tartó szélső szálainak rendszámeloszlásai alapján végeztük el. A felső szélső szál a nyomott, míg az alsó szélső szál a tartó húzott zónája. Jól látható, hogy az elemi szilárdságtan hajlított tartóra felírható összefüggése ($\sigma_{hj} = M_{hj}/K$, ahol K a tartó keresztmetszeti tényezője, 3.16. ábra alapján) jelentős mértékű eltérést mutat a ténylegesen kialakuló feszültség állapottól. Az elméleti, egyszerűsített számítást az előírások betartásával elvégzett mérésekből nyert eredmények felülírják.

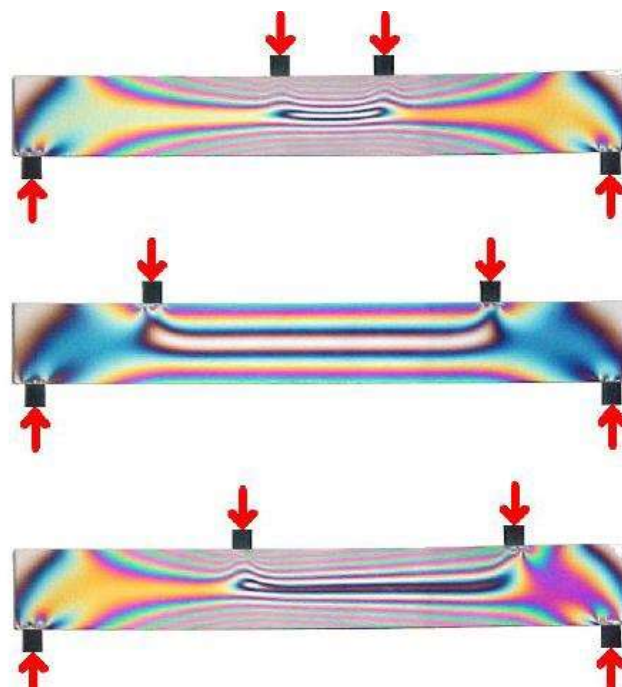
Ennek oka részben a 3.15. ábra szerinti kialakítású - kivágásokkal - gyengített tartó deformációs viselkedésében, másrészt az erőbevezetések környezetének az elemi szilárdságtan által kevésbé kezelhető leírásban keresendő. Konkrét szerkezet esetén a tervezőnek – pl. kockázatértékelést követően - kell eldöntenie, hogy elegendő-e az

adott esetben egy egyszerűsített számítás, a gyengített szakaszokra külön számításokat végez, végelelemes módszert, kísérleti eljárást vagy ezek kombinációját alkalmazza.

Egy kellően fejlett numerikus eljárás a valósághoz közelebb eső megoldást biztosít, ugyanakkor a számítási eljárás peremfeltételeinek pontosítása (pl. erőbevezetések környezete, kontakt kérdések) továbbra is a kísérleti eljárások körébe tartozik.

3.3.2.3. Négypontos hajlított modell esete

A modellezési eljárás rendkívül szemléletes módon ad lehetőséget a terhelés változtatására bekövetkező alakváltozási- és feszültségállapot nyomon követésére, amelyre egy négypontos hajlított tartó terhelési körülményeinek változtatásával mutatunk be példát a 3.17. ábrán [14] alapján.

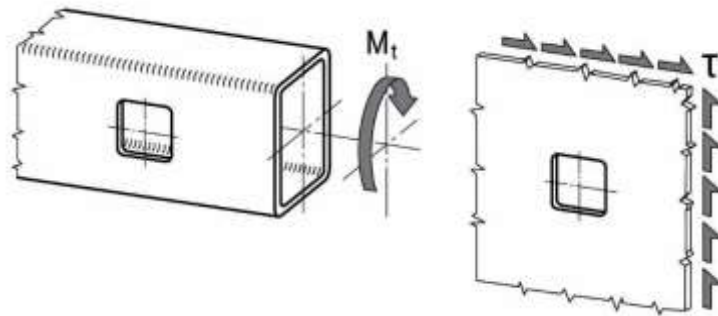


3.17. ábra Négypontos hajlított tartó erőbevezetési körülményeinek hatása a deformációs és feszültségállapotra a rendszámeloszlás alakulása alapján [14]

A modell megvilágítása fehér fényforrással történt, párhuzamos polarizátor állásban, amely a fél rendszámok megjelenítését teszi lehetővé. A szélső szálak igénybevételének változása jól megfigyelhető az alátámasztások távolságának változtatásával, valamint a terhelési szimmetria megváltoztatásának hatására bekövetkező változások is jól érzékelhetők. A bemutatott tartó alsó és felső szálaiban keletkező igénybevételt a modellanyag kalibrációs adatainak ismeretében számíthatjuk. A modelltörvény (9), (10), (11) összefüggései alapján kapott eredmények a konkrét szerkezetre meghatározhatók [9].

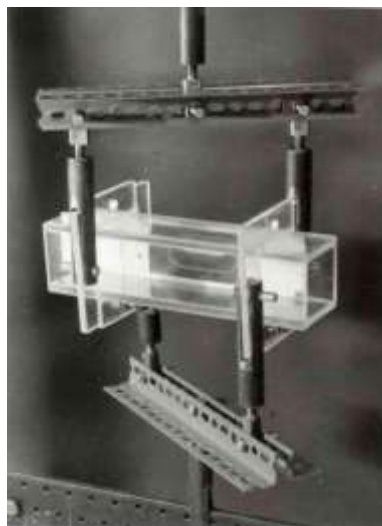
3.3.2.4. Háromdimenziós kiterjedésű modellek

A síkfeszültségi modellvizsgálat megfelelő polarizációs szűrő elrendezéssel alkalmas háromdimenziós modellek vizsgálatára is. Erre látunk példát 3.19. ábrán, amikor is egy modellanyagból összeállított, négyszög keresztmetszetű, csavarásra terhelt vékonyfalú csőszelvény oldal falán kialakított különböző geometriájú kivágások feszültségeloszlásra gyakorolt hatása volt a vizsgálat célja [15]. A terhelési modellt a 3.18. ábrán mutatjuk be.



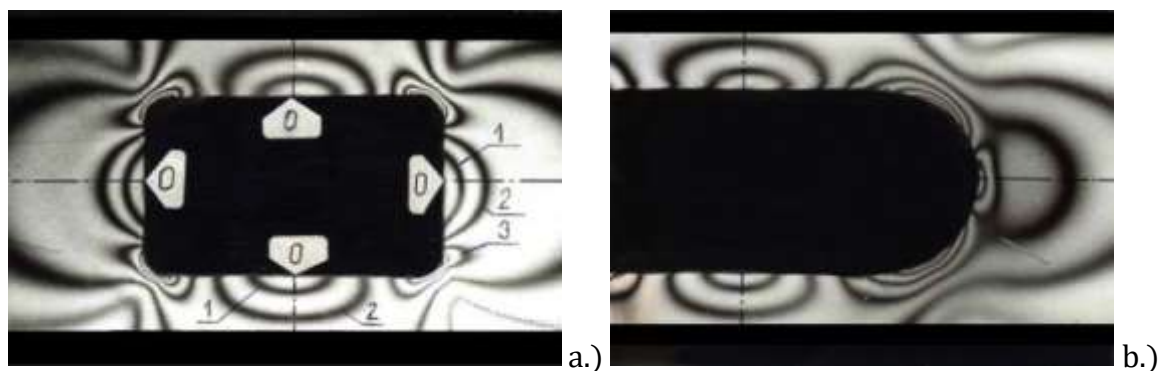
3.18. ábra Csavarásra terhelt, oldal falán kivágással gyengített csőszelvény mechanikai modellje [15]

A vizsgálatot optikailag aktív anyagból ragasztott, geometriai hasonlósággal elkészített modellen végezték, a csőszelvény belsejében elhelyezett polarizációs szűrők alkalmazásával, a különböző geometriájú kivágások feszültségre gyakorolt hatásának meghatározásához. A terhelő berendezést és a modellt a 3.19. ábra mutatja.



3.19. ábra Négyszög keresztmetszetű csőszelvény terhelési körülményei [15]

A csőszelvény oldal falán alkalmazott különböző geometriájú kivágások rendszámeloszlásait lásd a 3.20. ábrán.



3.20. ábra Négyyszög keresztmetszetű csőszelvény oldalfalán alkalmazott különböző geometriájú kivágások rendszámeloszlásai [15]

A különböző tartókon a könnyítések érdekében elvégzett kivágások lekerekítési sugarainak feszültséggyűjtő hatását egyszerűen vizsgálhatjuk és értékelhetjük.

A rendszámeloszlások elemzése ebben az esetben segít a megfelelő méretű lekerekítési sugarak kiválasztásában. Ugyanígy átfogó képet kaphatunk az alkalmazott kivágások egymástól mért távolságának optimális megválasztása, - másként fogalmazva az egymásra gyakorolt hatások minimalizálása érdekében végzett vizsgálataink - eredményeiről. A 3.20. ábra rendszámeloszlásai alapján a csavarásra terhelt négyyszög keresztmetszetű tartó kivágásainak alak optimalizálása elvégezhető.

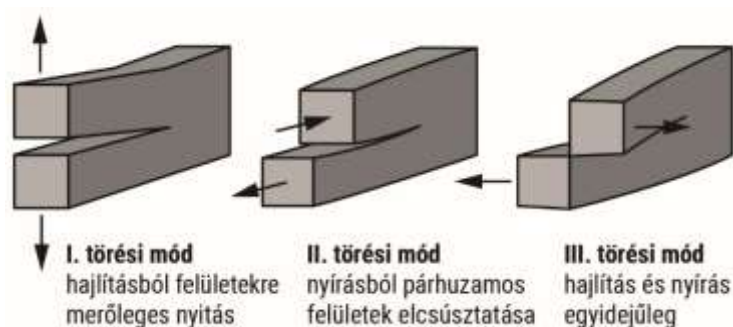
3.3.2.5. Törésmechanikai vonatkozások

A műszaki élet egyik nagy kihívása a szerkezetek tönkremenetele, sérülése, integritás vesztese, amelynek eredményeként eredeti funkciójának ellátására alkalmatlanná válik, meghibásodik. A meghibásodás az esetek egy részében a törés fogalmkörébe tartozik. A törés jelenségének leírása, fizikai okainak feltárása külön tudományterület kérdéskörébe tartozik, nem témája jelen összeállításunknak. Ugyanakkor a törés jelenségének vizsgálata, annak kialakulása, majd lefolyása – az elméleti összefüggések feltárása mellett – a kísérleti eljárások vizsgálódásának területébe tartozik. Ebbe a sorba illeszthető az optikai feszültségvizsgálat eljárása is, hiszen rendkívül szemléletesen képes megjeleníteni egy repedés környezetének deformációs és az ebből számítható feszültségi viszonyait. A vizsgálati eredményekből számos következtetés levonásán túl lehetőségünk van olyan tényezők meghatározására, amely a kialakult inhomogenitás (repedés) környezetének viselkedését leírja. Ezek a vizsgálatok a törésmechanika területébe illeszkednek.

Az optikai feszültségvizsgálat kísérleti eljárása alkalmas a törésmechanika [16] alapvető, kritikus intenzitási tényezőinek meghatározására a repedéscsúcs környezetében deformációs és feszültségállapot meghatározásával.

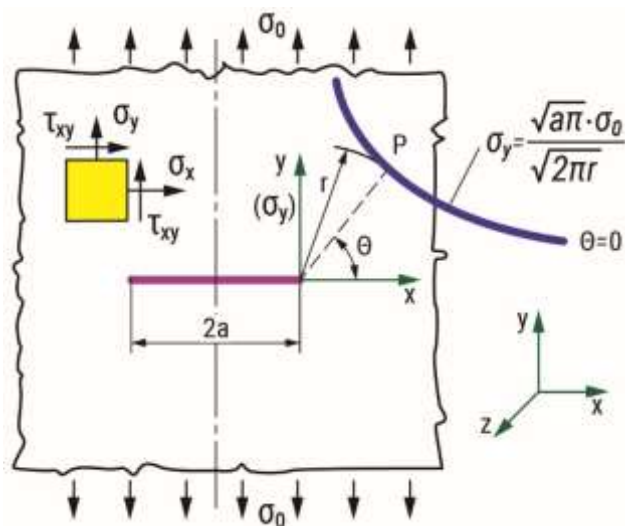
Mint fenti rövid ismertetőből látható, jelen összeállítás célja nem a törésmechanika tudományterületével mélyebben foglalkozni, ugyanakkor a bemutatni kívánt mérés technika elméleti háttérének megvilágításához hozzátartozik néhány alapvetés erről a tudományterületről, melyet az alábbiakban osztunk meg olvasóinkkal.

A lineáris törésmechanika három alapvető törési módot különböztet meg egy meglévő repedéscsúcs környezetének vizsgálatakor, a 3.21. ábrán bemutatottak alapján: a hajlításból (felületekre merőleges nyitás), a nyírásból (párhuzamos felületek elcsúsztatása), valamint ezek kombinációjából (hajlítás és nyírás egy időben) létrejövő meghibásodást.



3.21. ábra Törési módok a repedéscsúcs környezetében, annak terhelése függvényében [17]

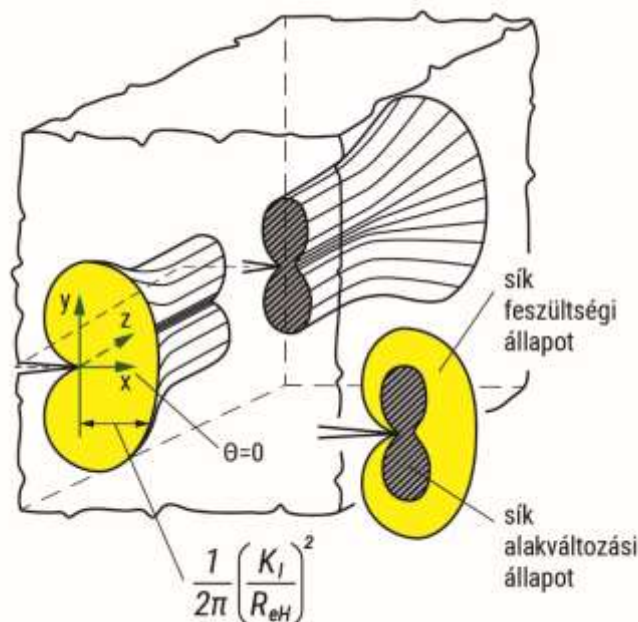
Egy „2a” méretű repedéscsúcs környezetének feszültségállapota – a levezetések mellőzésével a 3.22. ábrán bemutatottak alapján írható le.



3.22. ábra „2a” méretű repedéscsúcs környezetének feszültségállapota [17]

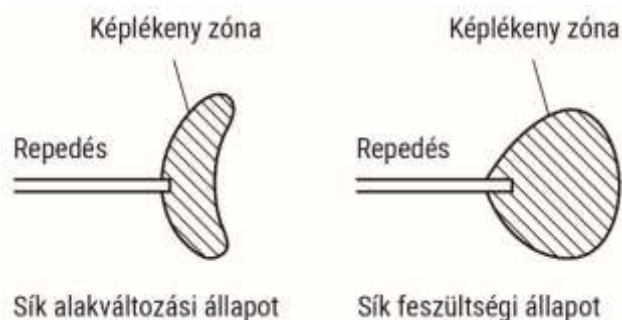
A repedéscsúcs környezetének feszültségállapota a szerkezeti anyag vastagságának függvénye. A repedéscsúcs környezetének plasztikus területe a felszíntől mért távolságára (elhelyezkedésére) figyelemmel síkbeli alakváltozási (vizsgált testen

belüli elhelyezkedés), vagy síkbeli feszültségi (vizsgált test felszíne) állapotban lehet, a 3.23. ábrán bemutatottak alapján.



3.23. ábra Repedéscsúcs környezetének viselkedése annak vastagsági mérete függvényében [17]

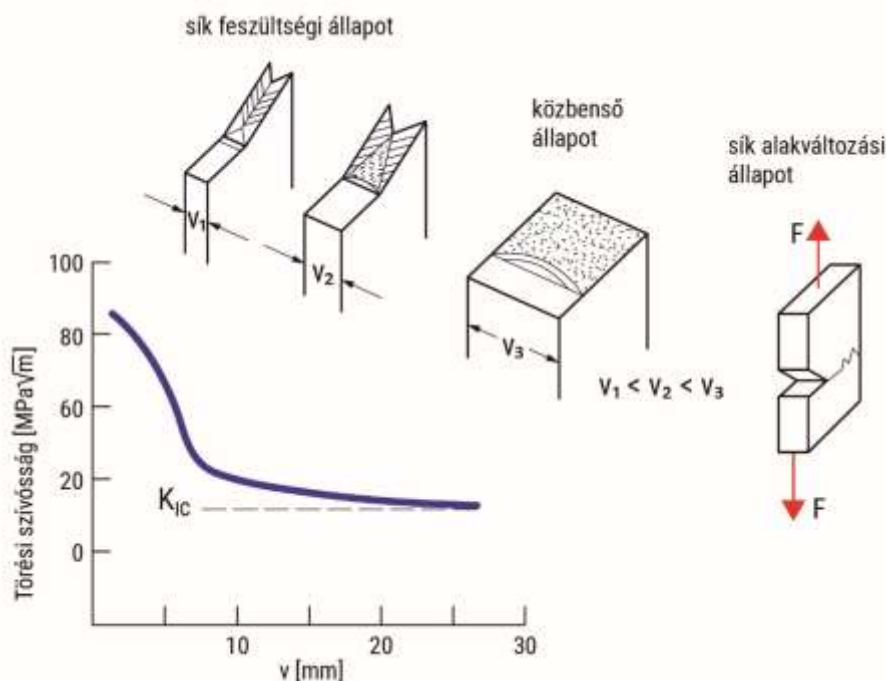
Egyszerűsített ábrázolásban tehát egy repedéscsúcs környezetének plasztikus zónája annak megfelelően írható le alakváltozási vagy feszültségi jellemzőkkel, hogy a kérdéses testben miként helyezkedik el (3.24. ábra).



3.24. ábra A sík alakváltozási valamint a sík feszültségi állapot alakja a repedéscsúcs környezetében [17]

Egy, a szerkezetben (próbatestben) meglevő repedés továbbterjedésének (crack propagation) feltétele, hogy a plasztikus zóna környezetében a repedés megindításához szükséges energia rendelkezésre álljon. A feszültségintenzitási tényezőnek – amely a repedéscsúcs környezetében annak geometriai viszonyaira figyelemmel kialakul – tehát van egy ún. kritikus értéke, ami a repedés terjedés megindításához tartozik. Ezt a feszültségintenzitási tényezőt kritikus intenzitási tényezőnek nevezzük. A repedés megindulásának pillanatában a plasztikus zóna

környezetének állapotára a kritikus intenzitási tényező a jellemző, melyet törési módtól függően indexelünk, például az I. törési módban: K_{IC} . Ennek mértékét a 3.25. ábrán követhetjük nyomon.



3.25. ábra I. törési mód kritikus intenzitási tényezője K_{IC} , a szerkezeti vastagság függvényében [17]

A repedéscsúcs környezetének feszültségintenzitási tényezőjét valamint annak kritikus értékét – a levezetések ismételt mellőzésével – a (12), valamint (13) összefüggések alapján számíthatjuk [17].

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{a \pi} \quad (12)$$

$$K_{Ikrit} = \sigma_{0krit} \sqrt{a \pi} \quad (13)$$

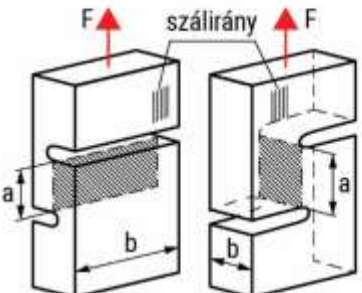
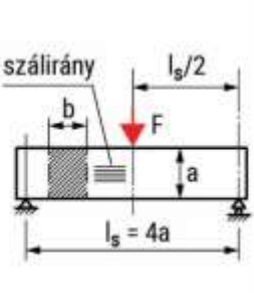
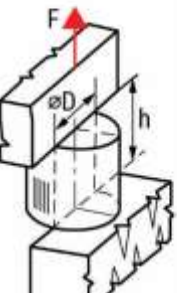

ahol:

K_I – a σ_0 feszültségállapotú, a méretű repedés feszültségintenzitási tényezője, melynek kritikus értéke a feszültségmező repedés pillanatának kritikus feszültségállapotához σ_{0krit} tartozik [17].

Az optikai feszültségvizsgálat ennek a kritikus intenzitási tényezőnek az egyszerű meghatározására biztosít lehetőséget.

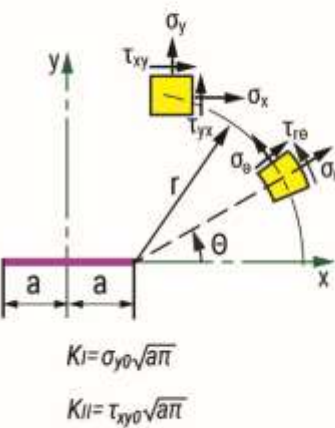
A kritikus intenzitási tényezők meghatározása egyébként csak igen költséges módon, repedéssel elkészített, előfárasztott (akár több millió ciklussal is előterhelt) próbatestek használatával lehetséges. A kritikus intenzitási tényezők meghatározására

szokásosan alkalmazott (előfárasztott, repedéssel rendelkező) próbatest alakokat, valamint a próbatestek tönkremenetelét okozó nyírófeszültségek összefüggéseit a 3.26. ábrán adjuk közre.

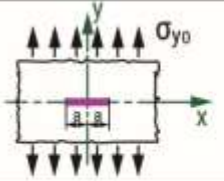
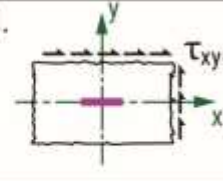
Bevágott próbatestek	Hajlított próbatest	Nyíróerővel terhelt próbatest	Csavaró nyomatékkal terhelt próbatest
			
$\tau_1 = \frac{F}{ab}$	$\tau_2 = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{bd}$	$\tau_3 = \frac{F}{Dh}$	$\tau_4 = \frac{2M_t}{D_k^2 \pi v}$

3.26. ábra Próbatestek valamint csúsztató feszültségeik meghatározásának összefüggései [15]

Mindezek előrebocsátásával áttekintjük a modellezési eljárás repedéscsúcs környezetének vizsgálatát transzmissziós optikai feszültségvizsgálat alkalmazásával. Az előzőekben bemutatott törésmechanikai alapok ismeretében egy repedéscsúcs feszültségállapotát a nyitó irányú, valamint a csúsztató igénybevételek esetére a 3.27. ábra mutatja.



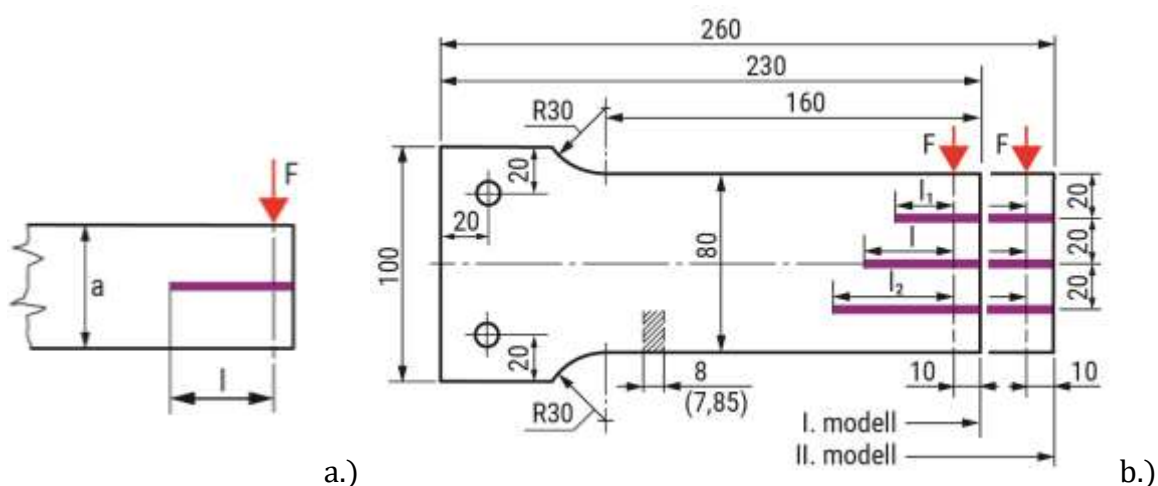
$K_I = \sigma_{y0} \sqrt{a\pi}$
 $K_{II} = \tau_{xy0} \sqrt{a\pi}$

Feszültség komponensek	I. 	II. 
σ_x	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} [2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}]$
σ_y	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$
τ_{xy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}]$
σ_r	$\frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} (3 - \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2}$	$\frac{K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} (3 \cos \theta - 1) \sin \frac{\theta}{2}$
σ_θ	$\frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} (1 + \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2}$	$\frac{K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} 3 \sin \theta \cdot \cos \frac{\theta}{2}$
$\tau_{r\theta}$	$\frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} \sin \theta \cdot \cos \frac{\theta}{2}$	$\frac{K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} (3 \cos \theta - 1) \cos \frac{\theta}{2}$

3.27. ábra Repedéscsúcs feszültségállapota az I. valamint II. törési mód esetén [15]

A 3.27. ábra alapján láthatjuk, hogy az intenzitási tényezők a csúcs környéki feszültségi állapotnak, valamint a csúcs geometria méretének a függvénye. Ezt az egyszerű összefüggést tudjuk felhasználni a „láthatóvá tett” feszültségi állapot meghatározásával.

Az eljárás során modellezzük a repedést egy próbatestben (természetesen lehet szó egyszerre több repedés vizsgálatáról is), majd a próbatestet terheljük, és rögzítjük a kialakuló rendszámeloszlást. A 3.28. ábrán az előrepszett próbatestek geometriai adatait, valamint terhelésüket mutatjuk be.



3.28. ábra Előrepszett próbatestek geometriai adatai nyitó igénybevételű intenzitási tényező meghatározásához - K_{IC} ,

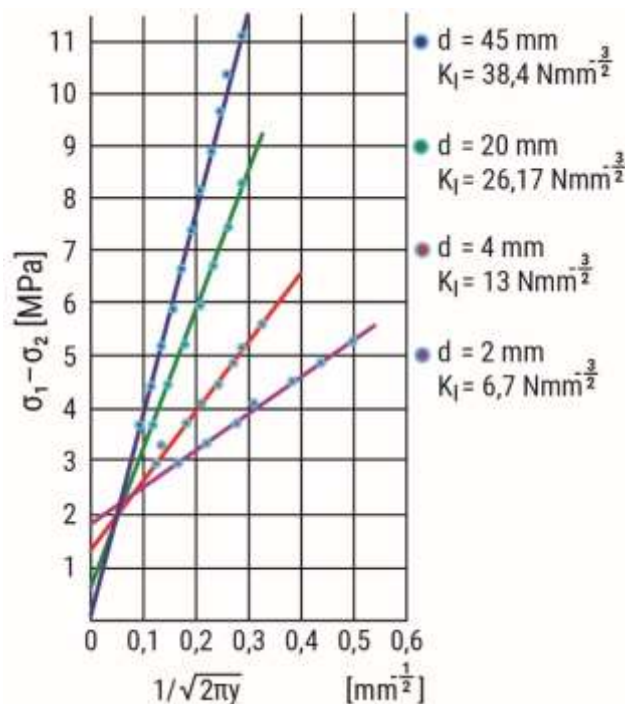
a.) egy előrepszett repedés, b.) három előrepszett repedés [18]

A próbatest repedés környezetét geometriai hálózattal láttuk el, a kialakuló rendszámok rögzítéséhez és azonosíthatóságához. Az így elkészített próbatest terhelésekor kialakuló rendszámeloszlásokat keresztezett polarizátor állásban a 3.29. ábra mutatja.



3.29. ábra Előrepeesztett próbatest egész számú rendszámeloszlása [18]

A próbatest terhelését videó kamerával – ha módunkban áll, gyorskamerával – rögzítjük, egészen a vizsgálati minta tönkremeneteléig. Miután a törés pillanatában kialakult feszültségállapotra az abban a pillanatban mérhető rendszámeloszlás a jellemző (ennél nagyobb intenzitási tényező nincs, hiszen nagyobb terhelésnél már a próbatest sértetlensége megszűnt), nem kell mást tennünk, mint visszakeresni a videó felvételeken éppen a törés pillanatában észlelhető rendszámeloszlást. Az ebben a pillanatban kiértékelt intenzitási tényező – a repedés menti rendszámokból felrajzolt egyenes iránytangense – az adott geometria kritikus intenzitási tényezője. Ez egy rendkívül költséghatékony eljárás, az előfárasztott majd a tönkremenetelhez szükséges törést okozó erő mérésén alapuló irodalmi adatokkal összevetve azokkal magas konfidencia szinten megegyező eredményeket biztosító vizsgálati megoldás. Elkészítettük az egész és fél rendszámokról a polarizációs optikai felvételeket, amelyeket összeillesztve a 3.30. ábrán mutatunk be.



3.31. ábra Intenzitási tényező meghatározás a repedés menti feszültségeloszlás felrajzolásával [19]

A fentiekben bemutatott repedéscsúcs környezetében meghatározható feszültségintenzitási tényező optikai feszültségvizsgálat eljárásával történő mérése a gyakorlat szempontjából kimagasló jelentőségű. Nincs szükség igen költséges előterheléses vizsgálatra, majd az azt követő törési kísérletre. A modelltörvények alapján a geometriai és terhelési hasonlóságra alapozva a feltételezett – vagy valós – méretű repedés modellezésével gyors és egyszerű eljárásban meghatározható az intenzitási tényező, határhelyzetben (a törés pillanatában rögzített feszültségoptikai kép alapján) annak kritikus értéke. Ez az érték a repedés megindulásának feltétele, azaz a modelltörvények alkalmazásával a megfelelő terhelési feltételek beállításával a tönkremenetelt akár el is kerülhetjük.

3.3.2.6. Térbeli alkatrészek (3D) vizsgálati lehetősége átvilágító polarizáció eljárásával

Az átvilágító, azaz modellezési eljárás alkalmas háromdimenziós (3D) testek nyúlás- és feszültségviszonyainak meghatározására, abban az esetben, amennyiben a feladatot síkfeszültségi vizsgálatra vissza tudjuk vezetni. Ennek feltétele, hogy a vizsgált, átlátszó, optikailag aktív anyagból készített háromdimenziós alkatrészt megfelelő terhelő berendezésben a rá üzemszerűen jellemző módon terheljük, majd ezt az állapotot a vizsgált alkatrészben befagyasszuk. Ezt azt jelenti, hogy ha a terhelést megszüntetjük, az alkatrészben benne marad a terhelés hatására kialakult feszültség.

Az alkatrész megfelelő technikával elvégzett feldarabolását követően a szeletek síkfeszültségi vizsgálati eljárással kiértékelhetők.

Ennek a vizsgálati eljárásnak három sarkalatos kérdése van, úgymint:

- a megfelelő modell elkészítése,
- feszültségállapot alkatrészbe történő „befagyasztása”, majd
- a berendezésből kivett, a terhelésre adott választ magában foglaló alkatrész felszeletelése.

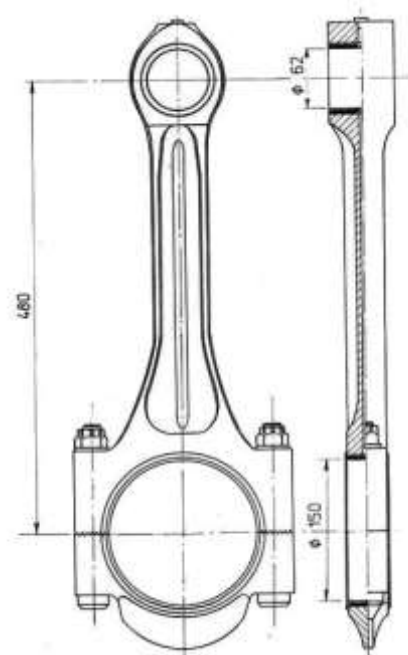
A modellkészítés megfelelő körültekintéssel, az erre alkalmas vizsgálati anyag öntőformába bejuttatásával oldható meg. A terhelő berendezésnek fűthetőnek kell lennie, mert a terhelés alatt levő alkatrészben így tudjuk megtartani a terhelés hatására létrejövő igénybevételeket. A lehűlés során a bevitt feszültségek megmaradnak. A megfelelő ideig végrehajtott eljárást követően, a berendezésből kivett alkatrész felszeletelése rendkívül körültekintő eljárásban lehetséges.

A szeletelés nem vihet be járulékos hőt, mert a hőhatás a „befagyott” feszültségi állapotot meghamisítja. Ezért – ha mechanikus szeletelést választunk – hűtött, igen kis vágási sebességgel rendelkező, megfelelő szabályozással ellátott berendezés szükséges a feladat megoldásához.

A következőkben egy belsőégésű motor alkatrész (hajtórúd) térbeli (3D) vizsgálatának menetét mutatjuk be [20] alapján.

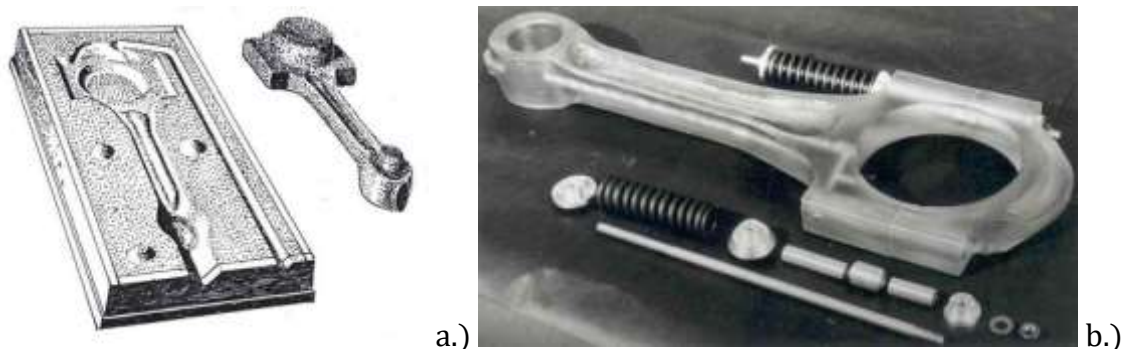
A vizsgálat célja a hajtórúd összefogó csavarjainak hatására, annak környezetében kialakuló feszültségállapot feltárása, majd a mérési eredmények alapján, - ha szükséges - a megfelelő geometriai módosítások elvégzése.

A vizsgált hajtórúd főbb geometriai méreteit a 3.32. ábrán adjuk közre.



3.32. ábra Térbeli (3D) vizsgálatra szánt alkatrész főbb geometriai méretei [20]

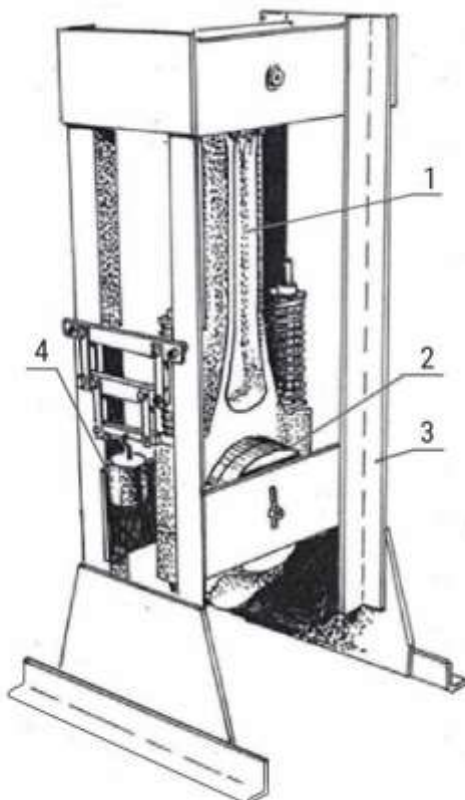
A modell elkészítéséhez használt öntőformát a vizsgálatra előkészített alkatrésszel és tartozékaival együtt a 3.33. ábrán láthatjuk.



3.33. ábra Hajtórúd modell öntőformája a.), és az elkészült modell b.) [20]

A 3.33. ábrán látható, hogy a hajtórúd fej rögzítésére szolgáló csavarkapcsolat által kifejtett erő létrehozását csavarrugók alkalmazásával oldották meg. A hajtórúd főcsapon keresztüli terhelése a terhelő keretben alkalmazott súlyterheléssel valósult meg (3.34. ábra).

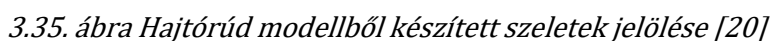
Az elkészített modellt terhelő berendezésben hőkezelték, az un. „befagyasztási” eljárás megvalósítása érdekében. A „feszültségeket befagyasztó” berendezésről készült perspektivikus ábra a 3.34. ábrán látható.



1 - vizsgált hajtórúd, 2 - befogó főcsap, 3 - terhelő keret, 4 - súlyterhelés

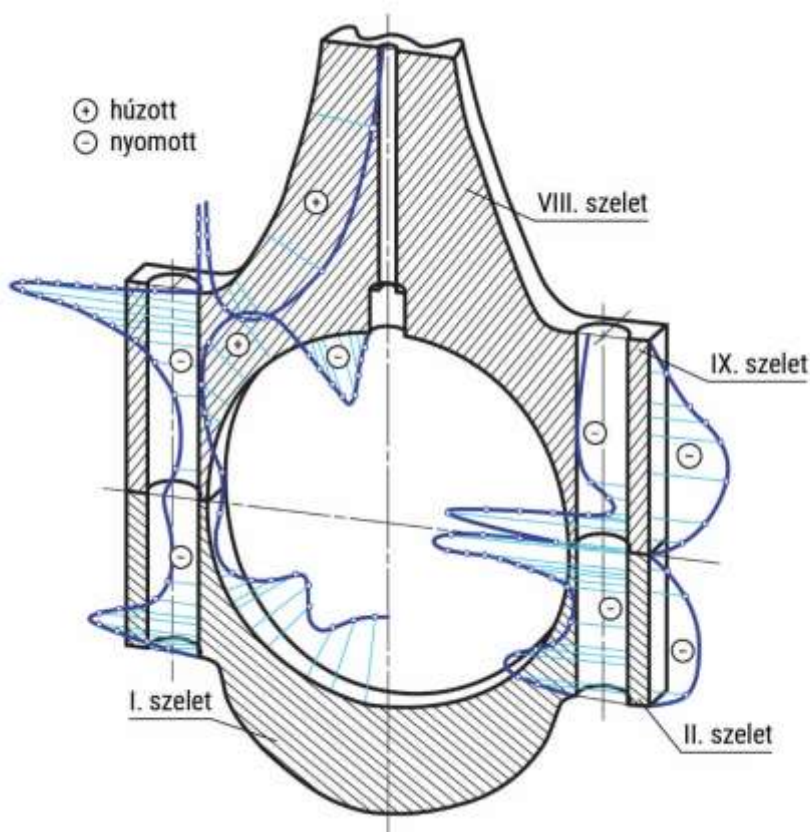
3.34. ábra Hőkezelő terhelő készülék a „befagyasztás” megvalósítására [20]

A hajtórúd modellből készített szeleteket a 3.35. ábra mutatja.



44

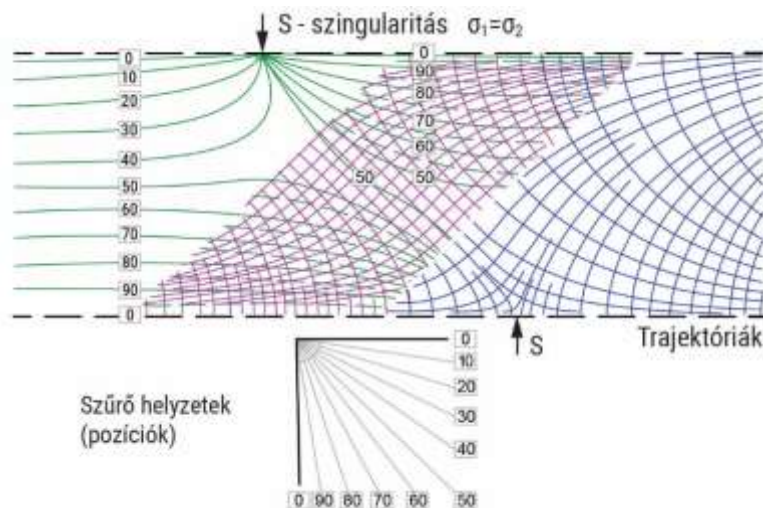
Az egyes szeletekről (3.35. ábra) elkészített, majd összerajzolt, az alkatrész peremei mentén kiértékelt feszültségeloszlásra példát a 3.37. ábra mutat [20]. Az ábrán láthatók azok a szeletek, amelyekből a peremek mentén a feszültségeloszlásokat meghatároztuk.



3.37. ábra Hajtórúdfej szeleteken mért, az alkatrész peremei mentén összerajzolt feszültségeloszlások [20]

3.3.2.7. Az iránysvávok (izoklínák), és a trajektória hálózat képeinek kiértékelése

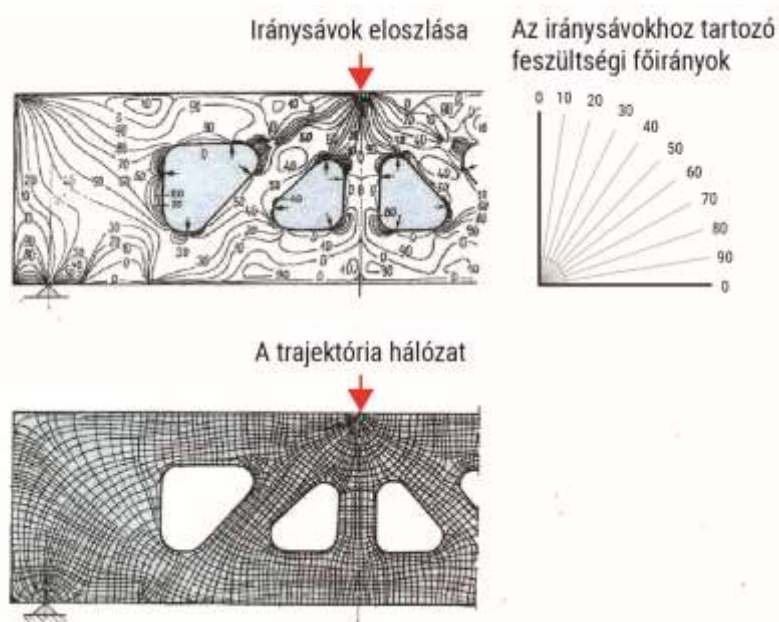
A terhelés hatására kialakuló sávrendszert a rendszámok (izokromáták) képviselik. Amennyiben a berendezésünk negyedhullám lemezeket is tartalmaz, lehetőségünk van a modellben kialakuló deformáció- és feszültségvektorok irányainak a meghatározására. Ehhez nem kell mást tennünk, mint a polarizációs szűrők keresztezett állásában együttesen elforgatni azokat, és a szűrő elforgatásával vándorló sávrendszert felrajzolni, majd a kezdeti kiindulási helyzettől mért szöghelyezettel rögzíteni. A szöghelyzetek meghatározása 0-100 osztású skálán történik. Az iránysvávok felrajzolásának menetét külső erővel terhelt hajlított tartóra a 3.38. ábrán mutatjuk be. Az ábrában a polarizációs szöghelyzetet az észlelt sávra felrajzolva láthatjuk.



3.38. ábra Iránysávok felrajzolásának menete a polarizációs szűrők együttes forgatásával, azok szöghelyzetéhez rögzítésével [15]

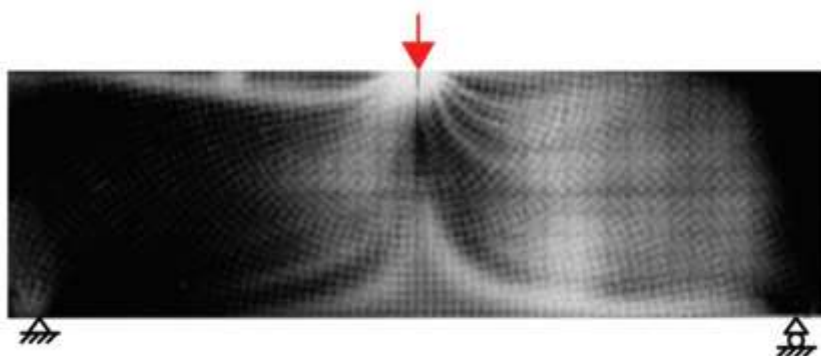
Az ábra közepétől kezdődően annak jobboldali területén minden szomszédos irány-sáv közé húzott felező vonalra (szaggatott vonal) merőlegest állítva kapjuk a trajektória hálózatot. Ennek a sávrendszernek bármely pontjában húzott érintő és az arra merőleges vektor mutatja a deformáció és feszültségvektorok irányait.

A 3.14. ábrán bemutatott kivágásokkal gyengített hajlított tartó (hárompontos hajlítás) rendszámeloszlása látható. Ugyanezen tartó irány-sáv ábrája, valamint az ezekből rajzolt trajektória hálózata a 3.39. ábrán látható.



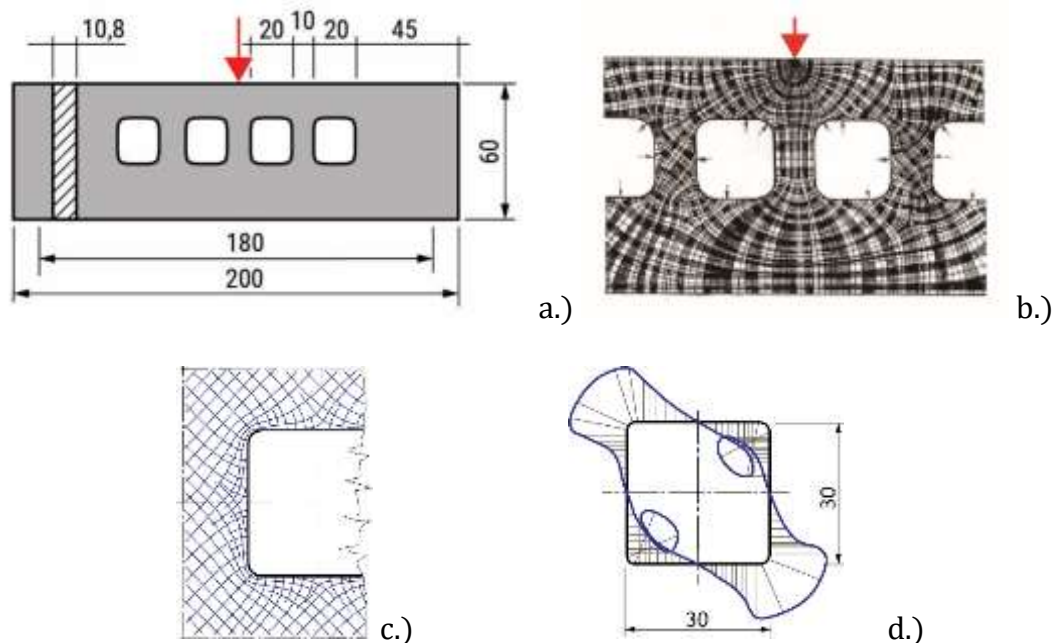
3.39. ábra Kivágásokkal gyengített hajlított tartó (hárompontos hajlítás) irány-sávjai, valamint trajektória hálózata [21]

Egy hárompontos hajlított tartó kézzel rajzolt trajektória hálózatát a 3.40. ábrán mutatjuk be.



3.40. ábra Hajlított tartó trajektória hálózata [21]

Mit is jelentenek a trajektória vonalak a tervező számára, aki az alakadás fázisában például egy modellkísérleten kívánja ellenőrizni az általa tervezett alkatrész feltételezett viselkedését feszültségeloszlás szempontjából? Nos, a legegyszerűbben az áramlástani analógiával lehet szemléltetni a trajektóriák szerepét az alábbiak szerint: amennyiben a trajektóriák hirtelen irányt váltanak, ott biztosan keresztmetszet változást tapasztalunk. Amennyiben a sűrűségük is megváltozik, ott hasonlóan az előzőekhez, megváltozik a szerkezet keresztmetszete. Az analógia folyadék áramlásával azonos: kisebb keresztmetszeten a folyadék nagyobb sebességgel halad át (feltételezve az anyag összenyomhatatlanságát), azaz ott feszültség növekedést fogunk tapasztalni. Hasonlóan feszültségkoncentrációs helyet találunk ott, ahol a trajektóriák kis helyre koncentrálódnak, feltehetően erőbevezetési környezetben vizsgálódunk.



3.41. ábra Ablakkal gyengített magas tartó kivágásának feszültségeloszlása trajektóriák alapján [21]

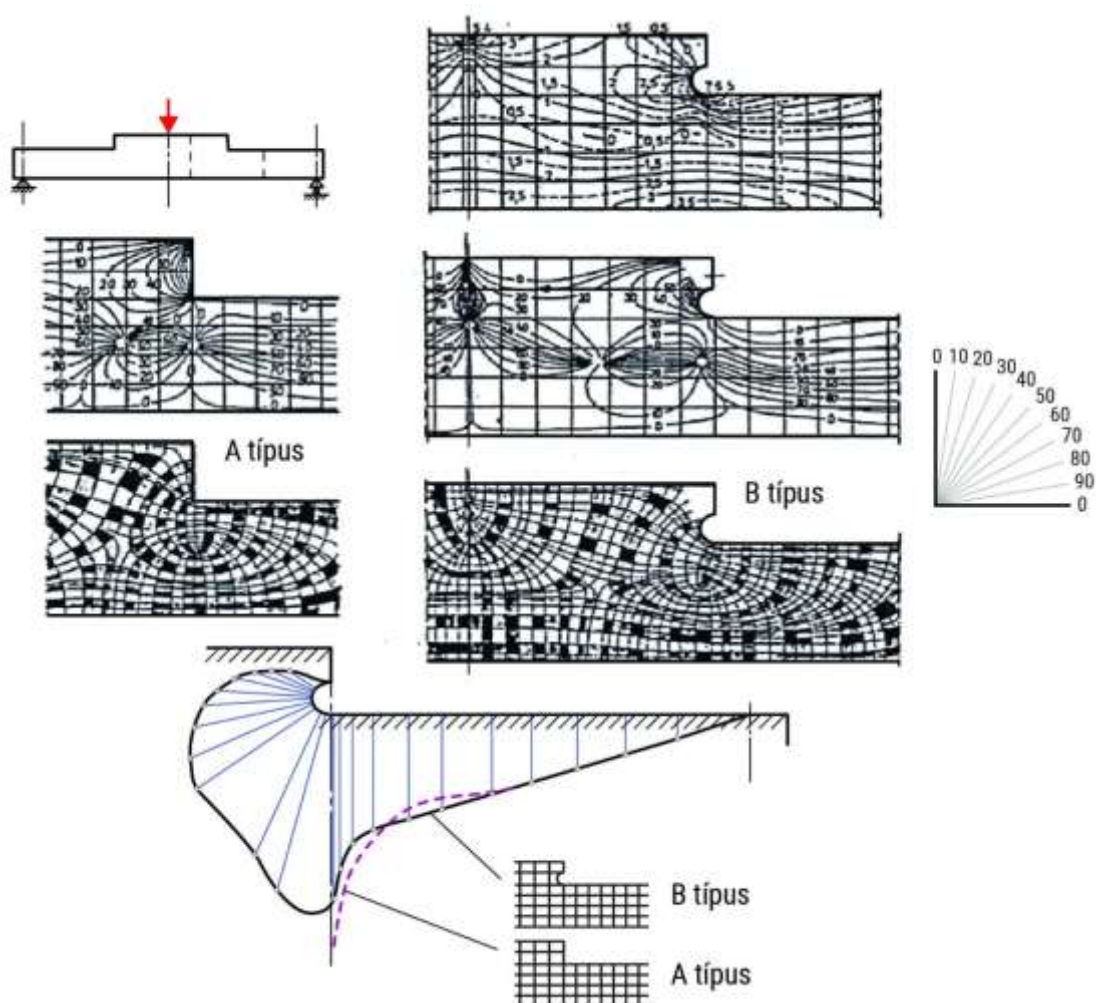
a.) hajlított tartó magas kivágásokkal, b.) trajektóriák a kivágások környezetében, c.) trajektóriák a kivágás sarokpontjaiban, d.) kivágás peremének feszültségeloszlása

Az itt leírtak alapján egyszerű eszközzel lehetőségünk van a vizsgált alkatrész feszültség lefutásainak ellenőrzésére és amennyiben szükséges a módosításokra.

A 3.41. ábra példája egy magas, ablakkal gyengített, hajlított tartó trajektóriáit valamint az ablak kivágások környezetének hatásait szemlélteti [21]. A példa alapján az ablakkivágás alakjának módosításával a tartó feszültségeloszlása javítható (pl. 3.39. ábrán bemutatott elrendezésre).

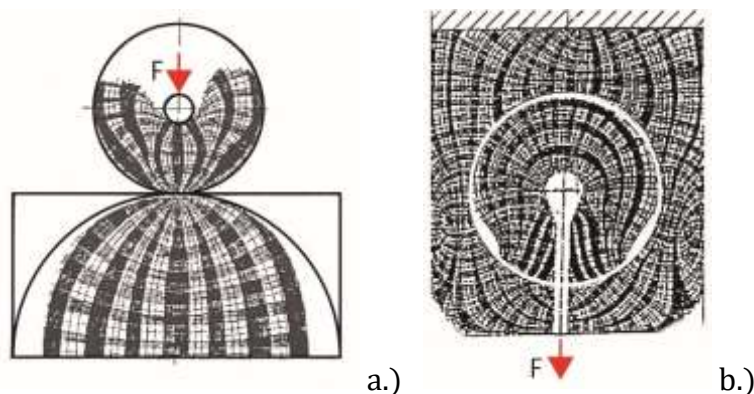
Az alakadás folyamatának trajektóriák használatával történő lépéseit követhetjük nyomon a 3.42. ábrán. A hajlított, lépcsős tartó keresztmetszeti átmenetének módosítására a trajektóriák vizsgálata adott lehetőséget az átmenet részletes elemzésével.

Az eredeti és a módosított geometriájú tartó keresztmetszet átmenetének vizsgálatát a 3.42. ábra mutatja [21]. Érdekes megfigyelni, hogy a „B” megoldás nem egyszerűen egy sugár méretének a megváltoztatásán alapul, hanem az átmenet alakjának újragondolásával, a felület megnövelésével adódik mód egy kedvezőbb feszültség átmenet kialakítására.



3.42. ábra Lépcsős, hajlított tartó keresztmetszet átmenetének elemzése trajektóriák alapján [21]

Az érintkezési feladatok vizsgálata a numerikus számítások, valamint a kísérleti eljárások számára is kihívást jelent. Itt elsősorban arra kell törekedni, hogy az érintkezéskor kialakuló Hertz-féle feszültséget elkerüljük ha erre konstrukciós megoldás lehetőséget biztosít. Ebben a témában is lehetőségünk van trajektóriák vizsgálatával elemezni a terhelési viszonyokat, amelyre példát a 3.43. ábrán mutatunk [21]. Az egy pontban sűrűsödő trajektóriák igen magas koncentrációt jelentenek. A trajektóriák ábrázolásával az érintkezési feladatot megoszló erőrendszerre változtatva egy lényegesen kedvezőbb terhelés eloszlást lehetett megvalósítani [15].



3.43. ábra Érintkezési feladat megoldása trajektóriák vizsgálatával
a.) vonalmenti terhelés esetén, b.) megoszló erőrendszer esetén [21]

3.3.2.8. Az optikai feszültségvizsgálat képeinek teljes kiértékelése numerikus integrálással

Az előzőekben a rendszámeloszlások peremek menti értékelésével, valamint a trajektória hálózatok alakadásban történő felhasználhatóságával foglalkoztunk.

A konstrukció megítélésének, feszültségtorlódások elkerülésének, alak-optimalizálásnak, tömegcsökkentés megvalósításának a mérnöki gyakorlat igen nagy hányadában a fentiekben leírtak alapján elvégzett vizsgálatok megfelelnek. Ugyanakkor előadódhat, hogy un. teljes kiértékelést kell végezzünk, ami azt jelenti, hogy pl. a vizsgált szerkezet adott geometriai vonala mentén szükségünk van a deformáció illetve a feszültség pontról pontra változásának az ismeretére.

Azok az eljárások, amelyek az optikai feszültségvizsgálat adta sávrendszerek felhasználásával a teljes kiértékelés lehetőségét biztosítják, a numerikus integrálás módszerei közé tartoznak.

Példaként vázlatosan egy ismert, un. Frocht-módszer lépéseit mutatjuk be a következőkben [2]. Az egyensúlyi egyenletek differenciális felírásával a vizsgált modell egyes keresztmetszetei mentén a peremektől kiindulva és peremre érve meghatározhatjuk a főfeszültségek értékeit. A derékszögű koordináta rendszerben végrehajtott integrálás a Frocht-módszer [2].

A modellen kiválasztunk két pontot, a határfelületeken (pl. legyen „O” és „P”), melyek közt az integrálást végrehajtjuk az alábbiak szerint [2].

Az elemi hasábra felírható differenciálegyenlet [2] alapján (14) és (15) szerint:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

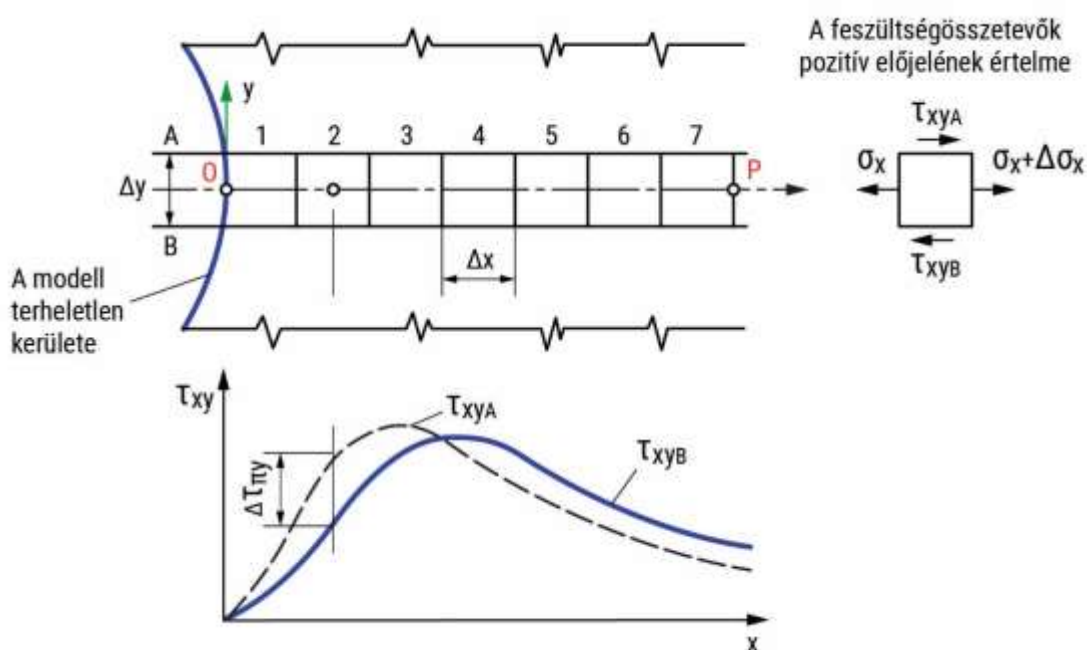
A (14) összefüggést x szerint a két kiválasztott pont („O” és „P”) között határozott integrállal kapjuk (16):

$$\sigma_{xP} - \sigma_{xO} = - \int_O^P \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \quad (16)$$

Amennyiben egy olyan hálózatot rajzolunk fel a kiválasztott két pont között (3.44. ábra szerint), melynek Δx és Δy oldalhosszúságai azonosak, az egyszerűsítéseket követően az alábbi összefüggést kapjuk [2]:

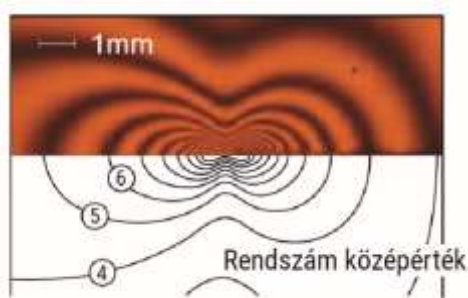
$$\sigma_{xP} = - \sum_{k=1}^n (\Delta \tau_{xy})_k \quad (17)$$

A szerkesztés menetét a 3.44. ábra szemlélteti.



3.44. ábra Numerikus integrálás lépései (Frocht-féle integrálás) [2]

A rendszámok középvonalának meghatározásához a 3.45. ábra ad útmutatást.



3.45. ábra Rendszám középérték meghatározása egyszínű azaz monokromatikus fényforrás alkalmazása esetén [22]

A módszer alkalmazásával a feszültségeloszlás a kiválasztott peremek között, a kiértékelő egyenes mentén meghatározható, lásd 3.44. ábra 'O-P' szakaszát.

A gyakorlat számára fontos megjegyeznünk, hogy erre a fajta, meglehetősen hosszadalmas, ugyanakkor fokozott figyelmet igénylő eljárás használatára csak a vizsgálati esetek igen kis százalékában jelentkezik igény. Elérhetőek számítógépes programok is az egyensúlyi egyenletek integrálásának gyors és hatékony alkalmazására.

3.4. Reflexió – aktív rétegbevonatos, visszavert fényes – optikai feszültségvizsgálat

A tényleges szerkezetek nyúlás- és feszültségviszonyainak meghatározására használt eljárás során optikailag átlátszó és aktív, homogén, izotróp rétegbevonati anyagot ragasztunk a vizsgálni kívánt alkatrész felszínére. A felragasztott vizsgálóréteg a terhelt alkatrész felszíni nyúlásait követi, mely jelenség tehát 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 analízátor - a tárgy és a megfigyelő között) alkalmazásával meghatározhatók a színsáv rendszámok (m). Amennyiben a vizsgáló berendezés negyedhullám lemezeket is tartalmaz, használatukkal mód nyílik az irányítók felvételére is [1].

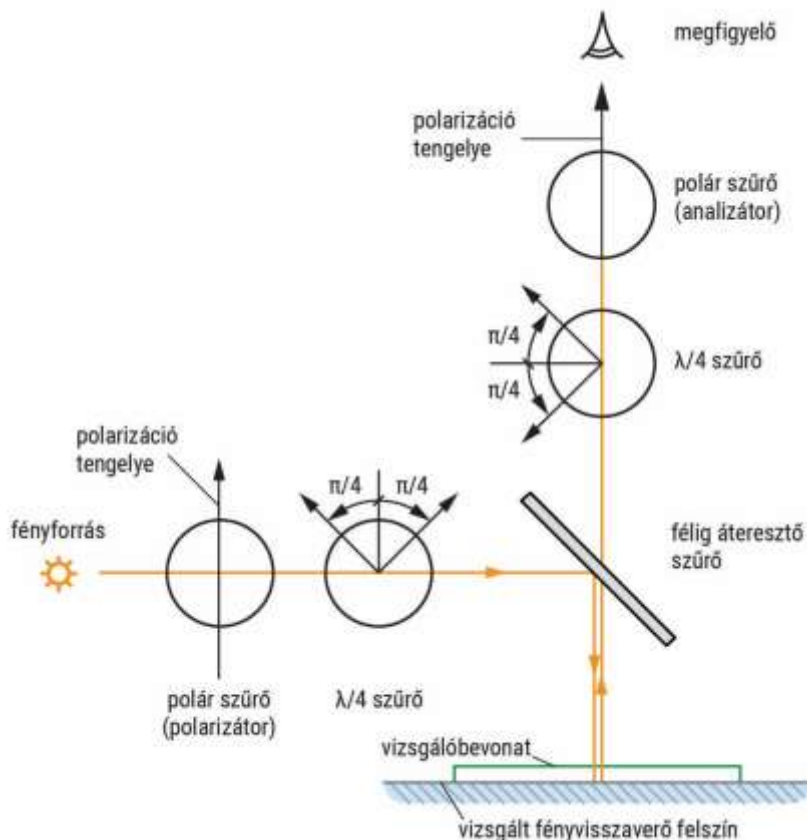
A rétegbevonatos optikai feszültségmérés eljárásának alkalmazására tett első kísérletek az 1900-as évek elejére tehetőek. A teljesség igénye nélkül a kezdeti kísérletek közül a legjelentősebbeket [1] kiemelve megállapítható, a készülékek a hagyományos polarizációs optikai berendezések elvi felépítését követve épültek, azzal a különbséggel, hogy – tekintettel a vizsgált tárgy felszínéről visszavert fénymenet útjára – a vizsgálatra használt szűrő párt egymás mellé helyezték el a készülékükben.

A készülékek fényforrása általában valamilyen fehér fényt biztosító izzó, esetleg valamilyen jellegzetes monokromatikus hullámhosszon működő (pl. nátrium) megvilágító berendezés.

A mérési eredmények kezdeti értékelése általában a két polarizációs szűrő által biztosított információ alapján [1]. Az 1950-es évek közepétől általánossá vált a negyedhullám szűrő párok alkalmazása is, amelyek lehetőséget biztosítanak az irányítók, valamint a trajektória hálózatok felrajzolására [23], ezáltal a szükséges konstrukciós módosítások viszonylag könnyű végrehajtására.

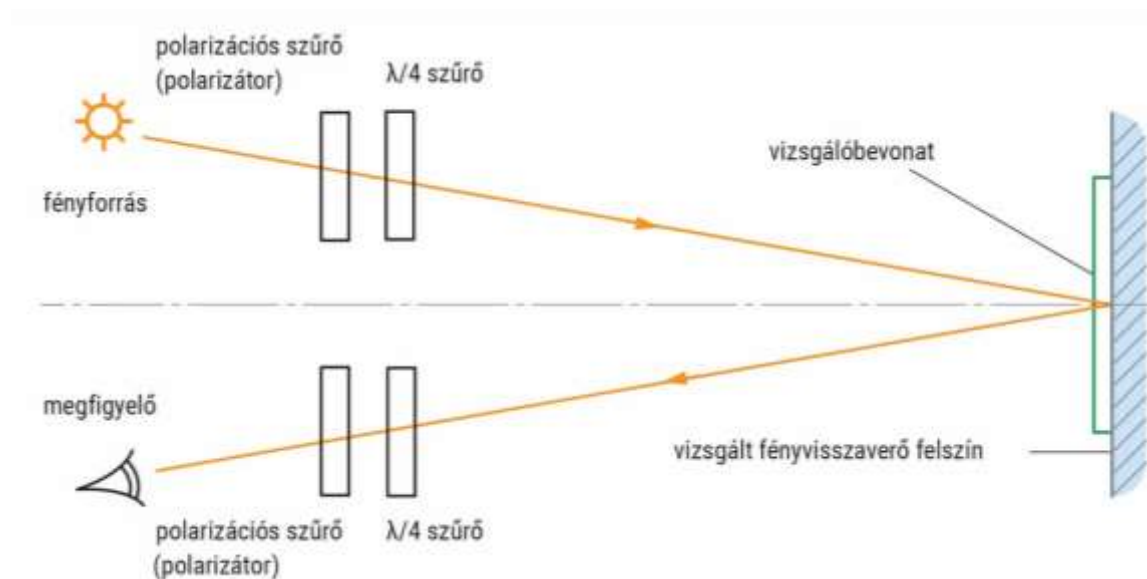
Az 1960-as, 70-es években két jellegzetesen megkülönböztethető irányban fejlődtek a berendezések. Az egyik fő irányvonal a megvilágító fényforrások változtatására irányult. Elsődlegesen az ekkorra már igen jelentős fejlődésen átesett lézer fényforrások alkalmazására tett kísérleteket lehet említeni [24], [25], amelyek részben kapcsolatba hozhatók a módszer dinamikus folyamatok mérésére való alkalmasságát tett lépésekkel. Ebben az időben mutatkozott egyre markánsabb igény – a számítástechnika rohamos fejlődésének kezdeti szakaszában – a mérési módszer eredményeinek részbeni, vagy teljes automatizálására, melyek közül néhányra a következő irodalmakban találunk példát [26], [27].

A reflexiós polarizációs optikai berendezés egy lehetséges elvi összeállítását a 3.46. ábrán adjuk közre.



3.46. ábra Reflexiós polarizációs optikai berendezés elvi összeállítása [1]

A gyakorlatban leginkább elterjedt jellegzetes polarizációs optikai sugármenetet a 3.47. ábra mutatja.

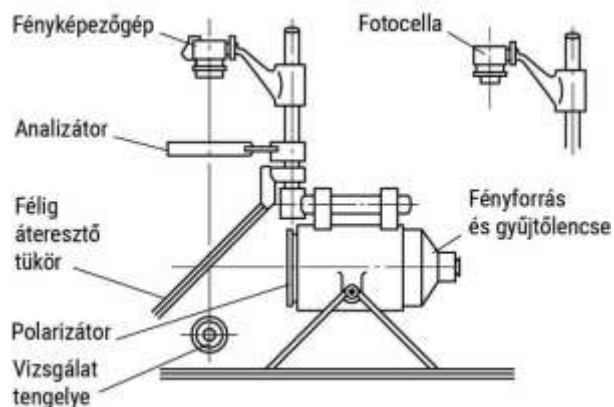


3.47. ábra Reflexiós polarizációs optikai berendezés gyakorlatban elterjedt összeállítása [1]

A szokásosan alkalmazott vizsgáló berendezések alapkivitelben (a reflexiós polarizáskópok) 2 db egymás mellett elhelyezett, egyenként mintegy 100 mm átmérőjű polarizációs szűrőből (szűrőpárból) állnak, (természetesen megfelelő tartószerkezetben rögzítve) [1]. Megvilágító fényforrásuk általában valamely kevert (fehér) fényt biztosító izzólámpa.

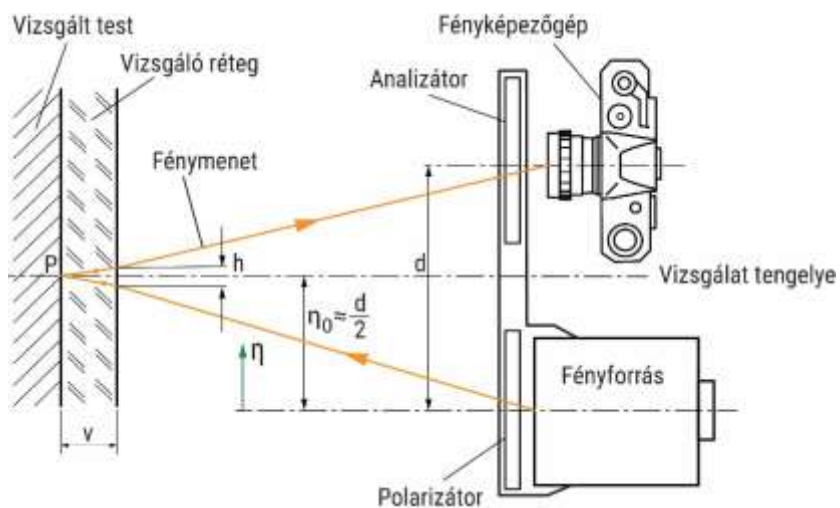
3.4.1. Reflexiós polarizációs optikai vizsgálat berendezései

Az 1990-es évektől számíthatóan – minekután az elmélet-mérés kérdésének vitája lezártnak tekinthető a hibrid módszernek a problémamegoldásban általánosan elfogadottá vált alkalmazásával – ismét több szó esett egyes feszültségoptikai kísérleti berendezések fejlesztéséről. Ezt alátámasztja és a folyamat kiteljesedéséhez nagymértékben hozzájárult, hogy a gyártással foglalkozó multinacionális vállalatoknál a kísérleti munka lényegében soha sem vesztette el jelentőségét legfeljebb a műszaki közvélemény az elvégzett kísérletek szigorúan védett jellege miatt erről nem, vagy csak kerülő úton ([1] alapján), és később szerzett tudomást pl. [28]. A következőkben áttekintjük azokat a berendezéseket, melyeket a gyakorlatban, számos intézetben, kutatóhelyen, multinacionális vállalatok fejlesztő laboratóriumaiban alkalmaznak. A 3.48. ábra egy félig áteresztő tükrös, elsősorban laboratóriumi felhasználásra készített berendezés felépítését mutatja ([1] alapján).

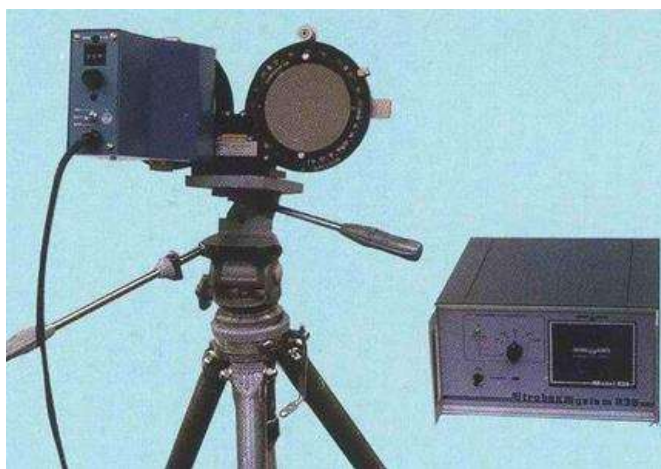


3.48. ábra Félig áteresztő tükrös fénymenet elve alapján működő (Kaifás féle) berendezés elrendezési vázlata [29]

Az egymás mellett elhelyezkedő szűrős megoldásra – amely közel párhuzamos fénymenetet biztosít – a 3.49. ábra mutat példát.



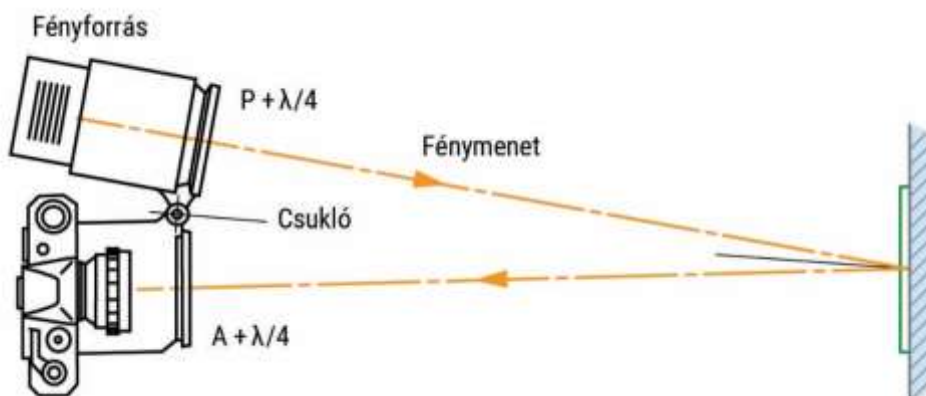
a.)



b.)

3.49. ábra Közel párhuzamos sugármenetet megvalósító készülék
a.) egyszerű kivitel (csak polarizációs szűrőt tartalmaz), és
b.) létező kivitel, Vishay, stroboszkóp lámpával ellátott fényforrással [1]

A 3.49. ábrán látható készülék egy továbbfejlesztett, állítható polarizációs tengelyeket megvalósító összeállítását a 3.50. ábra mutatja.



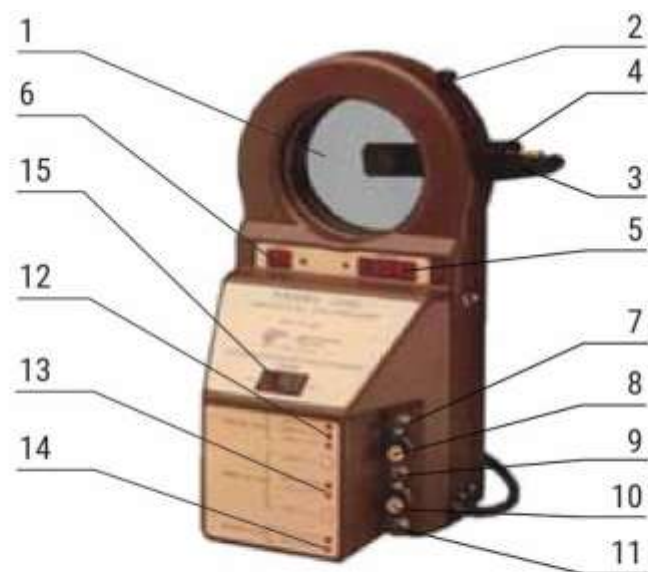
3.50. ábra Schwieger-féle, a készülék optikai tengelyéhez képest állítható polarizációs tengelyekkel [1]

A Schwieger-féle (3.49. ábra) készülékhez hasonló elven működő berendezésre hazai tervezésben és kivitelezésben is találunk példát. A BME Acélszerkezetek Tanszékének munkatársai, Nagy Dezső és Szittner Antal által tervezett, a Tanszék saját kivitelezésében (1970) megvalósított (Garas Pál és Nagy Zsigmond műszerészek munkája) szórt fényű reflexiós polariszkópról készült felvétel a 3.51. ábrán látható. A készülék negyedhullám lemezeket is tartalmazott.



3.51. ábra Szórt fényű reflexiós polariszkóp (Nagy-Szittner-féle) [1]

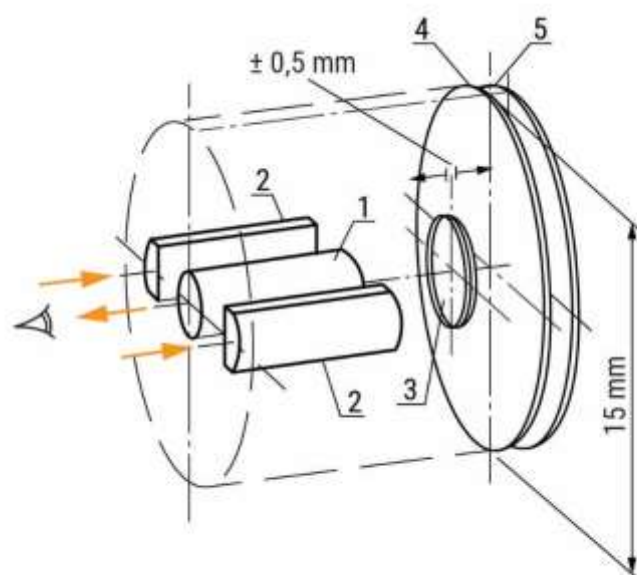
A kísérleti berendezéseket forgalmazók a piacot folyamatosan tájékoztatták újdonságaikról, melyek mind többet tudó és bonyolultabb kiegészítőket kínáltak a már eladott készülékekhez. Példának a feszültségoptikai mérőberendezések területén vezető pozícióval rendelkező Vishay ide vonatkozó bulletinjét hivatkozzuk [30], amely bemutatja az egyszerű polariszkóp kompenzátorához illeszthető digitális kijelzőt (3.52. ábra), sőt számítógéphez is és nyomtatóhoz is csatlakoztatható.



1 - polarizációs szűrők, 2 - irányítás-rendszer átkapcsoló,
3 - polarizációs szűrőhelyzet váltó, 4 - kompenzátor, 5 - színsáv rendszám érték kijelzője,
6 - irányítás szögjelzője, 7, 9, 11 - fényforrás kapcsolók,
8, 10 - fényforrás visszajelzők, 12, 13, 14 - szűrőhelyzet visszajelzők, 15 - főkapcsoló

3.52. ábra Vishay digitális kijelzésű reflexiós polariszkópja [1]

A reflexiós polarizációs optikai berendezés méreteinek csökkentése irányában jelentkező elképzeléseket az irodalomban első alkalommal 1990-ben leltük fel [31]. Az itt hivatkozott Jacek Stupnicki lengyel professzor munkájaként 1990-ben jelent meg írásban a XIV. Lengyel Feszültségmérő Kongresszuson, Varsóban. A készülék elrendezési vázlatát a 3.53. ábrán látható.



1 - képtovábbító köteg, 2 - fénytovábbító köteg szegmensek,
3 - lencse, 4 - polarizátor, 5 - analízátor

3.53. ábra Stupnicky-féle mini polariszkóp elrendezési vázlatát [1]

Száloptikához kötve, rendkívül kis befoglaló méretekkel megvalósítva (külső átmérő 50 mm), mechanikus távirányítóval forgatható 10 mm-es polarizációs szűrőkkel, és negyedhullám lemezekkel is felszerelt készüléket a szerző (Borbás) munkájában [1], összeállításában a 3.54. ábrán adjuk közre.



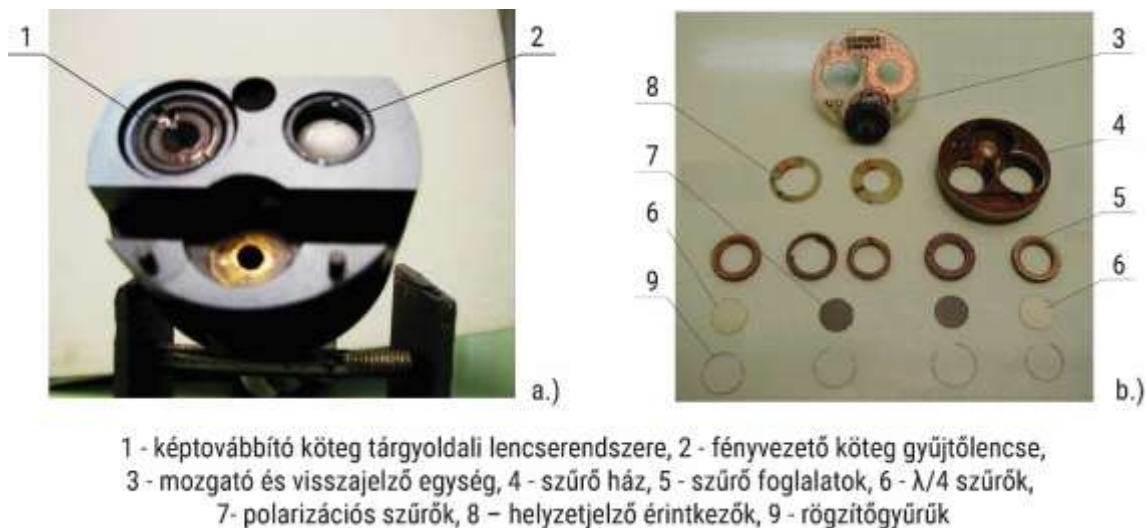
3.54. ábra Száloptikás mini polariszkóp alap összeállítása [1]

A mini polariszkóp szerelt részegységeit a 3.55. ábrán láthatjuk.



3.55. ábra Mini polariszkóp szerelt részegységei [1]

A száloptikás mini polariszkóp mérőfejét, annak belső szerkezetét a 3.56. ábrán láthatjuk.



3.56. ábra Száloptikás mini polariszkóp mérője [1]

Fenti a.) jelű részábrán a száloptika fegyverzeteket rögzítő tömb figyelhető meg a száloptika végekhez illesztett lencserendszerrel, a b.) jelű részábrán pedig a mini polariszkóp mérőfejének szűrőrendszere a szűrőket forgató fogaskerék-hajtással.

3.4.2. Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat mérőbevonata

A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat az átvilágítás, modellezési módszerhez képest számos új lehetőséget biztosít a felhasználó számára. Nincs szükség modelltörvények használatára az eredmények valóságra történő átszámításakor, hiszen a mérés a tényleges szerkezeti elemen történik. A mérés azonnal mutatja a nyúlás- és feszültségeloszlást a szerkezeten, valós terhelések esetén, statikus és dinamikus vizsgálatoknál egyaránt. A szerkezetek alakjának, kialakításának feszültségeloszlásra gyakorolt hatása azonnal látható és értékelhető, az egyes módosítások hatása közvetlenül nyomon követhető. A különböző, egymásra épülő hatások (különböző terhelések szuperpozíciója pl. szerelési, üzemi teher) egyszerűen láthatók, a meghibásodás oka könnyebben meghatározható.

A módszer a prototípus korai fázisában már alkalmazható, így a szükséges módosításokat a mérési eredmények alapján a tervezésben is időben érvényesíthetjük. Az eljárás egyik legfontosabb eredménye, hogy a kapott interferencia képek – melyek egyfajta redukált feszültségi eredményt tükröznek – könnyen összevethetők a numerikus szimulációk eredményeivel, valamint azok peremfeltételeinek meghatározásakor könnyen alkalmazhatók (FEM, FEMAP, ...).

Mint a rétegbevonatos vizsgálati eljárás gyakorlatban használt készülékének alap összeállításából láthatjuk (3.49. ábra), a vizsgálat során a polarizált fénysugárnak „látnia” kell a vizsgált felszínt. A fénymenet az itt bemutatott eljárásnál nem tökéletesen merőlegesen jut el a vizsgált felületre, úgy a beesés, mint a visszaverődés esetén. Ez a jelenség számos, a kiértékelésnél figyelembe veendő járulékos hatást eredményez, melynek elméleti kezelése sem mindig egyszerű. Mindezen kedvezőtlen hatások csökkentésére, valamint a megvilágító fénysugár számára be nem látható területek (alakos gépelemek felszínei, zárt, belső területek vizsgálata, melyek előzetesen vizsgálatra alkalmassá tehetők, de később nem megvilágíthatók közvetlenül) vizsgálati lehetőségének biztosítására született meg a száloptikás mini polarizskóp, mely berendezés mérés összeállítását a 3.54. ábrán mutattuk be.

3.4.2.1. Mérőbevonat készítése

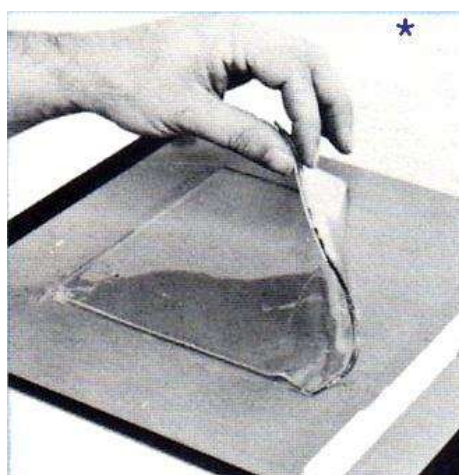
Az eljárás egyik legfontosabb eleme a megfelelő, optikailag aktív mérőbevonat elkészítése. Míg a modellezés során elkészítjük a síkfeszültségi vizsgálatra alkalmas tárgyat amit megterhelünk a berendezésben, addig esetünkben a vizsgált valós alkatrészt kell vizsgált felületén optikailag aktív bevonattal ellátni. A bevonat az alkatrész felszínére rögzítést – ragasztást - követően átveszi a felszín nyúlásait és a megfelelő vizsgálóberendezés alkalmazásával ezek a nyúlások megfigyelhetők.

Fontos eleme a vizsgálatnak, hogy a vastagság állandó legyen, hiszen a kettőstörés mértéke (érzékenység) a rétegvastagság függvénye. További lényeges feltétel, hogy a bevonat anyaga a vizsgált elem felszínének görbületeit tökéletesen kövesse.

A vizsgálati eljárás kétkomponensű műgyantát alkalmaz, melynek komponenseit a mérés megkezdése előtt elegyítve, megfelelően keverve vízszintes síkban beállított öntőtálcára öntjük, és hagyjuk polimerizálódni.



a.)



b.)

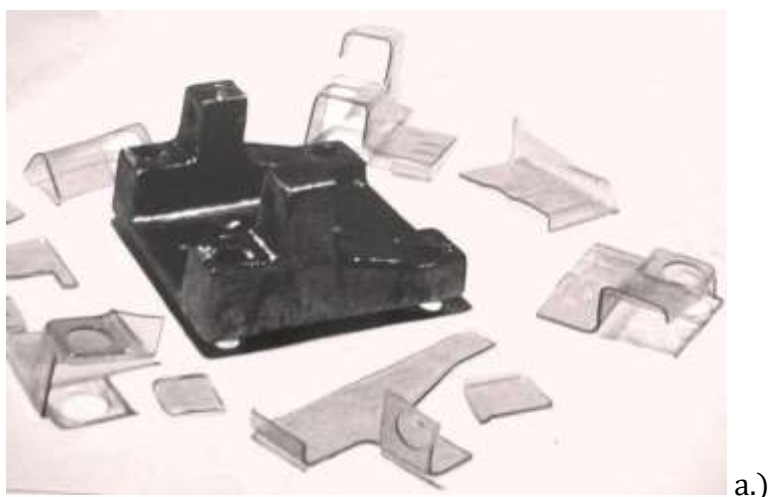
3.57. ábra Vizsgálóbevonat készítése

a.) vízszintezett öntőtálca, b.) félig polimerizált, formázásra kész bevonat [32]

A 3.57. ábra a vízszintbe állított – formaleválasztóval kezelt – öntőtálcát, mellette a megfelelő rétegvastagságú, részben polimerizált állapotban levő vizsgálóréteget mutatja a tálcáról felemelés pillanatában.

A vizsgálati eljárás alapértelmezett alkalmazásaként a tényleges alkatrész vizsgálni kívánt felszínére illesztjük a rétegbevonati anyagot, amely teljes polimerizációját az alkatrészre formázva fejezi be. Félig polimerizált állapotba (körülmények függvényeként: külső hőmérséklet, szükséges vastagsági méret, anyagösszetétel) a keverést követően mintegy 4 - 5 óra elteltével kerül a bevonati anyag. Ezt követően az öntőtálcáról levéve mintegy 20 perc áll rendelkezésre a formázásra. Ezen idő alatt az anyag „nem emlékezik” a geometriai változásokra, azaz felveszi a vizsgálati anyag felszíni adottságait.

Néhány, kézzel formázott bevonatot a 3.58. ábra mutat.



a.)



b.)

3.58. ábra Kézzel formázott bevonatok (a szerző munkáiból)

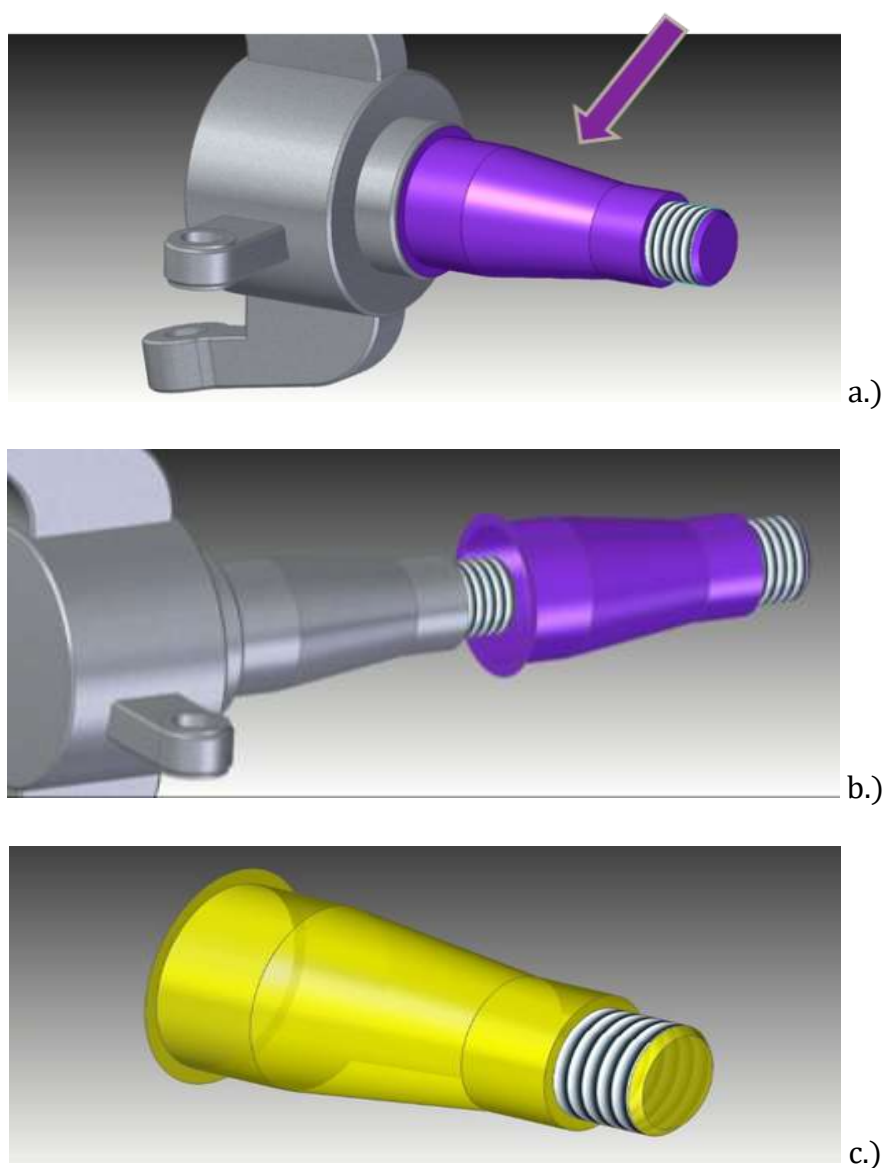
a.) bevonat szegmensek a vizsgálni kívánt alkatrésszel, b.) egyben alakított bevonatok

A formázást követően a teljesen polimerizált bevonat 24 óra elteltével levehető és egy tükrösítő anyagot tartalmazó – a bevonattal megegyező összetételű – ragasztóval a felületre rögzítjük.

3.4.2.2. Bevonat készítés additív gyártástechnológia alkalmazásával

Az additív gyártástechnológiák egy korszerűbb és gyorsabb lehetőséget biztosítanak a vizsgálat megvalósításában. Amennyiben ismerjük a vizsgálni kívánt alkatrész FEM, CAD modelljét, lehetőségünk van – felület húzással – a kívánt vastagságú bevonatot additív technológiával kinyomtatni. Természetesen a nyomtatni kívánt anyagnak áttetszőnek kell lennie valamint a feszültségoptikai vizsgálat szempontjából megfelelő érzékenységi mutatóval kell rendelkeznie. Az eljárás alkalmazására a 3.59. ábra mutat példát.

Természetesen az így megvalósított bevonatot is fel kell ragasztani a vizsgálandó felszínre, ezért a szegmentált nyomtatás szükséges.



3.59. ábra Optikailag aktív bevonat 3D nyomtatása ismert CAD modell geometria alapján
a.) vizsgálni kívánt terület, b.) az elhúzott felszín a szükséges bevonati vastagsággal,
c.) nyomtatott bevonat [33]

3.4.3. A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat eredményeinek kiértékelése

Adott m rendszámértékhez tartozó feszültségérték meghatározása:
Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat esetén a felszíni rétegben mért főnyúlások, valamint a főfeszültségek kapcsolatát az alábbi összefüggés adja meg:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1 + \nu} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = m \frac{kE}{1 + \nu} \quad (18)$$

ahol

σ_1 és σ_2 - a főfeszültségek,

ε_1 és ε_2 - a főnyúlások,

E - a vizsgált felület (alkatrész) anyagának rugalmassági modulusa,

ν - az alkatrész anyagának Poisson-tényezője, míg

k - az alkalmazott réteganyag érzékenységi mutatója (amely figyelembe veszi a réteganyag mérés technikai tulajdonságait, a megvilágító fény hullámhosszát, valamint a réteganyag vastagságát),

m - a vizsgált pontban észlelt színsáv rendszám értéke.

Ez az összefüggés (18) azonban - jól láthatóan - csak izotróp anyagok esetén érvényes. Ortotróp esetben viszont az anyagtulajdonságok több, irányfüggő anyagállandóval határozhatók meg, így mind az E rugalmassági modulus, mind pedig a ν Poisson-tényező iránytól függően több értékkel jellemezhető. Esetünkben a (18) összefüggésből kiindulva, azt az ortotróp anyagtulajdonságoknak megfelelően átalakítva tudjuk csak az adott - pl. $m = 1$ - rendszámértékhez tartozó feszültségértéket meghatározni. Az alkalmazott réteganyag érzékenységi mutatója a vizsgálóréteg anyagának kalibrálása alapján, $d = 1,6$ mm rétegvastagság esetén $k = 680 \mu\text{Strain}$ (azaz $0,68 \cdot 10^{-3}$ mm/mm) értékre adódott.

A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat alapösszefüggése szerint az érzékelt fajlagos nyúlás:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = m \cdot k \quad (19)$$

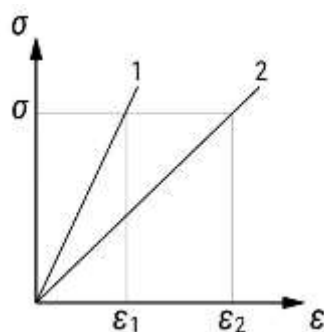
ahol

m - a vizsgált pontban észlelt színsáv rendszámértéke,

$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ - a vizsgált felszíni pont főnyúlásainak különbsége,

k - az alkalmazott réteganyag érzékenységi mutatója.

Mivel a különböző irányokban történő nyúlások egy adott feszültség hatására különböző értékűek lehetnek a különböző irányfüggő anyagtulajdonságok következtében, így a 3.60. ábrának megfelelően számolunk:



3.60. ábra Különböző irányokban mért feszültség és a fajlagos nyúlás viszonya

A 3.60. ábra, valamint a jól ismert Hooke-törvény alapján az alábbi összefüggések adódnak:

$$\sigma = E_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (20)$$

$$\sigma = E_2 \cdot \varepsilon_2 \quad (21)$$

amiből átrendezve kapjuk:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \quad (22)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} \quad (23)$$

az alapösszefüggésbe (19) behelyettesítve, $m = 1$ esetén kapjuk, hogy:

$$\frac{\sigma}{E_1} - \frac{\sigma}{E_2} = k \quad (24)$$

Végül feszültségre átrendezve (25):

$$\sigma = \frac{k \cdot E_2}{1 - \frac{E_2}{E_1}} \quad (25)$$

A (25) összefüggés felhasználásával a vizsgált szerkezet anyagi jellemzőinek, valamint az alkalmazott rétegbevonat jellemzőinek ismeretében az egységnyi rendszámhoz tartozó feszültségérték meghatározható [1].

Példánkban: $E_1 = 2350$ MPa, $E_2 = 2000$ MPa, $k = 0,68 \cdot 10^{-3}$ mm/mm

$$\sigma = \frac{0,68 \cdot 10^{-3} \cdot 2000}{1 - \frac{2000}{2350}} = 9,12 \text{ MPa}$$

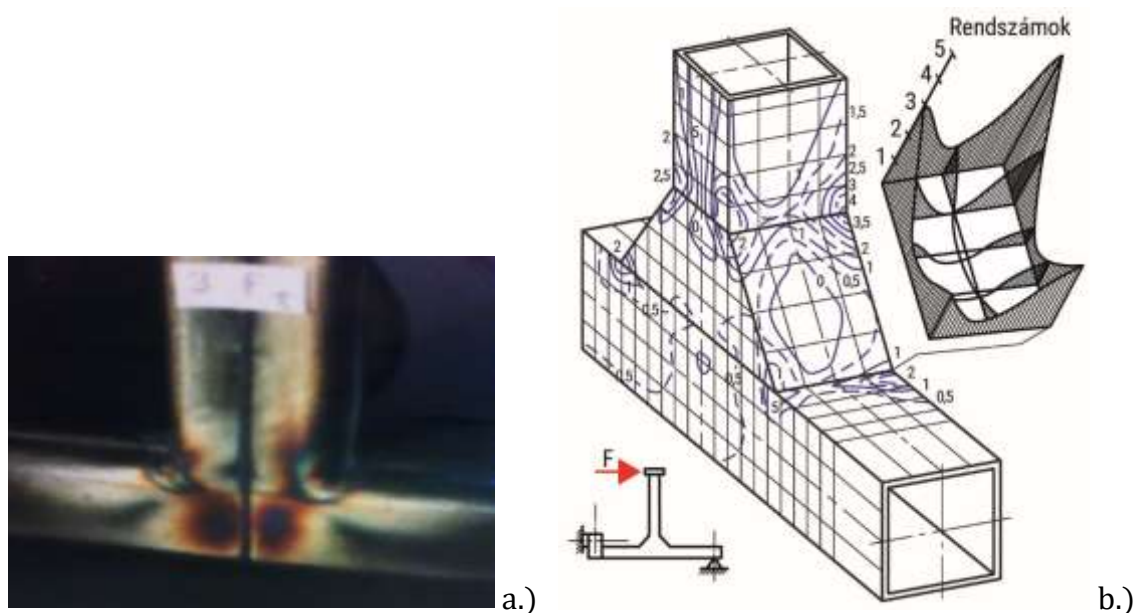
A behelyettesítés után $\sigma = 9,12$ MPa érték adódik $m = 1$ rendszámérték esetén.

3.4.4. Rendszámeloszlások kiértékelése: feszültségeloszlások vizsgálata

Mint azt a korábbiakban összefoglaltakból megállapítottuk, ez az eljárás rendkívül hatékonyan használható a valós szerkezetekre ható valós terhelések hatásainak azonnali áttekintésére. Ezen túlmenően természetesen szuperpozíció módszerével vizsgálhatók például a szerelési terhelések hatásai majd az ezekre szuperponált hatások. Ugyancsak alkalmas az eljárás a numerikus módszerek eredményeivel történő összehasonlításra, ebből a számítási eljárások peremfeltételeire tudunk következtetéseket levonni. Mindez természetesen igaz nem csak fém alapanyagú szerkezetek vizsgálatára, hanem a legszélesebb körben jelentkező, pl. polimerek, erősített anyagok (természetes és mesterséges), valamint biomechanikai (csont felületek) feladatok megoldására. Nem csupán statikus, hanem dinamikus – időben változó – terhelések esetén, ebből következően élettartam vizsgálatok lefolytatásának, a károsodások halmozódása felderítésének is egy igen hatékony, gyakorlati eszköze.

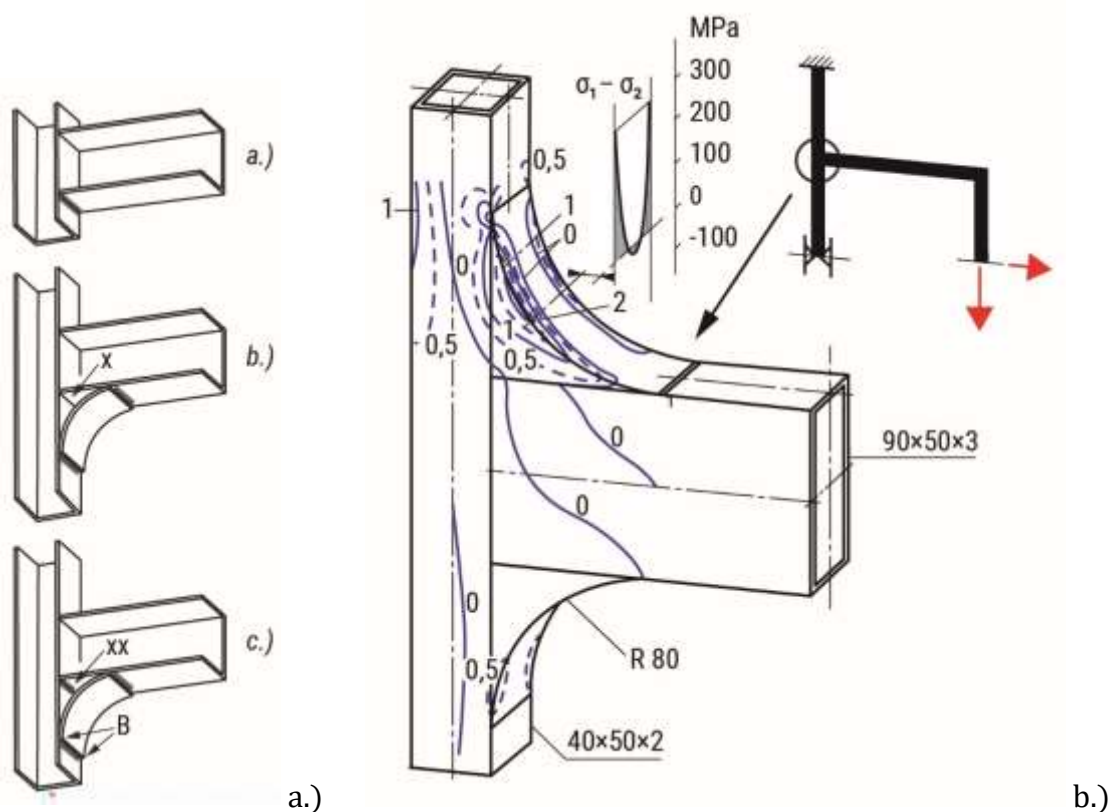
3.4.4.1. Vékonyfalú szelvények csomópontja

A könnyűszerkezetes hegesztett, vékonyfalú szelvényekből összeállított vázszerkezetek kialakítása, sarokpontjainak feszültséggyűjtő hatása jól ismert a tervezők, üzemeltetők és felhasználók körében. A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat egyszerű eszközével eligazodhatunk a különböző alakok, kivitelek feszültségeloszlásra gyakorolt hatásaival.



3.61. ábra Vékonyfalú „T” csatlakozás
a.) merevítés nélküli rendszámeloszlás, b.) sarokmerevített változat kiértékelt
feszültségeloszlása [34]

A 3.61. ábra egyszerű, vékonyfalú zártszelvényből hegesztett „T” csatlakozás rendszámeloszlását mutatja, mellette a sarokmerevítéssel ellátott változat kiértékelt feszültségeloszlását látjuk. Érdekes megfigyelni a sarokmerevítésen mért eloszlást, amely annak horpadási hajlamára mutat rá (a merevítés középső negatív tartománya). A sarok kialakítások optimalizálása, - beleértve a kialakítás technológiai megoldásait is - sarkalatos pontja a könnyűszerkezetes váz és tartószerkezetek tervezésének, építésének. A különböző sarokmerevítések, azok egymáshoz kötésének változatai egyszerűen összehasonlíthatók ennek a vizsgálati eljárásnak a segítségével, nagymértékben hozzájárulva a tönkremenetel elkerüléséhez. Erre mutatunk be példát a 3.62. ábrán.



3.62. ábra Sarokmerevítések feszültségeloszlásra gyakorolt hatása

a.) különböző merevítési megoldások, b.) íves kétoldalú merevítés feszültség eloszlása [34]

Természetesen nem csupán kiragadott könnyűszerkezetes, vékonyfalú vázelemek, hanem a teljes vázszerkezet, különösen annak csomóponti csatlakozásai is vizsgálhatók, hiszen többnyire ezek a feszültséggyűjtő helyek és szolgálnak a későbbi meghibásodások kiindulási helyéül. Könnyűszerkezetes váz részletek rétegbevonatos vizsgálatának rendszámeloszlásait mutatja a 3.63. ábra [35]. Az ábrán jól megfigyelhető a többrudas, sokszorosán hegesztett csomópontok kedvezőtlen hatása a feszültségeloszlásra, különös tekintettel a hegesztési technológia által keltett járulékos hatásokra (egymásra épülő hőhatás zónák kedvezőtlen hatása).



a.)



b.)

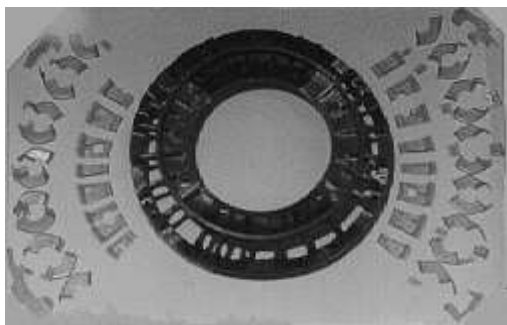
3.63. ábra Vékonyfalú, terhelt hegesztett szerkezet rendszámeloszlásai

a.) több rudas csomópont feszültségkoncentrációja,

b.) vázszerkezethez kapcsolódó bekötés feszültségtorlódása [35]

3.4.4.2. Forgó szerkezeti egység - tengelykapcsoló ház

A tárgyalt műszaki megoldás különösen alkalmas bonyolult felszínű, rendkívül összetett geometriával rendelkező szerkezeti elemek vizsgálatára. Példaként bemutatjuk egy nehézgépjármű tengelykapcsoló házának fejlesztése során (a kérdéses fejlesztés több lépcsőben valósult meg), a vizsgáló rétegeket (szegmenseket) felragasztás előtt, majd azokat felragasztott helyzetükben (3.64. ábra).



a.)



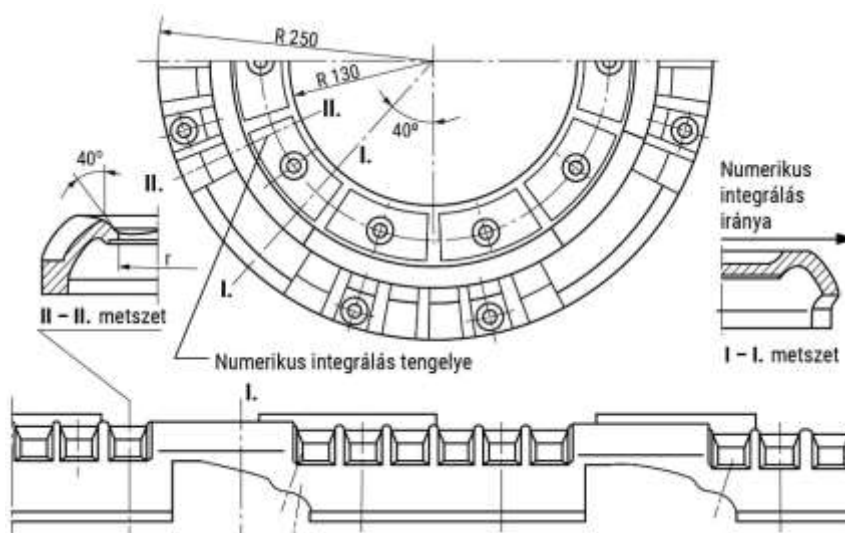
b.)

3.64. ábra Tengelykapcsoló ház fejlesztése során alkalmazott rétegbevonatos eljárás

a.) vizsgálóréteg szegmensek, b.) felragasztott, vizsgálatra kész állapot [36]

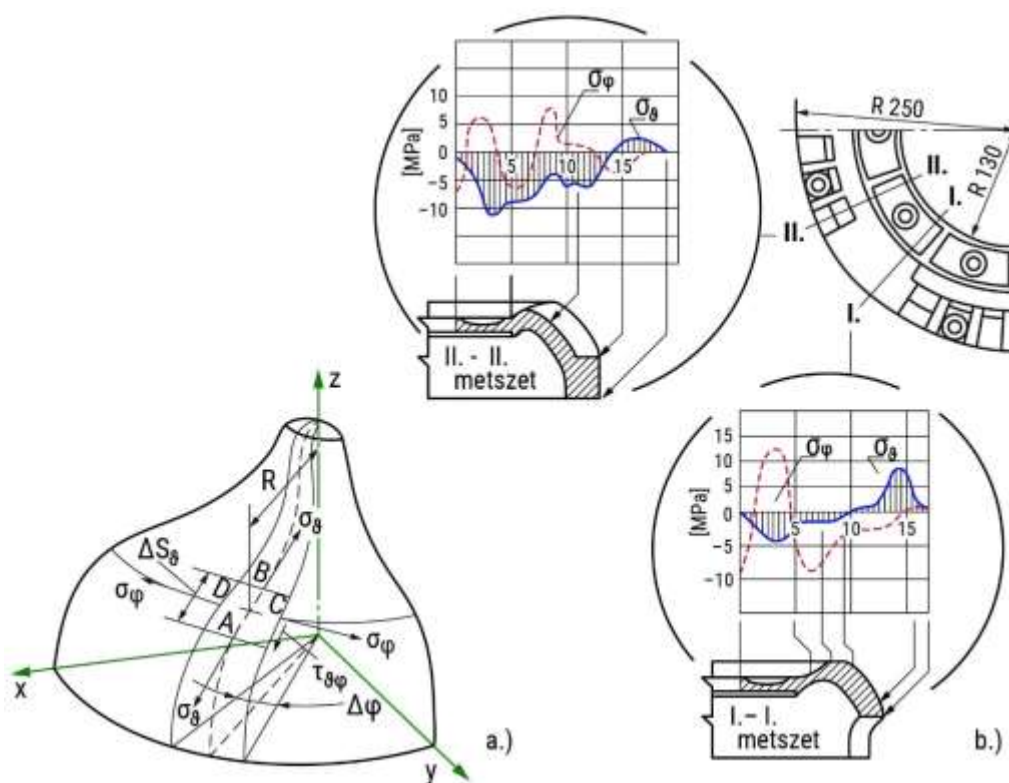
A tengelykapcsoló ház mértékadó terhelése a forgásból származó centripetális gyorsulások keltette centrifugális erő. A szerkezetet ezért forgás közben vizsgáltuk és az álló kép biztosítását a forgó tengelyről vezérelt stroboszkóp lámpa alkalmazása tette lehetővé.

A tengelykapcsoló ház nézeti képén a 3.65. ábrán láthatók azok a bejelölt keresztmetszetek (I.-I. és II.-II.) amelyek feszültségeloszlását vizsgáltuk.



3.65. ábra Vizsgált tengelykapcsoló ház nézeti képe, a feszültségeloszlás szempontjából vizsgált keresztmetszetekkel (I-I. és II.-II.) [36]

A teljes kiértékelést alkalmaztuk a rendszámeloszlások vizsgálatánál, amelyre példát a 3.66. ábrán mutatunk.

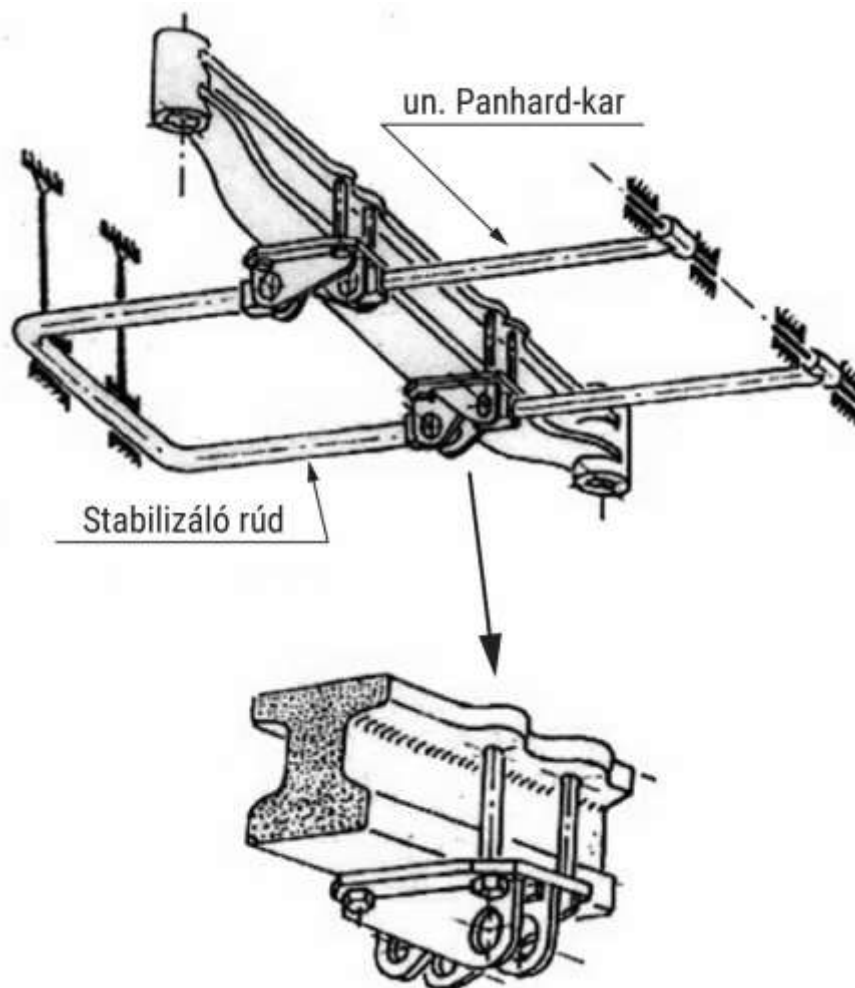


3.66. ábra Tengelykapcsoló ház, működés közben mért feszültség eloszlások
a.) teljes kiértékelés sávja, b.) kiértékelt feszültségeloszlás [36]

3.4.4.3. Rendszámeloszlások vizsgálatának szerepe az egymásra épülő terhelések hatásainak (szerelési, üzemi) szétválasztásában

A következő vizsgálat egy autóbusz vázszerkezetére (annak első hídjára) rögzített hegesztett kivitelű bekötőbak mérési eredményeit mutatja. A feladat célkitűzése annak megállapítása volt, hogy milyen okokra vezethető vissza a bekötőbak vártnál gyakoribb meghibásodása (törése) és az optikai feszültségvizsgálat eredményeinek felhasználásával lehetőség nyílik-e a konstrukció javítására.

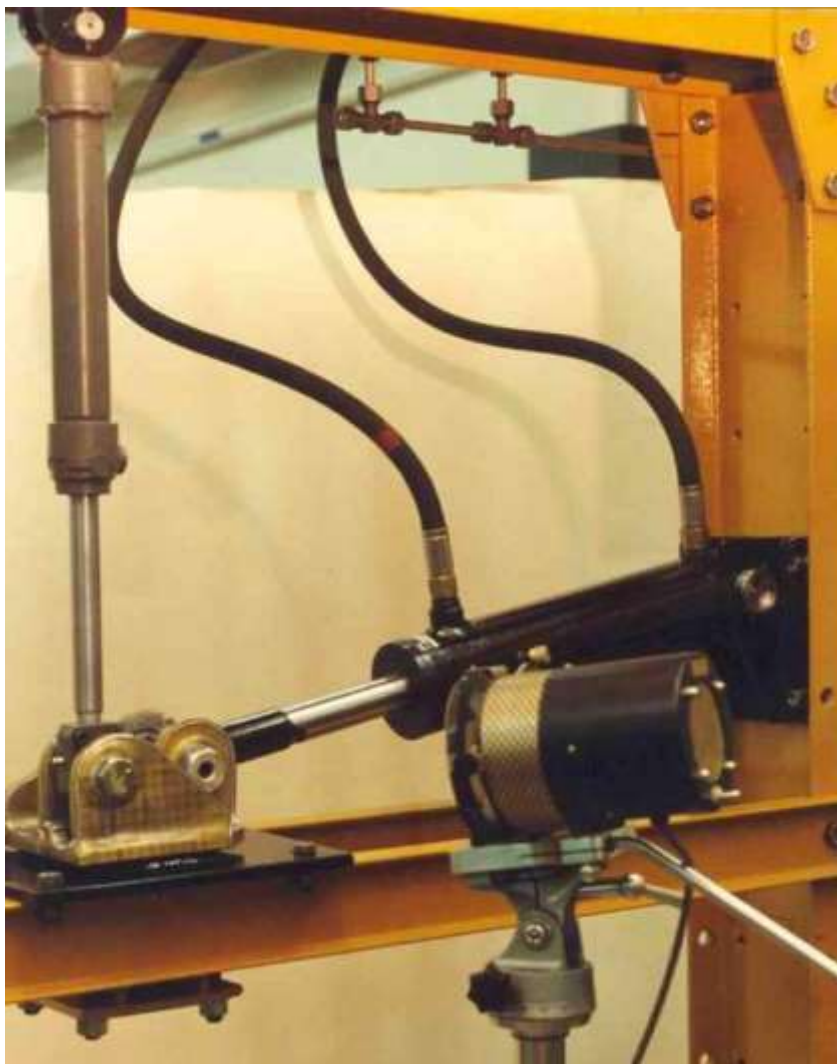
A bekötőbaknak a jármű első hídjához történt rögzítési körülményeit (szerelés), valamint a bak terheléseit képező rudazatok elhelyezkedését (toló- és fékerők, valamint a kanyarstabilizátorról átadódó üzemi erők) a 3.67. ábrán mutatjuk be.



3.67. ábra Autóbusz első hídjára rögzített bekötő bak szerelési és terhelési környezete [37]

A bekötőbak vizsgálatát erre a célra tervezett és összeállított vizsgáló padon végeztük, amely mérés összeállításról készített fényképfelvételt a 3.68. ábrán mutatjuk be [37]. A lefogási és terhelési körülményeket a valóságnak megfelelően alakítottuk ki.

A képen a vizsgálóréteggel ellátott bekötő bak valamint a vizsgálatra előkészített reflexiós polarizskóp is látható [37]. A terhelő berendezésben való vizsgálat lehetővé tette a bakot érő terhelések egyenkénti valamint egymásra épülő hatásainak vizsgálatát és elemzését.

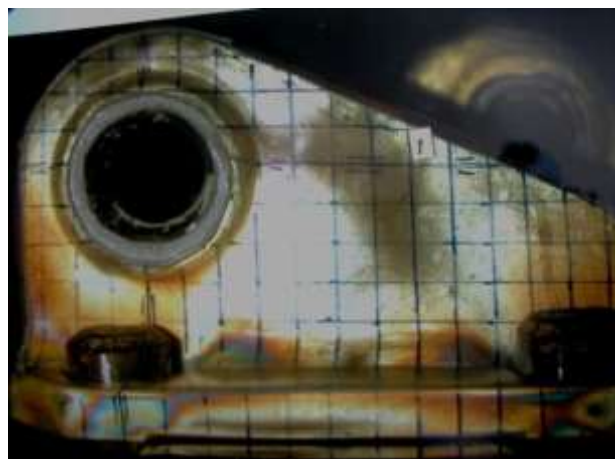


3.68. ábra Vizsgálatra előkészített bekötő bak a terhelő berendezésben [37]

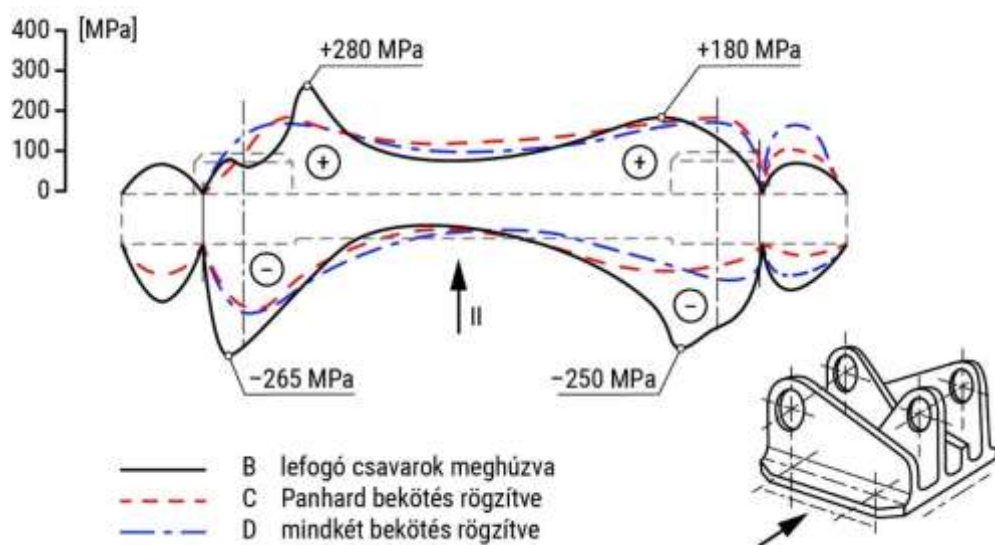
Az első terhelési eset a bekötő bak felszereléséből adódó igénybevételek meghatározása volt. A bak rögzítéséből adódó rendszámeloszlást valamint annak feszültségre számított értékeit a 3.69. ábrán mutatjuk be [37]. A feszültségre történő kiértékelés (3.69. b.) ábra) már összerajzoltan mutatja a toló-, és a fékerőt bekötő rudak hatásait is a különböző vonalstílusok alkalmazásával.

A 3.69. b.) ábra értékelésekor jól látható, hogy pusztán a vázra történő rögzítése eredményeként igen jelentősnek mondható (közel 300 MPa értékű) feszültség alakult ki a talplemezen.

Az eloszlásokból jól látszik, hogy a lefogó csavarok hatására (egyenlő, előírás szerinti meghúzási nyomaték alkalmazásával) ébredő igénybevételek a meghatározók, az erre szuperponálódó üzemi teher a rögzítés hatását csak átrendezni képes.



a)



b.)

3.69. ábra Bekötő bak rögzítése során mért rendszámeloszlás a.), valamint annak feszültségre kiértékelt értékei, b.) [37]

A rögzített bak toló fékerőinek bekötését követően a kialakult felszíni nyúlásállapotról készített rendszámeloszlást a 3.70. ábrán mutatjuk be.

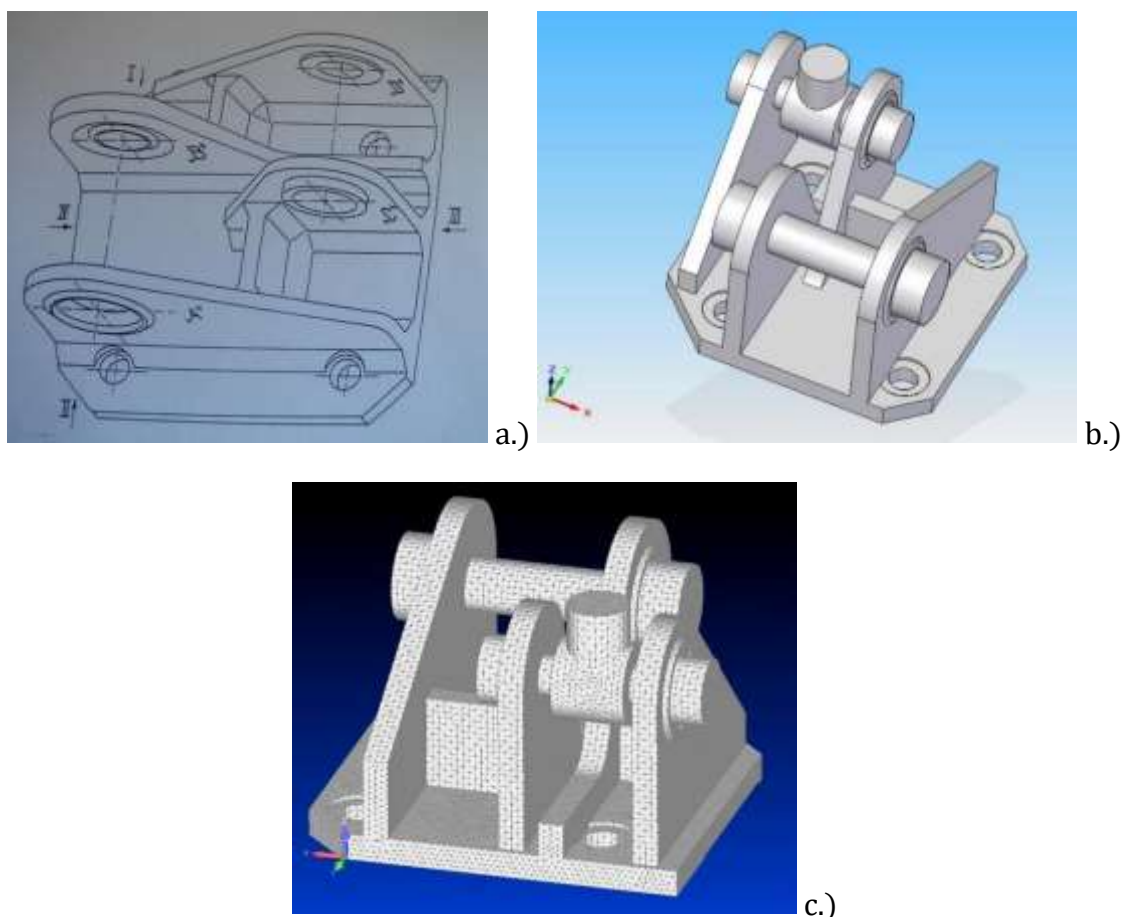


3.70. ábra Rögzített bekötőbak toló fékerőket is felvevő felszíni nyúlásállapotának rendszámeloszlása [37]

3.4.4.4. Rendszámeloszlások vizsgálatának szerepe a numerikus eljárások peremfeltételeinek meghatározásában

A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat – miután valós szerkezetek valós terhelési körülmények közötti mérését teszi lehetővé – kiválóan alkalmas a numerikus eljárások eredményeinek ellenőrzésére, megteremtve az alkalmazott számítási eljárás peremfeltételeinek a tényleges szerkezet mérésének eredményei alapján a módosítás lehetőségét. Ezt a folyamatot lényegében a érvényesítés eljárásának tekinthetjük, amikor a szerkezet valóságos viselkedésének ismeretében lehetőségünk adódik a numerikus eljárás korábban lényegében próbálgatáson alapuló peremfeltételeinek pontosítására. Az eljárást a fentiekben bemutatott bekötőbak mérési eredményeit felhasználva mutatjuk be [38].

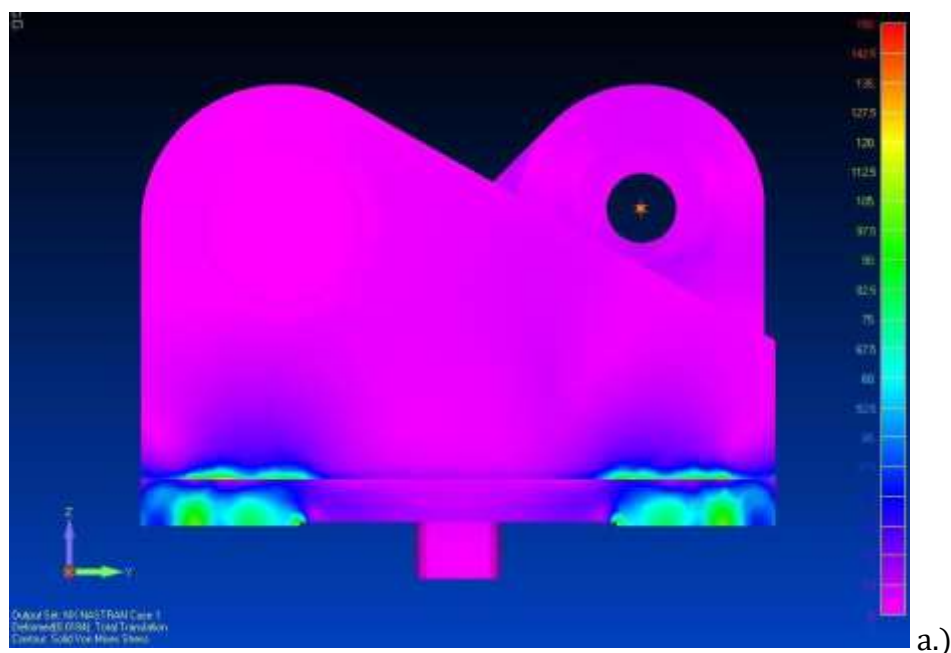
A bekötő bak nézeti képét, annak térbeli avagy 3D modelljét, valamint a hálógenerálás eredményeként alkotott modellt a 3.71. ábrán mutatjuk be.



3.71. ábra Bekötő bak
a.) távlati képe, b.) térbeli, avagy 3D modellje,
c.) hálógenerálás utáni modellje numerikus eljáráshoz [38]

A 3.69. valamint 3.70. ábrák valóságos terhelési körülmények közt mért felszíni deformációs eredményei alapján a végeelem analízis peremfeltételeinek megfelelő megválasztására – pontosítására - nyíltott lehetőség.

Ennek eredményeként a talplemez valamint a bekötő konzol környezetének számított feszültség eloszlását a 3.72. ábrán adjuk közre.



a.)



b.)

3.72. ábra Numerikus analízis eredménye
a.) bekötő bak talplemezén, annak rögzítése után,
b.) bekötő konzol feszültségeloszlása a csap környezetében [38]

A numerikus analízis során alkalmazott peremfeltételek mérési eredményeken alapuló pontosítása eredményeként a számított értékek szignifikáns egyezést (90 % szignifikancia szinten) mutattak a mérésekből nyert adatokkal. Megállapíthatjuk, miszerint a mérési eredményeken alapuló peremfeltételek pontosítása a numerikus analízis megbízhatóságát jelentősen növeli.

3.4.4.5. Rendszámeloszlások vizsgálatának lehetősége túlfedéssel rögzített szerkezetek esetén

Túlfedéssel illesztett, szerelt egységek deformáció, valamint feszültségi állapotának számítással történő követése igen komoly numerikus háttérrel, az alkalmazások magas szintű jártasságot igényelnek és feltételeznek. Mindezek megléte esetén sem teljesen biztos, hogy a szerelés (többnyire sajtolás) minden fázisának viselkedéséről az alkalmazott számítási eljárás pontos képet biztosít. További bizonytalanságot jelent, amennyiben a szerelés (sajtolás) közben merül fel olyan ismeretlen kérdés, amelynek eredményeként a készre szerelt termék a minőségellenőrzésen fennakad.

A vasúti keréktárcsa-tengely sajtolásos kapcsolata esetében a rétegbevonatos vizsgálatot megelőzően igen magas szintű numerikus szimulációval vizsgálták a sajtolás folyamatát, azonban nem jutottak eredményre a bizonytalanságok okainak feltárásában [39].

A fentiekben röviden vázolt eljárás (sajtolásos szerelés) esetlegesen fellépő hibájából eredő rendellenesség – pontosítva: a sajtolást követően fellépő, megengedett értéket meghaladó axiális ütés a keréktárcsa külső peremén mérve - feltárásában történt alkalmazásra mutatunk példát a következőkben. A kérdéses alkatrészpár - amit sajtolással, túlfedéses illesztéssel szereltek, egy nagysebességű (200 km/h feletti sebességű) vonat kocsijának tengelye, a rásajtolt keréktárcsákkal - volt vizsgálatunk tárgya. A feladat annak felderítésére volt, hogy az optikai feszültségvizsgálat rétegbevonatos eljárásával megállapítható-e a szerelt alkatrészpár ütésének eredete, valamint az alkalmazott kísérleti eljárás eredményei alapján megfogalmazható-e javaslat a rendellenesség megszüntetésére.

Az eljárás során a vizsgált kerékpárt annak furata környezetében optikailag aktív rétegbevonattal láttuk el. A bevonat készítésének egy fázisát, az öntőtálcákat, valamint a vizsgált keréktárcsát a 3.73. ábrán mutatjuk be.



3.73. ábra A vizsgálatra előkészített keréktárcsák, előtérben a vizsgálóbevonatok öntőtálcái [40]

A keréktárcsákra felragasztott, hálózattal ellátott vizsgálóbevonatokat a 3.74. ábrán mutatjuk be.



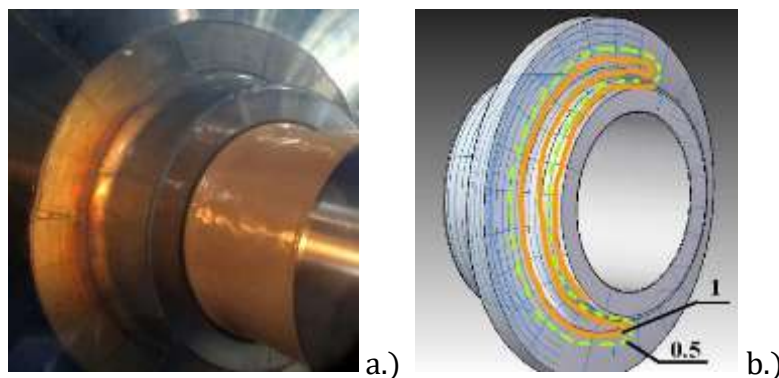
3.74. ábra A vizsgálóréteggel ellátott keréktárcsák [40]

A sajtolásra előkészített, előszerelt kerékpár tengely a sajtoló gépbe beemelés előtt a 3.75. ábrán látható.



3.75. ábra Sajtolásra előszerelt tengely-kerék pár [39]

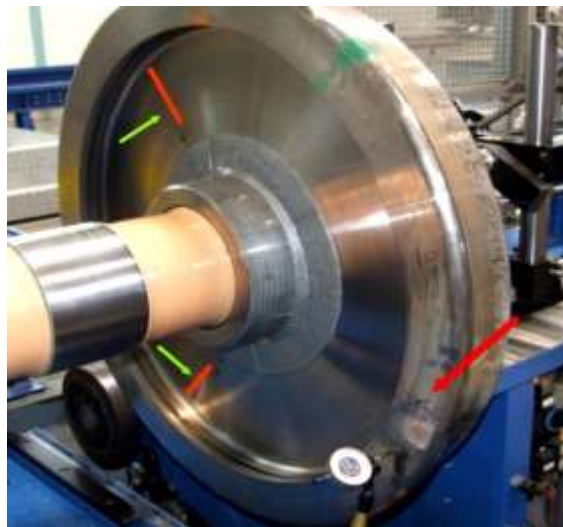
A vasúti keréktárcsák felsajtolása során videófelvételen rögzítettük a folyamatot. A sajtolást követően, a keréktárcsák véghelyzetében készített kereszttezett polarizátor állású (egész) rendszámeloszlásra valamint az azokról készített összerajzolt rendszámeloszlásra egy példát a 3.76. ábrán mutatunk be.



3.76. ábra Példa vasúti keréktárcsa sajtolást követő rendszámeloszlására a.), valamint az abból készített összerajzolt rendszámeloszlás b.) [40]

A 3.76. ábra összerajzolt rendszámeloszlásának feszültségre értékelésekor – az alkalmazott mérőbevonat feszültségoptikai jellemzőinek ismeretében – megállapíthatjuk, hogy a keréktárcsának a tengelyhez szilárd illesztéssel kapcsolódó felületén mintegy 100 MPa értékű nyomó feszültség mérhető, amely nagyságrendje tekintetében az alkalmazott szilárd illesztés geometriai jellemzőinek ismeretében elfogadható mértékűnek tekinthető. Ami viszont aggályos: ennek a nyomó feszültségnek a kerület menti megoszlása. Pontosítva: a jelzett igénybevétel nem a teljes kerület mentén volt mérhető, hanem a kerület mentén csak annak közelítőleg a felén, azaz mintegy 180° tartományban. Ezen a tényen az alkalmazott utónyomás egyes esetekben segített (változtatott, csökkentette a mértékét), máskor azonban nem volt hatással a mért aszimmetrikus felületi nyúláseloszlásra. A keréktárcsa peremén a sajtolást követően mérhető axiális ütés ennek az egyenlőtlen felszíni deformációnak az eredményeként alakul ki.

A mérőgépben elhelyezett szerelt keréktárcsa, valamint a felszíni deformáció mérése (az ábrán zöld nyilakkal jelzett felületi zónán belül) alapján kijelölt terület, ahol az axiális ütés jelenléte mérhető volt, a 3.77. ábra alapján követhető [40]. Az ábrán piros nyíl jelzi a rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat alapján feltételezett axiális ütés szélső értékének helyzetét, melyet az elvégzett ütésvizsgálat annak helyzetére vonatkozóan néhány *mm*-es eltéréssel igazolt.



3.77. ábra Sajtolásra előszerelt tengely-kerékpár [40]

A jelenség okát a sajtolás közben fellépő akadósúszás (stick slip) sajtolás közbeni nem kellően kontrollált (és igen nehezen ellenőrizhető) jelenlétére, valamint az alkalmazott sajtoló szerszám (nyitott nyomólap, hiszen a keréktárcsák tengelyét be kell fogadniuk a sajtolás folyamatában) nem megfelelően megválasztott hajlítási merevségében kell hogy keressük. A sajtoló szerszám nyomólapjának geometriai változtatása (hajlítási merevségének növelése) eredményeként a korábbi axiális rendellenességek megszűntek.

3.4.4.6. Rendszámeloszlások vizsgálatából levont következtetések dinamikus, időben változó terhelések esetén

A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat nem csupán statikus körülmények közötti vizsgálatokra, ellenőrzésekre alkalmas. A vizsgált felszínre felragasztott rétegbevonat a felszíni nyúlásokat, deformációkat érzékeli (szenzor), a terhelések hatására kialakuló optikai hatást (kettőstörés változást) folyamatosan biztosítja, így annak megfelelően megválasztott rögzítésével dinamikus folyamatokat is tudunk vizsgálni. Tartós, pl. élettartam vizsgálatok is megvalósíthatók, amennyiben a feszültségoptikai hatás (képek) változásának hosszú távú rögzítéséről gondoskodunk.

A következőkben egy élettartam vizsgálat eredményeinek bemutatása kapcsán mutatunk példát a mérési módszer dinamikus folyamatok hatásaira bekövetkező deformációinak elemzésére.

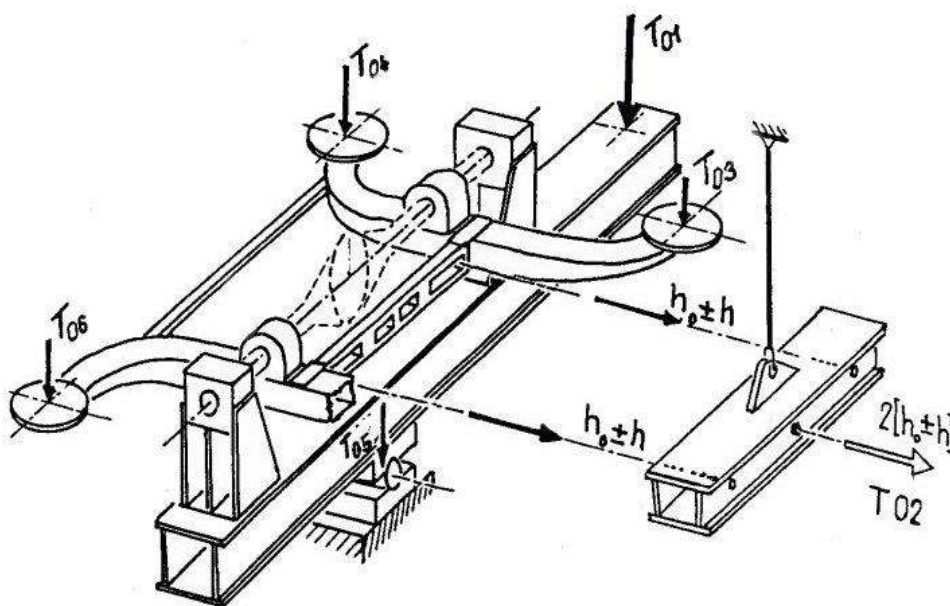
A szerkezet vizsgálatának célja: a számítások alapján tönkremenetelt okozó terhelési szinten történő, 1×10^6 igénybevételi szám okozta hatások feltárása, méréssel történő ellenőrzése és igazolása.

A tanulmány bemutatja a terhelési modell megalkotását, a kiválasztott felületelemek vizsgálatának lépéseit az előkészítéstől a mérések egyes fázisainak eredményéig.

Az alkalmazott igénybevételi ciklusszám milliós nagyságrendű, amely igénybevételi szám a szerkezet épségének vesztesét, annak tönkremenetelét eredményezte.

A vizsgálat tárgya egy autóbusz segédalváz keret (alakja után „C” keret), amely a futóművön keresztül érkező erőhatásokat, - toló- és fékerőket valamint statikus teherből és útegnyenetlenségből adódó terheléseket - közvetít a vázszerkezetre.

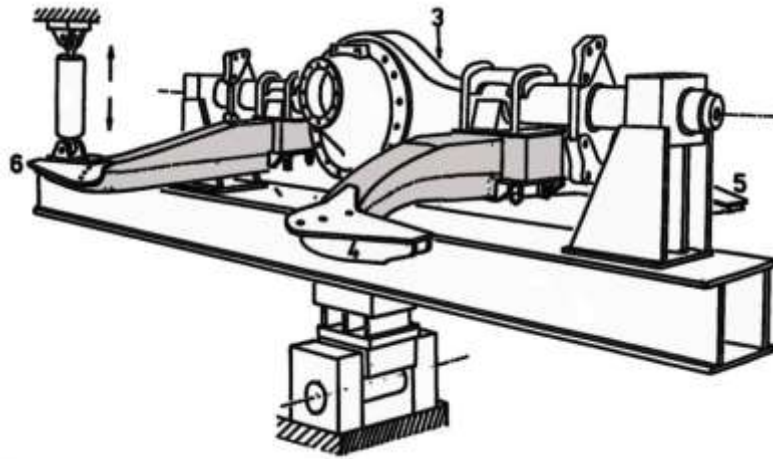
A segédalváz a jármű hátsó hídjára rögzítve látja el feladatát. A segédalváz keret terhelésének mechanikai modelljét a 3.78. ábra mutatja.



3.78. ábra Autóbusz segédalváz keret terhelésének mechanikai modellje [41]

A terheléseket az eredeti szerkezeten valósítottuk meg, amely a tényleges viselkedés egyik alapvető feltétele.

A terhelő berendezésről, valamint a vizsgált segédváz keret felfogásáról készített távlati képet a 3.79. ábrán mutatjuk be.



3.79. ábra Autóbusz segédváz keret terhelő berendezésének és megfogásának távlati képe [41]

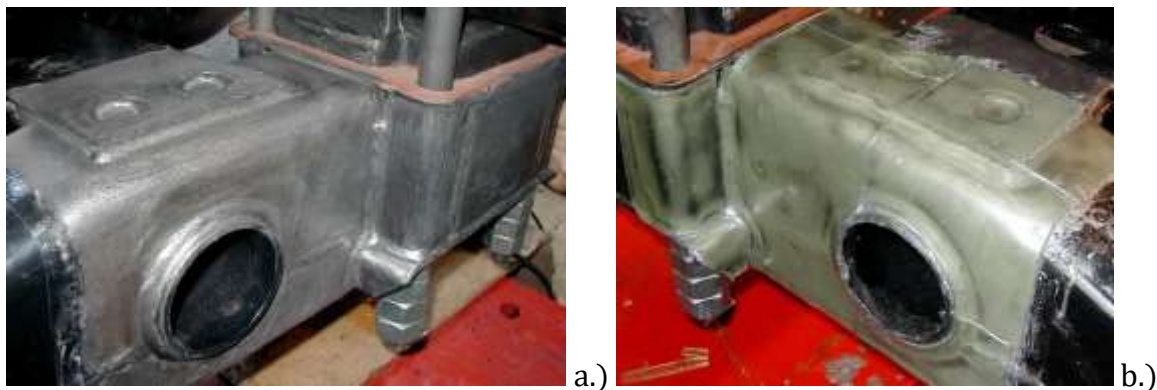
A terhelő berendezés tényleges megvalósításának fényképe (M 1:1) a 3.80. ábrán látható [41].

Itt jegyezzük meg, miszerint a tényleges szerkezeten történő (M 1:1) vizsgálatok lehetősége a szakirodalmi adatok ismeretében rendkívüli módon beszűkült, így az ilyen vizsgálatok lehetősége különös figyelmet kell kapjon a szakma művelőitől.



3.80. ábra Autóbusz segédváz keret terhelő berendezés M 1:1 [41]

Az elméleti számítások alapján meghatároztuk a kritikus keresztmetszeteket, melynek környezetében teljes felületű vizsgálatot készítettünk elő. Ennek első lépésében a felület előkészítését végeztük el, majd a felületre felformáztuk és felragasztottuk a vizsgáló rétegeket, amelyekről a 3.81. ábrán mutatunk be részleteket.

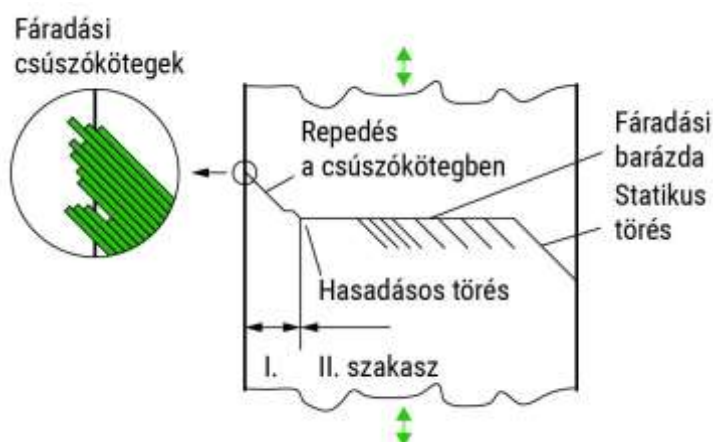


3.81. ábra Vizsgálóréteg elkészítése a kiválasztott felületre
a.) felület előkészítés, b.) felragasztott vizsgálóréteg [41]

A vizsgálat során 1×10^6 igénybevételi számú terhelési ciklust alkalmaztunk a szerkezeten, amely terhelés során folyamatosan mértük a kiválasztott felület felszíni deformációit. A meghibásodásra utaló jeleket alapvetően két részre oszthatjuk.

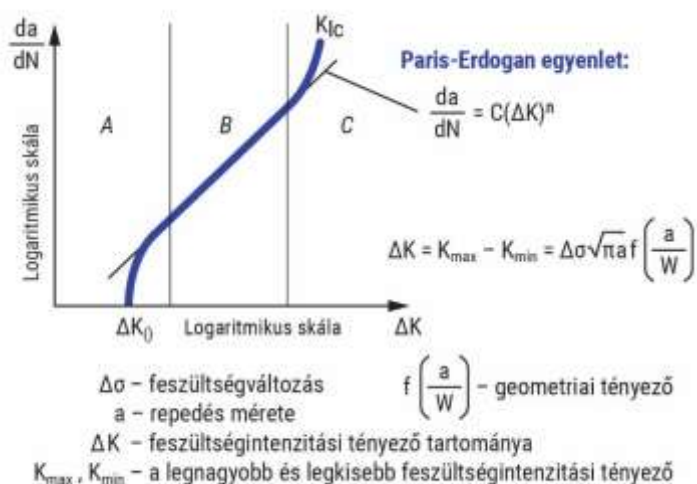
Az egyik, amikor megjelennek a repedés – meghibásodás – terjedésére utaló elcsúszási síkok (Ludertz-Hartmann vonalak [38]), amelyek az ismétlődő igénybevétel során (jellemzően fárasztó vizsgálatok esetén) kezdeti, felszíni repedések kialakulására utalnak. Ezek a felszíni repedések - melyek a terhelési ismétlésszám növekedésével megindulnak a szerkezet belseje felé, - vezetnek a későbbiek során a szerkezet sérüléshez, majd tönkremeneteléhez (pl. törés).

A repedés terjedés mechanizmusát, valamint annak törvényszerűségét a 3.82. valamint a 3.83. ábrákban foglaltuk össze.



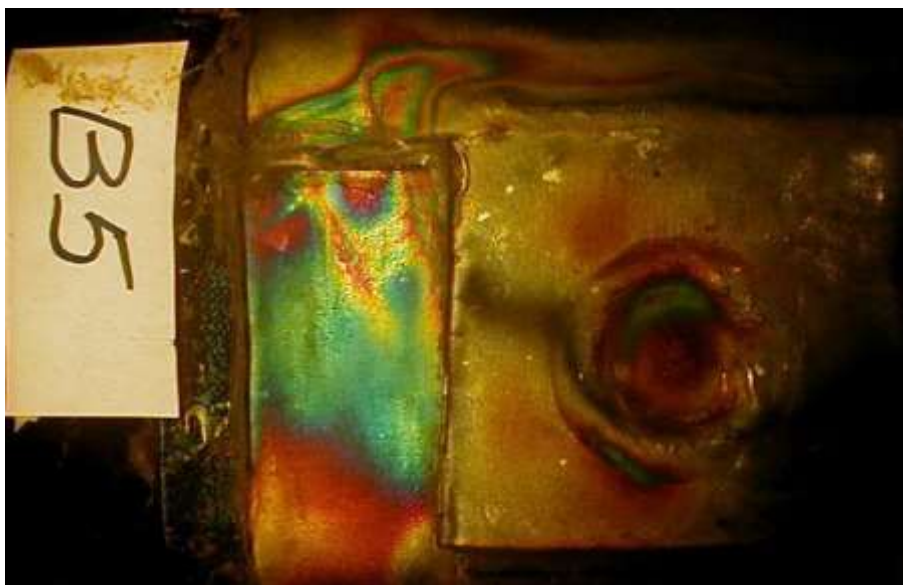
3.82. ábra Repedésterjedés mechanizmusa a csúszó síkok megjelenésével
(Ludertz-Hartmann vonalak) [38]

A repedésterjedés törvényszerűségét a Paris-Erdogan egyenlet felvázolásával a 3.83. ábrán mutatjuk be. A repedésterjedés szakaszai: repedés megindulás (A), lineáris repedésterjedés (B), tönkremenetel (C).



3.83. ábra Repedésterjedés törvényszerűsége a Paris-Erdogan egyenlet alapján [38]

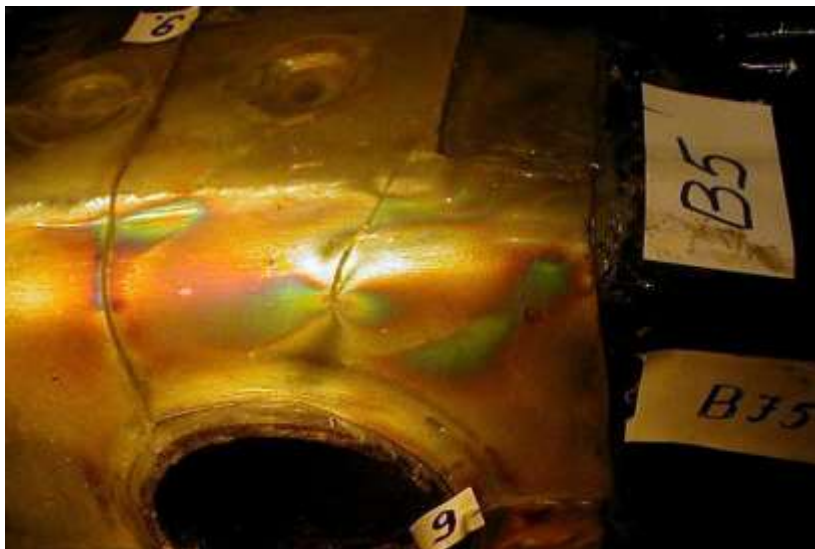
Gyakorlati példánkban a vizsgált segédalváz kereten a meghibásodás megindulására utaló jeleket - elcsúszási síkok megjelenésének formájában (kiinduló repedés környezet) - a 3.84. ábrán mutatunk be [41].



3.84. ábra Vizsgált segédalváz keret felszínén mért elcsúszási sík rendszámeloszlása 5×10^5 igénybevételi szám esetén [41]

A tönkremenetel megindulásának másik tipikus jele egy bekövetkezett meghibásodás csúcsa (repedéscsúcs) környezetében kialakult repedéskép vizsgálata, amelyet a törésmechanika paramétereinek kísérleti eljárásokkal meghatározható módját taglaló fejezetben (3.21 - 3.31. ábrák) részletesen bemutattunk.

A vizsgált szerkezet egy meghatározott keresztmetszetén áthaladó repedés csúcsának környezetében mért rendszámeloszlást a 3.85. ábrán mutatjuk be.



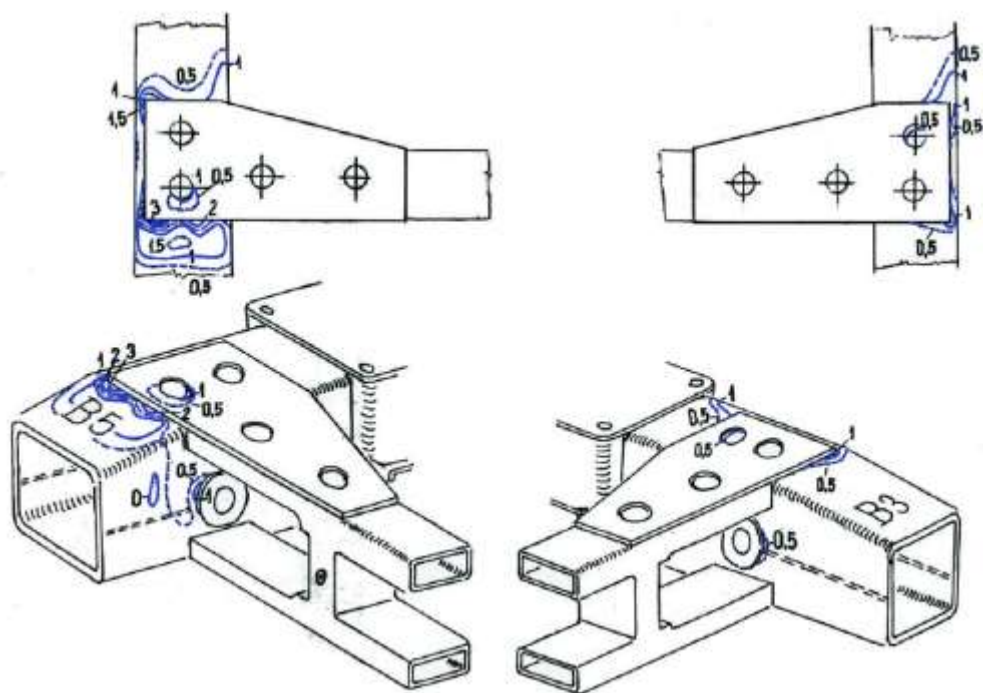
3.85. ábra Kialakult repedés csúcsának környezetében mért rendszámeloszlás, 1×10^6 igénybevételi szám esetén [38]

A 3.85. ábrán világosan látható, hogy a szerkezet sérült, a keresztmetszeten áthaladó repedésről beszélhetünk, amelyet a vizsgálóréteg eltávolítását követően saját szemmel is láthattunk. (3.86. ábra).

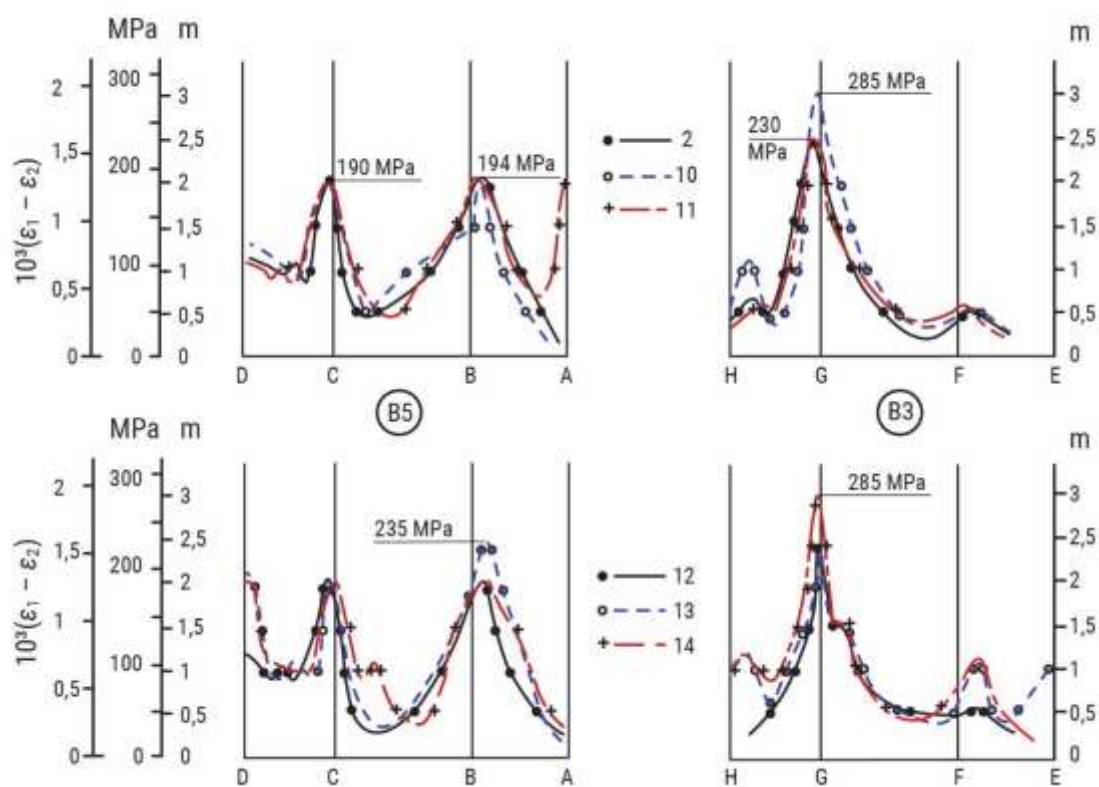


3.86. ábra Segédalváz keret meghiúsodása, 10^6 igénybevételi szám esetén [38]

Az észlelt és rögzített rendszámeloszlások alapján elkészítettük az ún. összerajzolt rendszámeloszlásokat, amelyek alapján a vizsgálóréteg méréstechnikai jellemzőinek ismeretében az alkatrészben kialakult feszültségállapot meghatározását elvégeztük. Ennek a feldolgozásnak a menetéből mutat egy példát a 3.87. ábra.



a.)

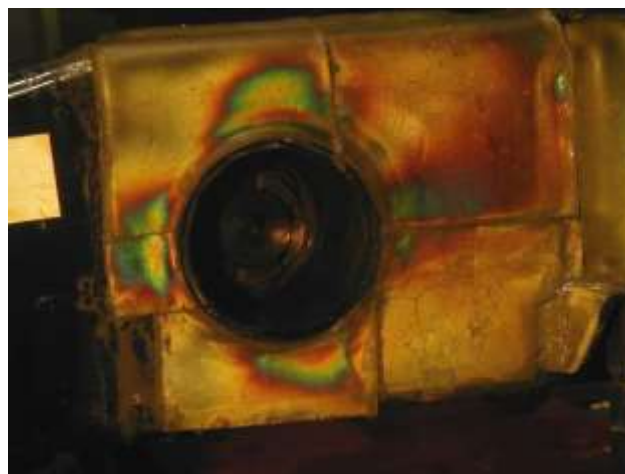


b.)

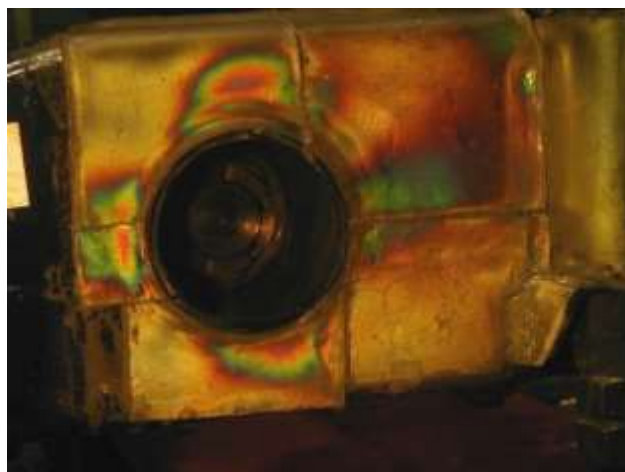
3.87. ábra Összerajzolt rendszámeloszlások segédváz keret egy meghatározott terhelésének fázisában a.) rendszámeloszlások, b.) feszültség értékek[38]

Az optikai feszültségvizsgálat rétegbevonatos eljárása természetesen alkalmas egy folyamat hatásainak nyomon követésére amennyiben azt teljes körűen megfigyeljük, vagy rögzítjük. Ezek ismeretében megállapíthatjuk, hogy helye van az állapotfelügyelet során alkalmazott eljárások sorában is.

A most bemutatott segédalváz keret fárasztó vizsgálata során különböző, növekvő igénybevételi számokhoz tartozóan mutatjuk be a kifáradási folyamat előrehaladását a 3.88. ábrán az egyes ciklusszámokhoz tartozóan rögzített rendszámeloszlások alapján.



a.)



b.)



c.)

3.88. ábra Kifáradási folyamat előrehaladása segédalváz kereten, rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat rendszámeloszlásai alapján

a.) rendszámeloszlás $0,25 \times 10^6$ igénybevételi szám esetén,

b.) rendszámeloszlás $0,5 \times 10^6$ igénybevételi szám esetén,

c.) rendszámeloszlás 1×10^6 igénybevételi szám esetén [38]

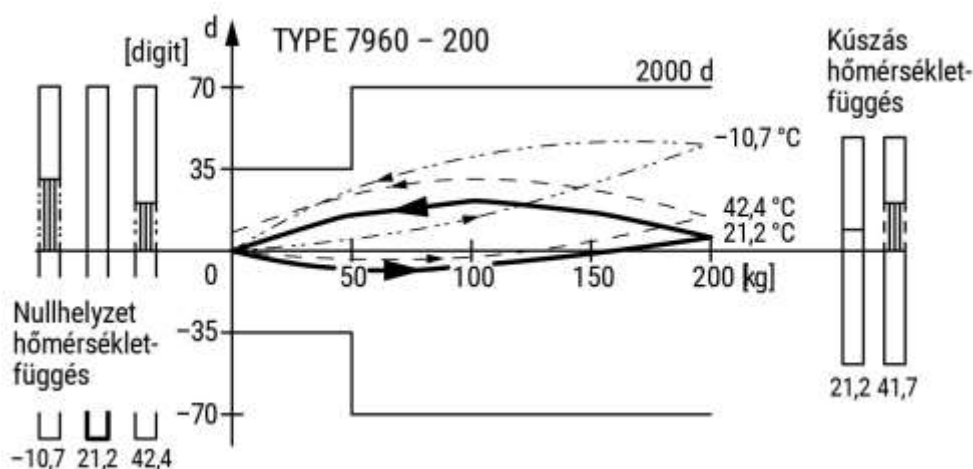
3.4.4.7. Kisméretű szerkezeti elemek - erőmérő cellák - vizsgálati lehetőségei

Mindennapi életünkben az erőmérő cellák meghatározó szerepet töltenek be. Jelen vannak a konyhai mérlegeinkben, az autópályákon alkalmazott tömegmérő berendezésekben, vagy éppen az erőmérő gépek terheléseket meghatározó egységeiben. Pontosság tekintetében alapvetően kétféle rendszerről beszélünk, angol terminológia szerint megkülönböztetünk „Load Cell”-t, valamint „Force Transducer”-t. Magyarul mindkettőt erőmérő cellának hívjuk. A „Force Transducer”-ek érzékenysége és pontossága magasabb mérés technikai osztályba tartozik, egyben az ún. hiba diagramja (linearitás, hiszterézis, kúszás) kisebb értéktartományokat képvisel.

Az erőmérő cellákban a terhelés hatására kialakuló deformációs jelet a mérőtest biztosítja, melynek alakját gondos matematikai számítások alapján határozzák meg.

A mérőtest deformációját nyúlásmérő ellenállásokkal határozzuk meg, amelyek jele a mérőcellához rendszeresített feldolgozó elektronikába jut bemenő jelként.

A mérőtest csak és kizárólag tiszta igénybevételű terhelést kaphat, ami a mérőcellákkal kapcsolatosan alapvető követelmény. A 3.89. ábrán egy erőmérő cella jellegzetes hiba diagramját mutatjuk be.

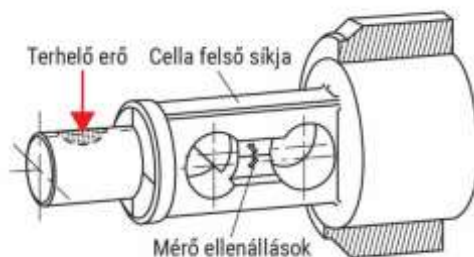


3.89. ábra Erőmérő cella jellegzetes hiba diagramja [42]

A leggondosabb matematikai számítások ellenére is előadódik, hogy a mérőcella jellemzői (érzékenység, linearitás) nem hozzák az előírt értékeket. Ezen esetekben alapvetően két lehetőség közül lehet választani a kívánt eredmény elérése érdekében: vagy a mérőelemen geometriai változtatást hajtanak végre (amely módosítja a mérőtest deformációs állapotát), vagy a mérőtesten elhelyezett nyúlásmérő ellenállások áthelyezésével lehetőség nyílik a mérés technikai jellemzők javítására.

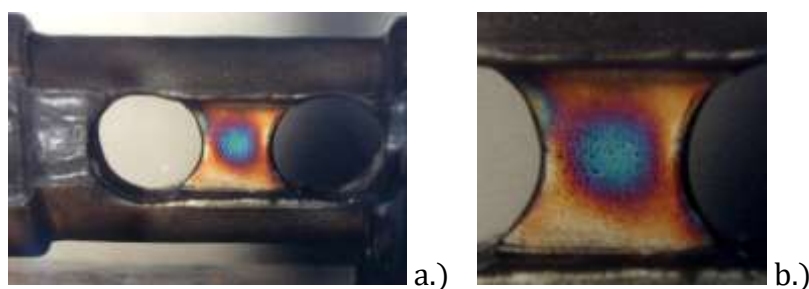
Az alábbiakban bemutatott példa - 'Kaliber' cella fejlesztése - egy meglévő mérőcella érzékenységének növelése érdekében elvégzett geometria módosítás nem kívánt hatásának feltárását, majd a korrekcióra tett javaslat utáni eredményt mutatja be [43].

A vizsgált mérőcellát, annak mérőtestét valamint a mérőfelületen elhelyezett nyúlásmérő ellenállásokat a 3.90. ábrán mutatjuk be.

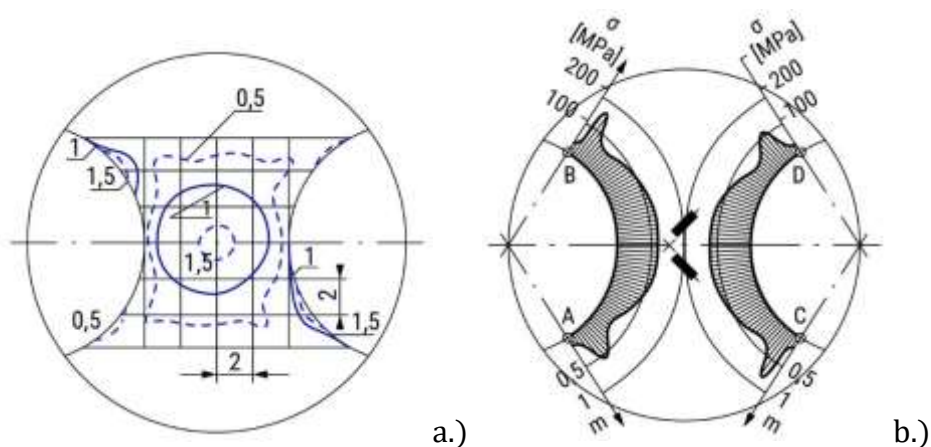


3.90. ábra Erőmérő cella mérőfelületének egy lehetséges kialakítása [43]

A 3.90. ábrán bemutatott mérőcella felső és alsó síkján lemunkálást látunk, amely utólagos megmunkálást annak érdekében hajtották végre, hogy növeljék a cella érzékenységét. Ez a hatás azonban nem következett be, így az eredeti (alsó – felső sarok lemunkálása nélküli, hengeres alak) valamint a módosított kivitel is vizsgáltuk. A 3.91. ábra mutatja az eredeti, hengeres geometriájú cellaalak mérőfelületének rétegbevonatos optikai feszültségállapotáról készített rendszámeloszlást. A kiértékelt feszültségállapotot a 3.92. ábrán mutatjuk be.



3.91. ábra Az eredeti cellaalak terhelte állapotának rendszámeloszlása
a.) cellatest és mérőfelülete, b.) mérőfelület rendszámeloszlása [43]



3.92. ábra Az eredeti cellaalak terhelte állapotának kiértékelt rendszámeloszlása
a.) összerajzolt rendszámeloszlás, b.) kiértékelt feszültség eloszlás [43]

Miután az eredeti (hengeres) cellatest mérő felületének feszültségeloszlása teljes szimmetriát mutatott, a mérőfelület geometriai közepén volt mérhető a legnagyobb igénybevétel, a nyúlásmérő ellenállásokat avagy mérőbéllyegeket is itt helyeztük el. Az érzékenység növelése érdekében módosított cellatest viselkedése eltért a várakozástól, azaz a mérőfelületen az igénybevételi maximum nem annak geometriai közepén volt mérhető, mint azt a 3.93. ábra mutatja.



3.93. ábra Módosított cellaalak mérőfelületének rendszámeloszlása [43]

Az érzékenység növelése érdekében végrehajtott egyszerűnek tűnő beavatkozás (alsó és felső síkok lemunkálása) az igénybevétel maximumának helyét jelentős mértékben megváltoztatta (a terhelő erő irányában, a mérőfelület geometriai középpontjából eltolódott). A megoldást a maximális igénybevétel helyzetének pontos ismeretében áthelyezett nyúlásmérő ellenállások jelentették.

3.4.4.8. Polimer szerkezetek vizsgálati lehetőségei

Korábbiakban alapvetően fémes szerkezeti anyagú alkatrészek voltak a rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálati méréseink tárgyai. Természetesen a módszer tetszőleges anyagok felszíni nyúlásainak elemzésére, feszültségeinek vizsgálatára is alkalmas. Ugyanakkor itt szükséges megjegyezni, hogy számos, a vizsgálati eredmények pontosságát befolyásoló hatást kell figyelembe vennünk abban az esetben, amennyiben a vizsgáló bevonat anyagjellemzői (főképpen rugalmassági modulusa) nagyságrendileg összevethetők a vizsgált szerkezeti elem anyagtulajdonságaival. Jelen dolgozat terjedelme nem ad lehetőséget a vizsgáló bevonat merevítő hatásának bemutatására, ugyanakkor irodalomban az ide vonatkozó elemzések és számítások fellelhetők, amennyiben a pontosság növelése érdekében (pl. egy tudományos vizsgálat igazolásakor) utólagosan eredményeink pontosítása szükséges [5], [44].

Ismételt hivatkozással a terjedelmi korlátokra, jelen fejezetben a polimer alkatrészek, valamint az erősített polimerek vizsgálati lehetőségei közül mutatunk be röviden néhányat, amiből az eljárás alkalmazhatósága megítélhető.

Vízszivattyú, polimer ház vizsgálata

Elsőként egy rendkívül összetett felszínű, alakos polimer alkatrész vizsgálatát adjuk közre. A szerkezeti elem korábban könnyűfémből készült, a tömegcsökkentési igény következtében készítették el alkalmasan megválasztott technológiával polimer alapanyagból. A szilárdsági számítások során - ahol azt a szerkezetre ható külső erők igényelték, - a megfelelő keresztmetszeti módosításokat elvégezték. A csatlakozó méreteken nem változtattak, így az új alkatrész csereszabatosan került a régi könnyűfém helyére. A gondosan elvégzett numerikus analízis az eredeti funkciónak történő megfelelést, így a helyettesíthetőséget igazolta. A szerkezeti elem beépítését követően igen rövid használat elteltével meghibásodott, megsérült, törés következett be. A rögzítés csavarkötéssel történt. Miután a törést követően elvégzett ismételt numerikus vizsgálatok sem találtak okot a meghibásodásra, a szerkezeti elemet rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálatnak vetették alá, üzemi beépítés (lefogás) és terhelések (belső túlnyomás alkalmazása) megvalósításával.

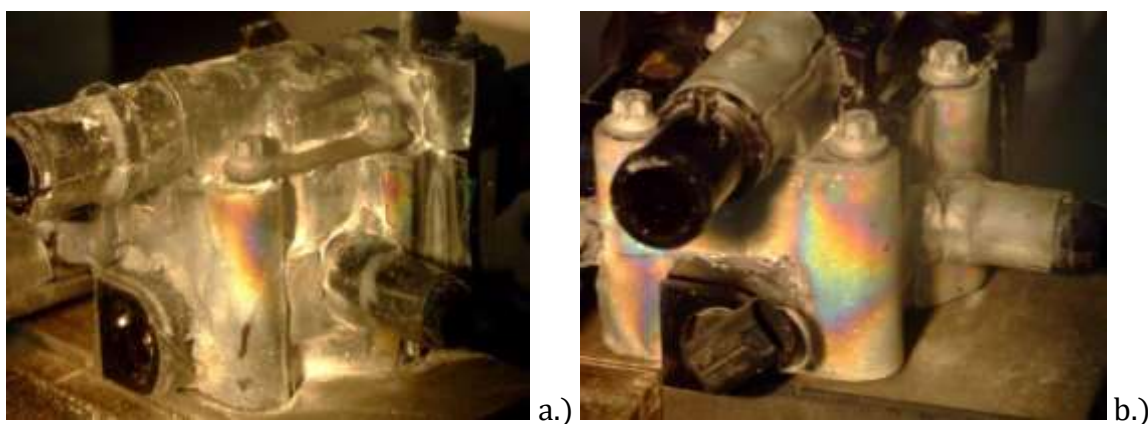
A vizsgált szerkezeti elemet, a mérésekhez elkészített vizsgálóréteget, valamint azok felragasztását követően a szerkezetet a 3.94. ábrán mutatjuk be.



3.94. ábra Optikai feszültségvizsgálatra előkészített polimer szerkezeti elem
a.) vizsgált szerkezeti elem, b.) elkészített vizsgáló bevonatok,
c.) felragasztott vizsgálóbevonattal ellátott szerkezeti elem [39]

A vizsgált szerkezeti elem igénybevétele a megfogásból (rögzítő csavarok által okozott nyomóerő), a szerelés során kialakuló járulékos igénybevételből (a rögzítés folyamatában fellépő összetett igénybevétel), valamint az üzemi teherből (a rendszerben keringő közeg okozta belső túlnyomás) tevődött össze. Összességében tehát megállapíthattuk, hogy egy szerelésből adódó igénybevételre szuperponált üzemi terhelés hatásait kellett vizsgálnunk.

Miután a szerkezetet tehermentes állapotában láttuk el az optikai feszültségvizsgálat rétegbevonati anyagával, az egyes terhelések egyenkénti vizsgálatára volt lehetőségünk. A vizsgált szerkezeti elem - beépítési körülményeinek megfelelő módon - vizsgálópadra történt rögzítésének eredményeként kialakult feszültségoptikai képét a 3.95. ábrán mutatjuk be.



3.95. ábra Polimer szerkezeti elem rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálatának rögzítéséről készült rendszámeloszlások két leszorító csavar környezetében [39]

A 3.95. ábra elkészítésekor a rögzítés (csavarok behajtása) műveletét folyamatosan nyomon követtük. A csavarozott kapcsolatról tudni kell, hogy itt annak kilazulás elleni biztosítását ún. fogazott alátétek (annak is a legyezős alátét típusa) hivatottak megoldani. A csavarozott kapcsolat meghúzása során a rögzített szerkezet igénybevétele így tehát a nyomóerőn kívül egy igen komoly csavarásból származó szuperponált hatásból tevődik össze. A számítások során a numerikus analízis figyelmen kívül hagyta a csavaró igénybevétel hatását, amely igénybevétel egyébként is a polimer alkatrészek egyik leginkább kerülendő fajtája.

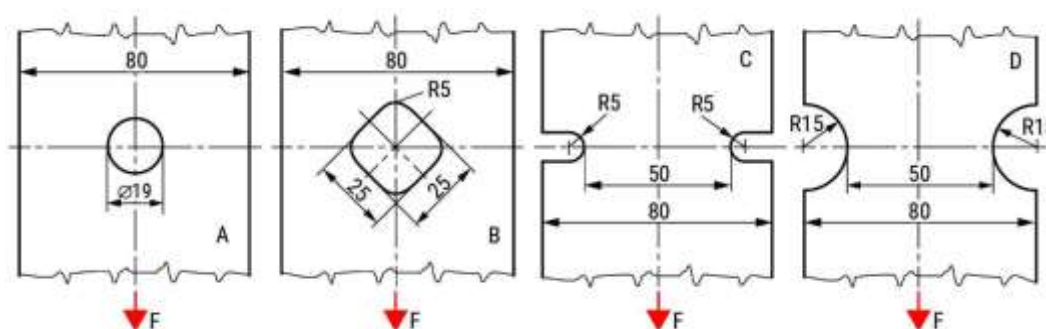
A tönkremenetel okára az alkalmazott mérés technikai eljárás rávilágított. A rögzítés - a csavarkapcsolat meghúzása során fellépő csavaró terhelés - hatása az igénybevételek számításakor nem hagyható figyelmen kívül, (az alkalmazott alátétől függetlenül, mértéke természetesen függvénye az alátét kialakításának, fogazott alátét esetén többszöröse a normál alátétének). Természetesen kilazulás ellen a csavarkapcsolatot biztosítani szükséges, amely más alkalmasan megválasztott műszaki megoldással megvalósítható.

Erősített műanyagok vizsgálata rétegbevonatos eljárással

Az erősített polimerek alkalmazása napjainkban általánosnak tekinthető. Az erősítés mikéntje vonatkozásában számos megoldás ismert, lehetnek rövid szálas, hosszú szálas, vagy paplan erősítések, de természetesen elmehetünk akár a nanostruktúrák alkalmazásáig. Konkrét esetek vizsgálata ebben a fejezetben nem indokolt, ugyanakkor általános érvényű szabályok felállítása lehetséges, amelyek elsősorban a zavarások, keresztmetszet átmenetek környezetére vonatkoznak. Alapelveként megállapíthatjuk, hogy az erősített struktúra akkor tudja várt hatását kifejteni, amennyiben annak elkészültét követően azt nem befolyásoljuk utólagos megmunkálással, azaz a struktúrákban beágyazott erősítő (merevítő) célú szálak a szerkezetekben sértetlenek maradnak.

A vizsgálódások tehát alapvetően a zavaró hatások környezetére kell hogy koncentráljanak. Ilyen hatások alapvetően a bemetszések valamint különböző okoknál fogva kialakított hengeres, vagy egyéb geometriájú áttörések, furatok.

A zavarások geometriai kialakításaira a 3.96. ábrán mutatunk példát.

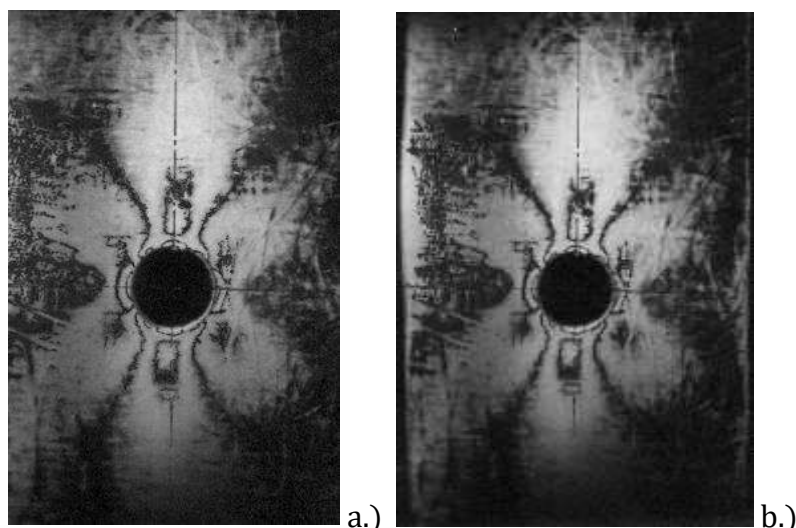


3.96. ábra Erősített polimerekben gyakran alkalmazott zavarások geometriai kialakítása [39]

A vizsgálatokat húzó igénybevételnek alávetett próbatesteken végeztük. Alapvetően úgynevezett paplan, valamint szálerősített (üvegszál) kötegekből elkészített próbatesteket vizsgáltunk, a zavarás környezetének figyelembevételével gyártott (a zavarás környezetében alakított), valamint a zavarást utólag, megmunkálással (szál átvágással) megvalósító kivitelek rendszámeloszlásának összehasonlításával. Célunk a terhelhetőség (húzó igénybevételi határállapot) vizsgálata volt annak eldöntésére, miként változnak a különböző kivitelek határállapot jellemzői.

A paplan erősített kiviteleknel (miután rendkívül rövid szálas, néhány tized *mm* szálhosszúságú elemekből álló paplanokról beszélünk) a zavarás figyelembe vételével gyártott, valamint a zavarást utólag, a kész szerkezetben kialakító kivitelek érdemben nem mutattak eltérést azonos terhelési körülmények között.

Ezek alapján elmondhatjuk, hogy a paplan erősítések (rövid szálas kivitelek) nem mutatnak érzékenységet azok átvágására (3.97. ábra).

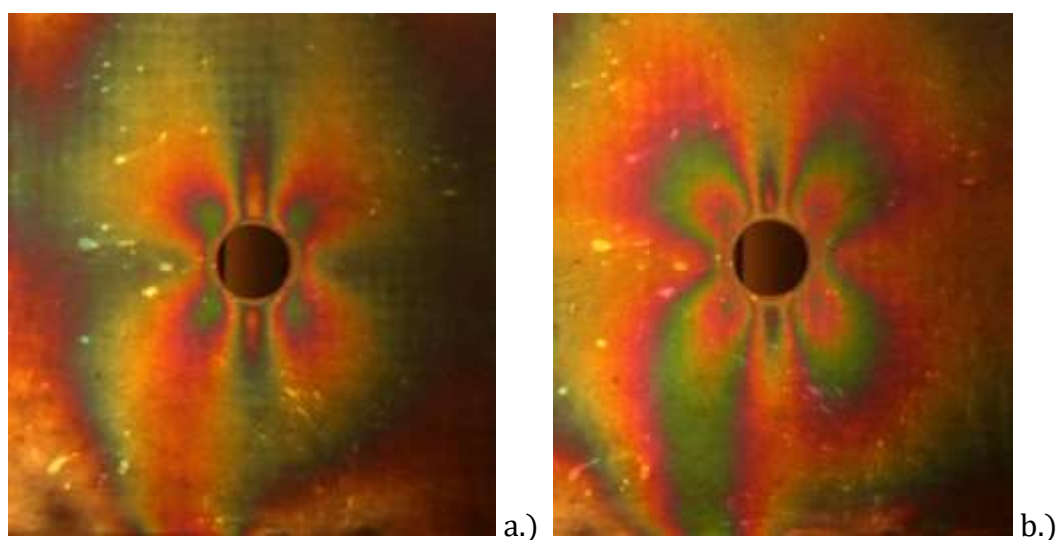


3.97. ábra Paplannal erősített polimerek terhelhetősége húzó igénybevételre,
a.) zavarás figyelembevételével gyártott kivitel rendszámeloszlás,
b.) utólag kialakított zavarás rendszámeloszlása [39]

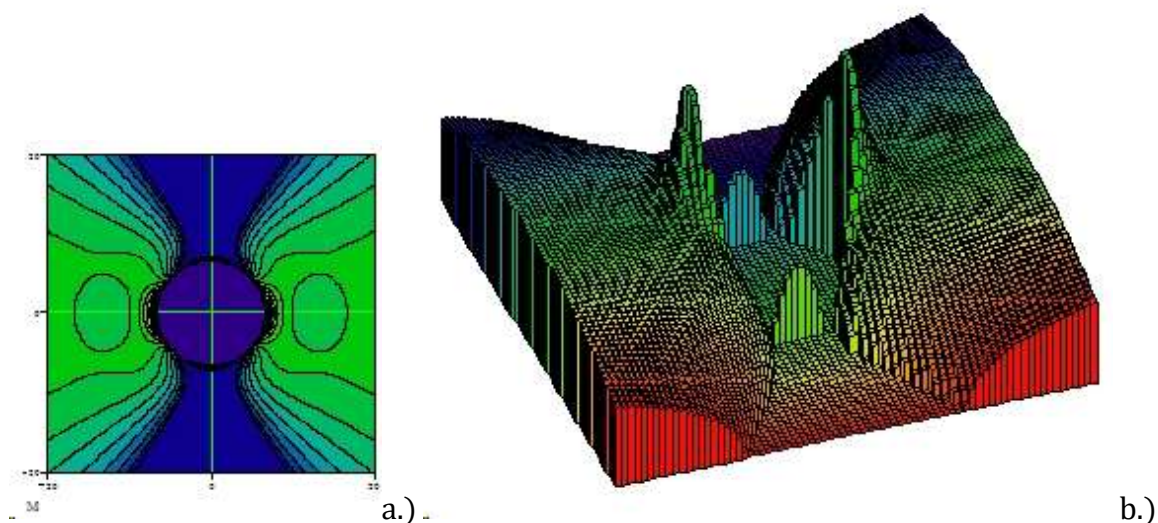
A szálak – jelesül hosszú szálak kivitelű - szöveterősítések tekintetében azonban jelentős változást tapasztaltunk a zavarás figyelembevételével gyártott, illetve az utólag kialakított zavarás hatásának elemzésekor (3.98. ábra, [39]).

Az utólagosan kialakított zavarás (erősítő szálak átvágása) mintegy 30%-al eredményezett nagyobb feszültséget a húzó próbatestben az eleve zavarás figyelembevételével gyártotthoz képest.

Természetesen a mérési eredmények numerikus szimulációját is elvégeztük, annak érdekében, hogy a peremfeltételek megfelelő megválasztására a mérési eredmények alapján lehetőséget tudjunk biztosítani. A furattal gyengített kivitel numerikus szimulációjának egy köztes állapotát a 3.99. ábra mutatja.



3.98. ábra Szöveterősített hosszú szálak polimerek terhelhetősége húzó igénybevételre,
a.) zavarás figyelembevételével gyártott kivitel rendszámeloszlása,
b.) utólag kialakított zavarás rendszámeloszlása [39]



3.99. ábra Erősített polimer próbatest furattal gyengítve, numerikus szimuláció
a.) számított rendszámeloszlás, b.) deformáció/feszültség térbeli megjelenítése [39]

3.4.4.9. Biomechanikai alkalmazások, valós csontállományok vizsgálatai

A biomechanikát viszonylag új, de mindenképpen önálló tudományterületnek tekinthetjük a hagyományos mérnöki területek sorában. Ebben a formában és tartalommal Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894) német orvos és fizikus nevéhez köthetjük a tudományterület megnevezést.

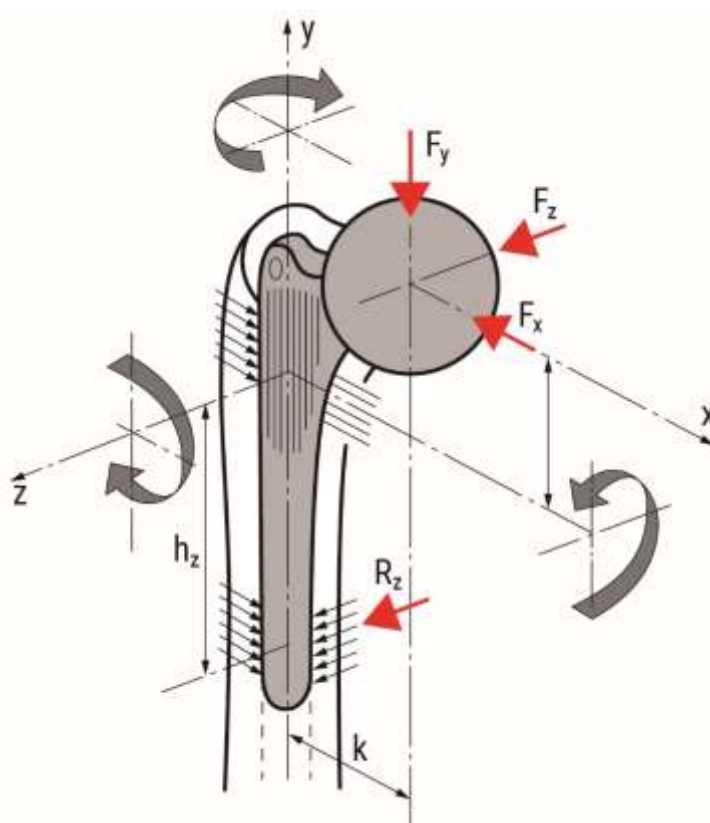
Tartalmát tekintve a biomechanika az élőlények mechanikai tulajdonságaival és ezek élettani szerepével foglalkozó tudományág. Az emberi test, szervezet felépítése bonyolult, komplex, mai tudásunk szerint a legfejlettebb élő organizmus, így sajátosságainak, működésének leírása több tudományág együttes alkalmazásával lehetséges. Az e témával foglalkozók a mechanika, anatómia, élettan, antropológia, informatika, jel- és képfeldolgozás, numerikus modellezés elméleti és gyakorlati kutatásainak, vizsgálódásainak eredményeit felhasználva tevékenykednek.

Az emberi és állati eredetű biológiai rendszerek, azok alkotó elemeinek vizsgálata során a talán a legfontosabb területek közé sorolható a humán gyógyászati eszközök, berendezések, implantátumok vizsgálata és fejlesztése, az anyagjellemzők meghatározása különböző vizsgálati körülmények között, makro és mikro szinten egyaránt. Jelen kiadvány tartalmi korlátai részletesebb betekintést nem tesznek lehetővé az életminőség javítása érdekében végzett kutatásokba, fejlesztésekbe, ezért most csupán néhány, csontstruktúrákon végzett vizsgálatba tudunk betekintést nyújtani.

Érdeemes a hazai vonatkozásokról is említést tenni ebben az összeállításban is.

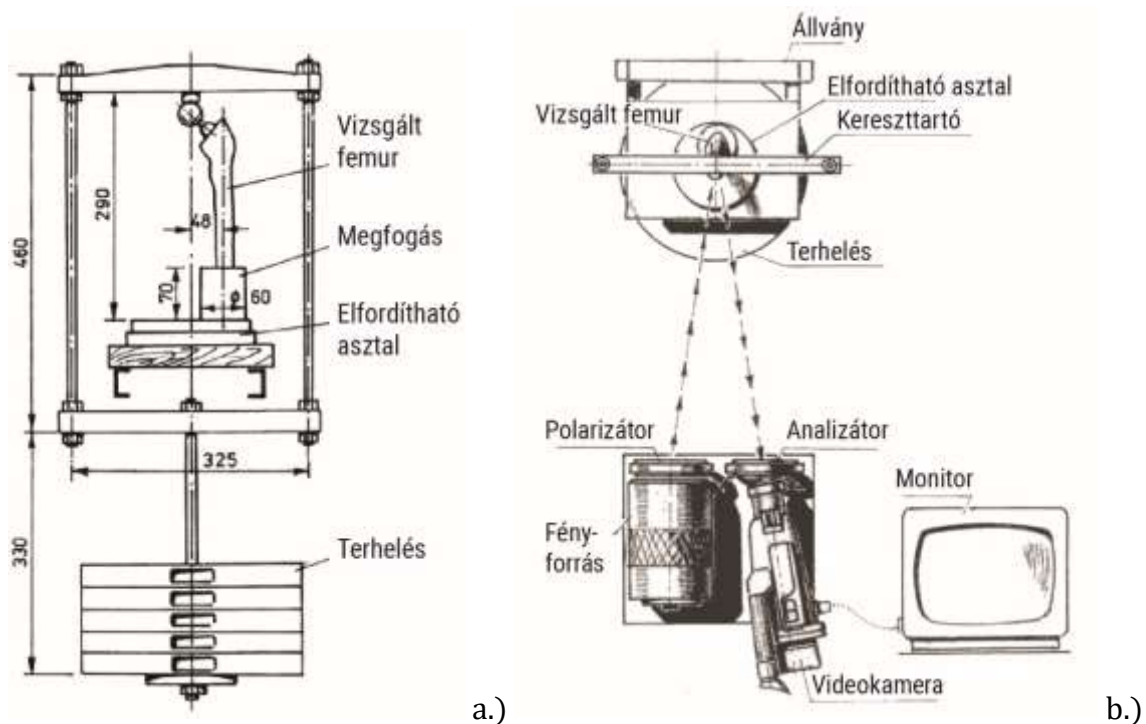
A témában érintett biomechanikai vizsgálatok kapcsán Prof. Dr. Huszár István (1923-2010) neve említendő, akit e vizsgálatok hazai úttörőjeként (1957-től e témában publikált munkáival, a Nehézipari Műszaki Egyetem majd a Gödöllői Egyetem munkatársaival) tekinthetünk.

Első közreadott kutatásunk és azok eredményei különböző kialakítású femur (combcsont) protézisek csontfelszínekre gyakorolt feszültséggyűjtő hatásainak vizsgálatát foglalták magukban. Ezeknek a vizsgálatoknak több szempontból is meghatározó jelentőséget kell tulajdonítanunk. Egyrészt rávilágítottak arra a tényre, hogy az alkalmazott protézisek méretezése során a mechanika törvényeinek hiányos ismerete (erők, nyomatékok hatásai) a beépítéseket követően számos meghibásodás forrása lehet (pl. implantátum törés), másrészt felhívták a figyelmet a beépítések során fellépő olyan hatásokra, amelyek a csont degradáció kiindulásául szolgálhatnak [45]. A femur protézisek mechanikai modelljét a 3.100. ábrán mutatjuk be.



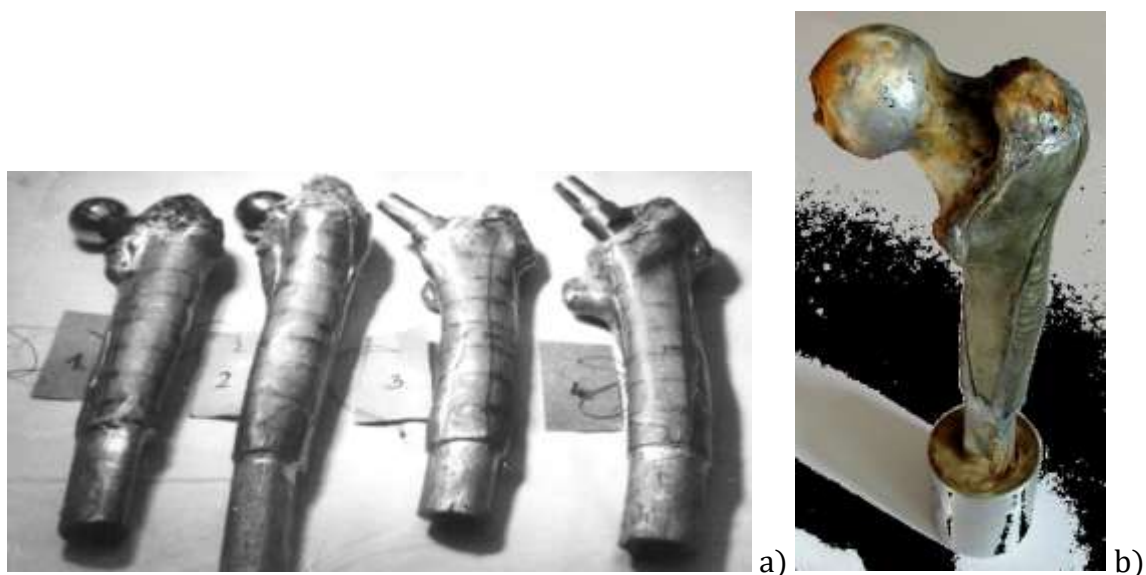
3.100. ábra Femur protézis mechanikai modellje [45]

Amint a 3.100. ábra mutatja, egy hat szabadságfokú rendszer hatásainak vizsgálata a feladat. Valamennyi külső, aktív igénybevétel (erő, nyomaték) felvételére az implantátum beépítési környezete alkalmas kell hogy legyen. A femur protézisek femur szárba történt beépítésének hatását rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálattal ellenőriztük, amelyhez az alkalmazott terhelő berendezést, valamint a mérés elrendezését a 3.101. ábra mutatja.



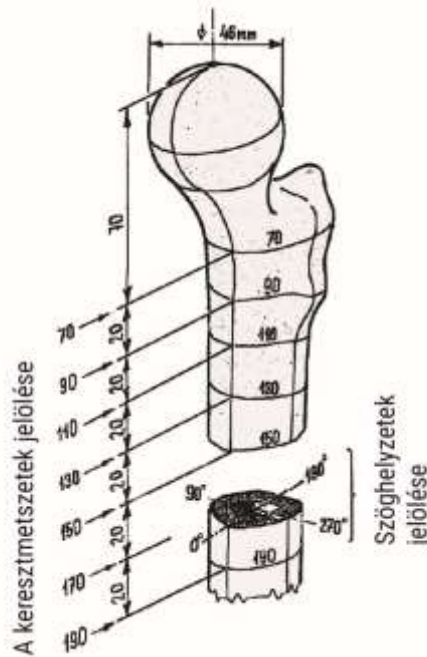
3.101. ábra Femur szárok vizsgálatára készített berendezés és mérés összeállítás
a.) terhelő keretben elhelyezett, megfogott vizsgálati darab,
b.) mérőberendezés összeállítás, reflexiós polarizskóp és képrögzítő rendszer [45]

A vizsgált femur szárok rétegbevonattal ellátott csontfelszínét – a referencia mérésekre szolgáló sértetlen femur szárral együtt – a 3.102. ábra mutatja.



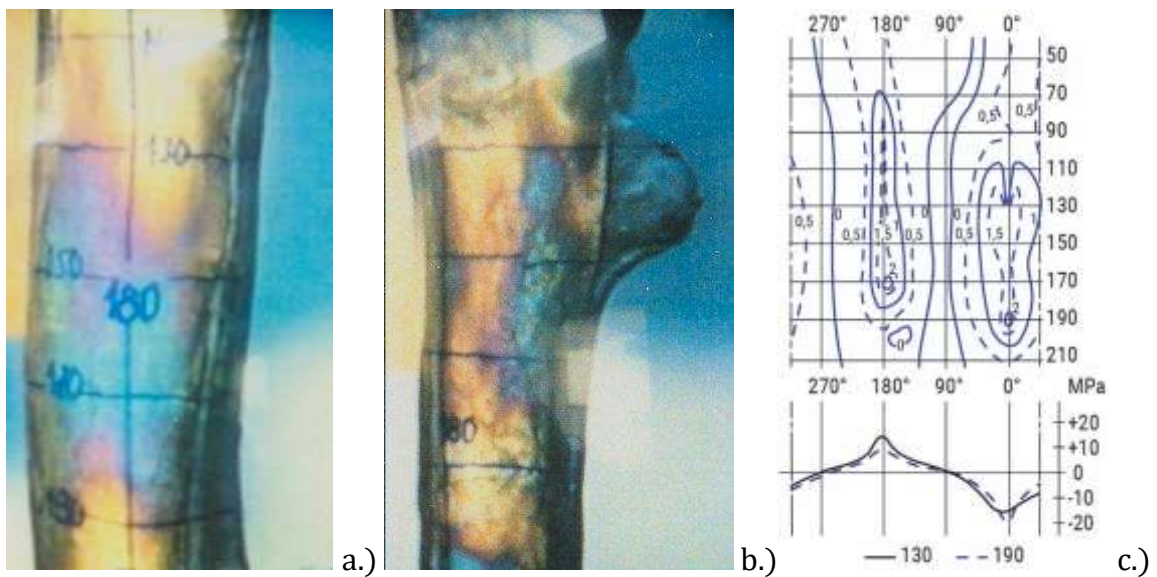
3.102. ábra Vizsgálatra előkészített femur szárok vizsgálóréteggel ellátva
a.) különböző femur szárral ellátott vizsgálati darabok,
b.) referencia mérések céljára szolgáló sértetlen femur [45]

A femur szárok igénybevételének, pontos elhelyezkedésének vizsgálatára azokat hálózattal láttuk el a 3.103. ábrán bemutatottak alapján [45].



3.103. ábra Femur száron alkalmazott sugárirányú és tengelyirányú hálórendszer [45]

A rendszámeloszlások alakulására, valamint azok kiértékelésére a 3.104. ábrán mutatunk példát.



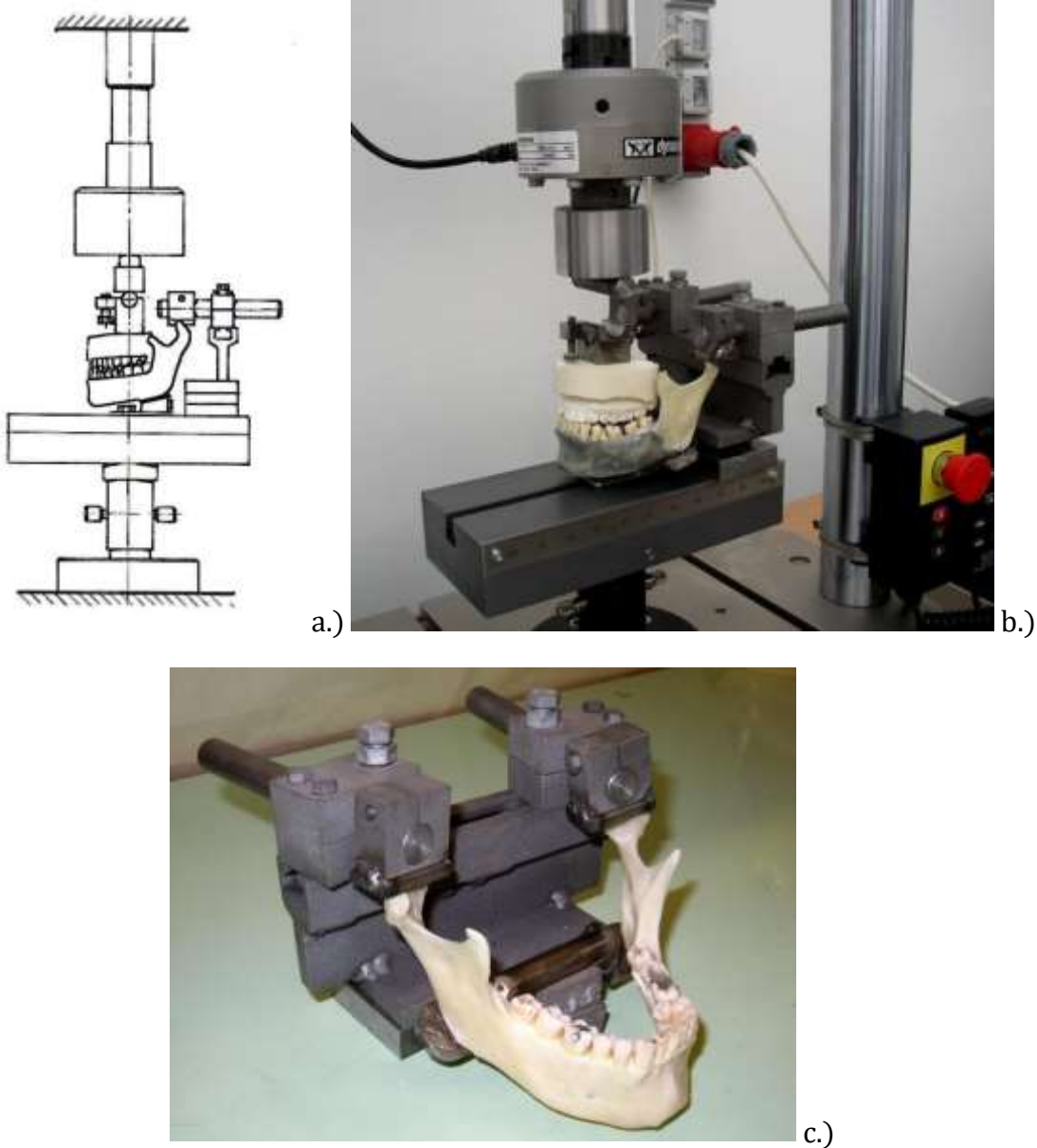
3.104. ábra Rendszámeloszlások és azok kiértékelése

a.) egész rendszámeloszlás femur szár közepső traktusán, b.) egész rendszámeloszlás femur szár fej környezetében, c.) összerajzolt és kiértékelt eloszlások [45]

Az elvégzett vizsgálatok eredményei feltárták az egyes femur típusok csontfelszínekre gyakorolt hatását (felületi feszültségek kialakulása, melyek a csontleépüléshez vezetnek), valamint lehetőséget biztosítottak megbízhatóbb, hosszabb élettartamú femur szárok kialakítására.

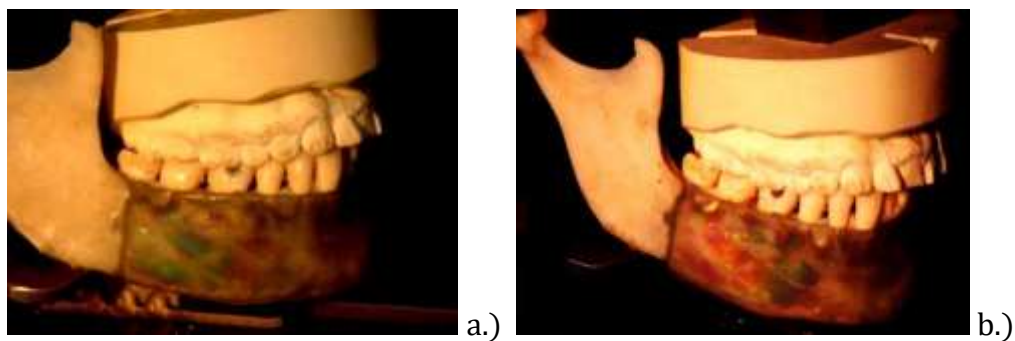
A következőkben az emberi állkapocs deformációs viszonyainak megértéséhez mutatunk be egy rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálatot. A mérések célja annak felderítése volt, miként hozhatók összefüggésbe az állkapocs harapása során kialakuló deformációk a fogpótlások során alkalmazott implantátumok meghibásodásával. Ahhoz, hogy a kérdés megválaszolásához közelebb kerüljünk, ismételten egy célkészüléket terveztünk – amelynek részletei most jelen munka kereteibe nem férnek bele – amely biztosította a felfekvő felületek hat szabadságfokú elmozdulását (3-3 elmozdulás, 3-3 elfordulás). A célkészülékbe befogott, rétegbevonattal ellátott állkapcsot (mandibula) terhelő berendezésben vizsgáltuk.

A vizsgálati elrendezést a 3.105. ábra mutatja.



3.105. ábra Mandibula vizsgálatára összeállított mérés elrendezés
a.) terhelés elvi összeállítása, b.) vizsgálgépben elhelyezett terhelő berendezés,
c.) terhelő berendezés vizsgált mandibulával [46]

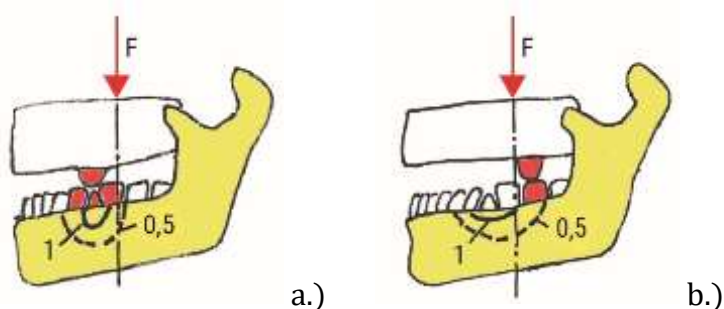
A terhelések során teljes felső állkapocs felfekvéssel létrehozott, valamint egyedi fogkapcsolatokkal megvalósított eseteket is vizsgáltunk. A terhelések során az irodalomra hagyatkozva határoztuk meg azok szélső értékeit [47]. A teljes felfekvésű felső állkapoccsal megvalósított terhelés 1250 N, valamint 1500 N értékéhez tartozó rendszámeloszlásokat a 3.106. ábrán mutatjuk be.



3.106. ábra Teljes állkapocs felfekvéssel megvalósított harapás
a.) rendszámeloszlás 1250 N terhelésnél,
b.) rendszámeloszlás 1500 N terhelésnél [46]

A teljes felfekvéssel megvalósított esetben 1500 N terhelő erőnél a felszíni deformációból számított feszültség értéke (1,0 rendszám) elérte a 20 MPa-t, ami már a korona rendszerek kerámia bevonatainak meghibásodását okozhatja [46].

Hasonlóképpen elvégeztük az egy fogkapcsolatra vonatkozóan a vizsgálatokat, itt természetesen a terhelő erő mértékét jelentősen csökkentettük addig az értékig, amíg a felszíni deformációk által okozott feszültség a mandibulában a kritikusnak nevezhető (a korábban jelzett 20 MPa) értéket el nem érte. A vizsgálatokból egy összerajzolt rendszámeloszlást mutatunk be a 3.107. ábrán.



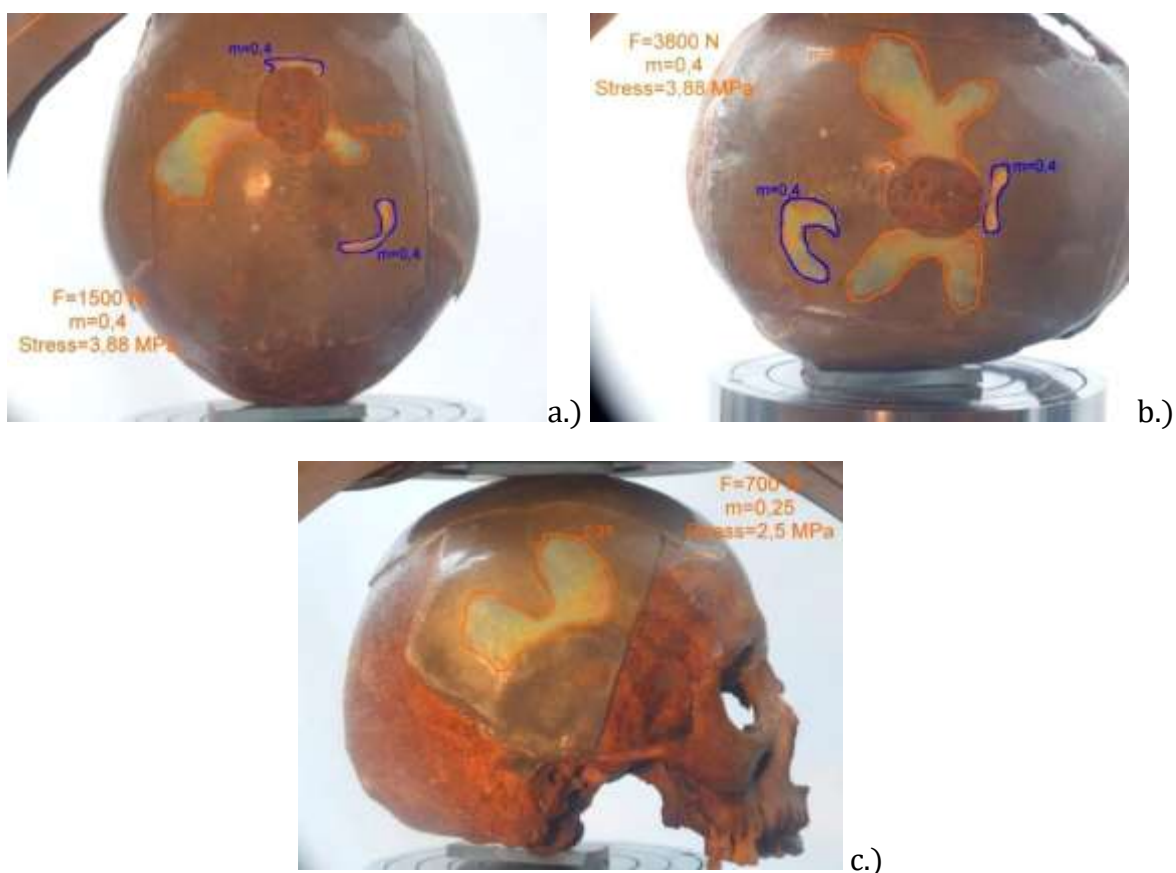
3.107. ábra Egyedi fogfelfekvések összerajzolt rendszámeloszlása 500 N terhelésnél
a.) 4. számú fog felfekvés, b.) 6. számú fog felfekvés [46]

A teljes fogfelületű harapások esetén a mandibula alsó területi része mutat nagyobb igénybevételt. Egyedi fogkapcsolatú harapások a fogtövek környezetében okoznak feszültség koncentrációt. A lefolytatott vizsgálatok a fogpótlások megvalósításában, valamint a hidak terhelhetőségének meghatározásában nyújtanak segítséget fogtechnikai szakmában érdekeltek számára.

A csontállományok vizsgálata sorában végezten a koponyák terhelhetőségének meghatározása érdekében végzett vizsgálatainkból mutatunk be néhány felvételt.

A koponyák törési okainak feltárása, az azokon keletkező sérülések vizsgálata évszázados kérdés a kutatók számára. Az 1830-as évektől kezdve találunk irodalmi adatokat a koponyatörések sajátosságainak feltárására. Az első átfogó munka Dr. René LE FORT (1869–1951) nevéhez fűződik, aki „Fractures de la Machoire Superieure” címmel (ETUD EXPERIMENTALE kiadvány) tette közzé vizsgálódásainak eredményeit. A koponyatörések sajátos csontkárosodások, amennyiben azok az összenövések környezetében jönnek létre. Úgy tekinthetjük, mint a tépőzárak felszakadását, amelyek visszazárására nincs lehetőség.

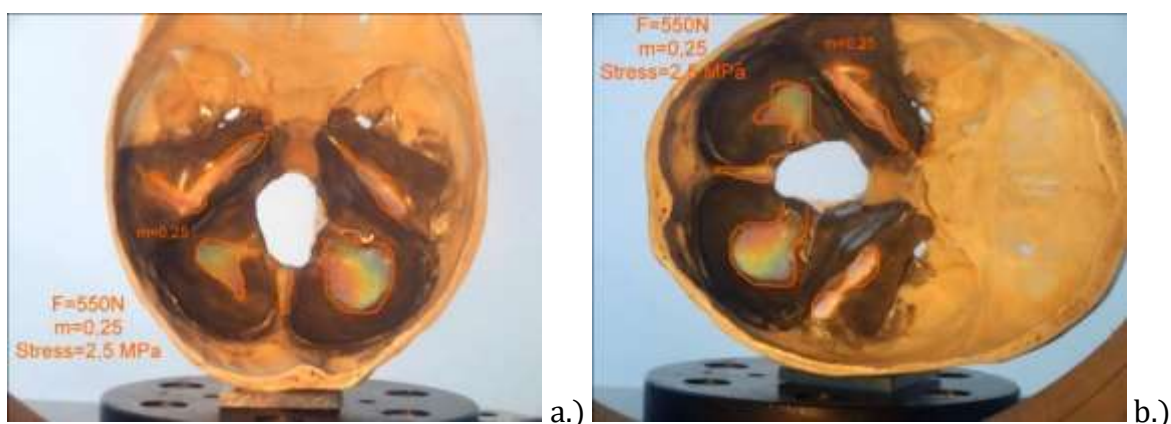
Vizsgálataink során három irányból terheltük a vizsgálat céljára kiválasztott darabokat, azok külső felületein, valamint a belső felületeken alkalmazott rétegbevonatok alkalmazásával. A tönkremenetelt hanghatás alapján határoztuk meg, azaz a jellegzetes reccsenő hang megjelenése jelentette a sérülés, törés állapotát. Ezekhez az állapotokhoz tartozóan rögzítettük a terhelés értékeit, valamint kiértékeljük az észlelt nyúlási állapotot. A koponya külső felületén elhelyezett rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálatainkból a 3.108. ábrán mutatunk példát.



3.108. ábra Koponya határterhelésének megállapítása érdekében végzett vizsgálatok
a.) koponya előlről terhelve, b.) koponya oldalról terhelve,
c.) koponya felülről terhelve [39]

A koponya tönkremenetelét okozó terhelés a három különböző irányban jelentősen eltérő. A legnagyobb terhelést oldalirányból viseli el a koponya, míg felülről terhelve a tönkremenetelhez ennek a terhelésnek az ötöde is elegendő. Ne feledjük, jelen kísérlet során a meghibásodási kritériumot az akusztikus jel (reccsenés) megjelenéséhez kötöttük. Fontos azt is észrevennünk és megjegyeznünk, hogy a feltételezett meghibásodáshoz tartozó feszültség értékek a koponya esetén igen kis értékek: hozzávetőlegesen 2,5 - 4,0 MPa tartományba esnek.

A vizsgálatokat elvégeztük a koponya belsejében – természetesen itt nyitott koponyatóval kell a vizsgálatot elgondolni – felragasztott rétegbevonatok esetén is, amelyekről néhány jellegzetes felvételt a 3.109. ábrán mutatunk be [39] az előlről, valamint oldalról terhelt koponya belső felületéről.



3.109. ábra Koponya belső felületén elhelyezett vizsgálóréteg rendszámeloszlásai
a.) előlről terhelt koponya, b.) oldalról terhelt koponya [39]

A belső felületen a tönkremenetelt okozó terheléshez tartozóan kialakult deformációs állapot, majd a feszültségállapot vizsgálatakor megállapíthatjuk, - természetesen figyelemmel a nyitott koponya szilárdsági viselkedésére – hogy a belül kialakuló tönkremeneteli határterhelések jelentősen kisebbek a külső felületeken észlelhetőknél. Megállapításaink összhangban vannak az irodalomban fellelhető adatokkal. Vizsgálati eredményeink mind az anatómiai ismeretekben, mind a különböző védőfelszerelések tervezésekor a terhelhetőségek meghatározásakor felhasználhatók.

4. Mellékletek

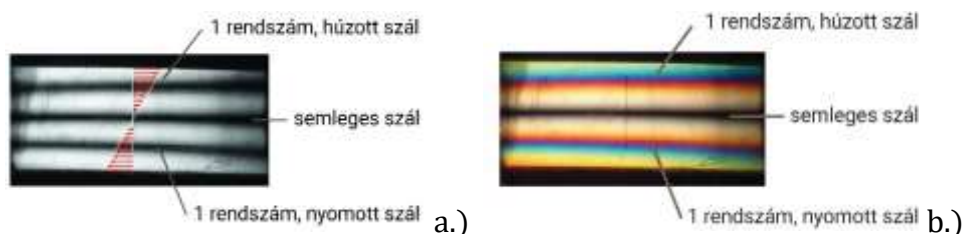
M1. Rendszámok értelmezése, kettőstörés

Jelen mellékletben bemutatjuk a rendszámok értelmezését, kitérve a homogén, áttetsző, izotróp anyagok kettőstörésének tulajdonságára is. Miután fénytani jelenségről beszélünk, a fény hullám és részecske természetének ismeretében annak hullámtermészetéből adódó sajátosságait vizsgáljuk. Mint a törzsanyagban röviden vázoltuk, a polarizációs optikai berendezésben kétféle fényforrást használhatunk: egy hullámhosszon sugárzó (monokromatikus), valamint fehér fényt sugárzó fényforrást. Jellemzően egy telepített polarizációs optikai berendezésben mindkét fényforrás rendelkezésre áll, ezek cseréje a vizsgálatok során lehetséges. Vannak - lehetnek - ugyanis olyan feladatok, ahol egyik vagy másik fényforrás alkalmazása a kísérlet kimenetele, eredménye szempontjából előnyösebb. Ilyen eset lehet például, amikor egy feladat megoldásánál nagyobb pontosságra törekszünk, ekkor az egyszínű fényforrás alkalmazása a célszerűbb. Azon esetekben, amikor egy általános benyomást szeretnénk kapni a vizsgált szerkezet nyúlás és/vagy feszültségi állapotáról, másként fogalmazva a terhelés hatására adott válasz reakciójára, ezen esetekben előnyösebb lehet a fehér fény megvilágító fényforrásként történő alkalmazása.

A kettős törés fogalmának megértéséhez közelebb jutunk, amennyiben a törésmutató változására emlékezünk fizikai tanulmányainkból. A gondolatkísérlet során kövessük az alábbiakat: öntsünk egy átlátszó üvegpohárba szintén átlátszó folyadékot, pl. vizet, majd ebbe a közegbe helyezzünk egy üvegpálcát. A pálca felfekszik az üvegedény alján, és megtámaszkodik annak belső peremén. Oldalról ránézve az összeállításra azt tapasztaljuk, hogy a víz felszínéhez érve az üvegrúd eddigi tengelyének iránya megváltozik, megtörik. Ezen jelenségnek az az oka, hogy a fény közeghatárhoz érve, azon átlépve, megváltozott sebességgel halad tovább, azt a látszatot keltve, mintha az üvegrúd megtört volna a levegő – víz közeghatáron. Felidézve fent leírtakat, máris közelebb jutottunk a kettőstörés fogalmának megértéséhez.

A homogén, izotróp, áttetsző/átlátszó anyagok terhelés hatására törésmutatójukat megváltoztatják, még pedig két kitüntetett irányban, a bennük kialakuló főnyúlás/főfeszültség irányában, amely jelenség polarizációs szűrők közé helyezett tárgyakon megfigyelhető. Ez a megfigyelés interferencia kép formájában történik, amit a tárgyon áthaladó polarizált fénynyaláb testbe belépő, majd az onnan kilépő fényhullámának időeltolódása következtében alakul ki. Ezen az interferencia képen megjelenő sávokat rendszámoknak nevezzük. Egységnyi mértékű eltérítés eredményeként kialakuló interferencia sávot hívjuk egységnyi rendszámnak.

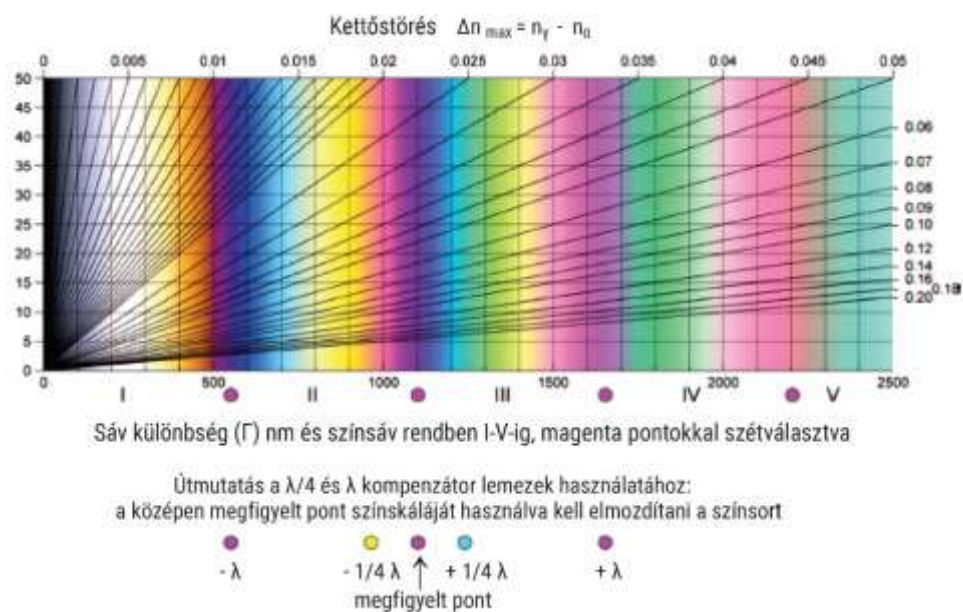
A rendszám tehát egy szintvonalas térkép magassági vonalainak feleltethető meg, ahol a kiindulási állapot a nyúlás és feszültségmentes helyzet. Egy tiszta hajlításnak kitett, négyponos terhelésű tartó középső, tiszta igénybevételű szakasza rendszámeloszlásának két különböző fényforrással megvilágított képét az M1.1 ábrán mutatjuk be, a feszültségállapot berajzolásával.



*M1.1. ábra Hajlított tartó rendszámeloszlása
a.) monokromatikus valamint b.) fehér fényű megvilágítás esetén*

Amint azt az M1.1. ábrán láthatjuk, a rendszám középértéke egyszínű fényforrás esetén könnyebben megjelölhető, hiszen a szürkeségi zóna középértékét kell meghatároznunk. Ugyanez a színes rendszámeloszlás esetén (fehér megvilágító fényforrás, a kioltott szín kiegészítőit látjuk) nem tűnik ilyen egyértelműnek.

A rendszám definiálásban van segítségünkre a [49] irodalomban bemutatott eljárás, amelyből a vonatkozó diagramot az M1.2. ábrán adjuk közre.



M1.2. ábra Kettőstörés egységnyi értékei fehér fényű megvilágítás esetén, a számított Michel-Lévy színskala [49]

Az egységnyi kettőstörésekhez tartozó színátmenetek (rendre 0,01; 0,02; stb.) megfigyeléséből láthatjuk, hogy növekvő rendszámok esetén egyrészt a színátmenetek eltolódnak az elsónél tapasztalathoz mérten, másrészt növekvő rendszámok esetén az intenzitás mértéke fokozatosan csökken.

M2. Használatos modellanyagok és mérés technikai jellemzőik

Az átvilágító, modellezési elven dolgozó optikai feszültségvizsgálat számos anyagot alkalmaz a vizsgálatokhoz. Az egyik legfontosabb jellemző az érzékenység, amely megmutatja az egységnyi kettőtörés (rendszer) megjelenéséhez szükséges terhelést (feszültségre kalibrálva), amely alapján dönteni lehet a megfelelő modellanyag kiválasztásáról. Az is fontos szempont, milyen vizsgálatra van szükségünk, nevezetesen az irányítást, vagy a rendszereket szeretnénk meghatározni. Széles skálája van az alkalmazható vizsgálati anyagoknak: az üvegtől a legkülönbözőbb polimer termékekig. A [9] irodalom igen alapos és lényeges információt tartalmazó összeállítását mutatjuk be az M2.1. táblázatban.

M2.1. táblázat
Modellanyagok és alkalmazásuk főbb jellemzői [9] alapján

Modellanyag			Feszültség-optikai állandó S (MPa/ rendszer/mm) $\lambda=546$ mm (zöld)	Rugalmassági tényező E (MPa)	Arányos- sági határ- feszültség (MPa)	Meg- engedhető feszültség (MPa)	Poisson tényező ν
Típus	Márkanév	Gyártó					
Üveg			110-130	60000- 70000	60	20	0,25
Polimetil- metakri- lát	Lucite, Plexiglas, Perspex	Röhm and Haas GmbH Darmstadt Németország	~130	2800-3200			0,38
Celluloid			30-60	1400-2800	28÷40	30	0,33
Epoxi gyanta	Araldit D	CIBA AG Basel Svájc	13-15	2600-3000	55	40	0,37
	Araldit B		10,5-11,4	3200-3800			
Poliészter gyanta	Homalite 100	Dynamit AG, Troisdorf Németország	24	3900	48	25	0,35
	VP 1527		23,5-25,5	3800-4200	50	25	
Poli- karbonát	Makrolon Lexan		7	2600	3,5	3	0,28
Allil diglicol gyanta	CR 39 Columbia resin Homalite 911	Homolite Corporation	14-16	1700-2200	21	20	0,4
Poliuretán gumi	Hysol		0,2	3	0,14		0,46
Zselatin			0,09	0,3			0,5

M3. Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat lehetséges bevonati anyagai

Az összeállítás kétkomponenses műgyanták bemutatását tartalmazza. A műgyantákkal szemben alapkövetelmény az átlátszóság, zsugorodásmentes polimerizáció (ez a tény gyakorlatilag kizárja adalékanyagok alkalmazását), megfelelő optikai aktivitás. Fenti feltételeknek az alábbiakban összegezett műgyanta típusok megfelelnek.

M3.1. táblázat
Bevonati anyagok a rétegbevonatos technikához [51]

Jelölés	Gyanta „A”	Térhálósító „B”	Gyanta mennyiség [gr]	Térhálósító mennyiség [gr]	Keverési előírás	Alkalmazási terület	Megjegyzés
T 4	Tipox 400	TH 6	10	4	öntés 115 °F (46°C); előmelegített vákuumozott A, B; előmelegített tálca	fémekre	
T 5	Tipox 400	TH 6	10	5	öntés 115 °F (46°C); előmelegített, vákuumozott A, B; előmelegített tálca	fémekre	
T 51	Tipox 400	TH 6 + HY 956	10	4 + 1	öntés 110 °F (43°C); előmelegített vákuumozott A, B; keverés után együtt is; előmelegített tálca	fémekre	
TE 6	Tipox 400	EPOFLEX B 001	10	6		polimerekre, viszkózus anyagokra	
A 2	Araldit D	HY 956	10	2		fémekre	
E 6	EPOFLEX A 001	EPOFLEX B 001	10	6		kemény, homályos, irányítókra	
V-3	Vilepox	Vilter	10	1,2	öntés 115 °F (46°C); vákuumozás nem szükséges; előmelegített tálca gyorsítja a polimerizációt	tiszta, áttetsző; fémekre, üvegre, természetes és mesterséges polimerekre	A4-hez: 150 „A” +18 „B”, 2,6 mm vastagsághoz

Példa, adatok és megjegyzések bevonati anyagok alkalmazáshoz:

A következő rövid összeállításban az A4 felületi méretű, 2,2 - 2,3 mm vastagságú bevonati anyag készítésére vonatkozó ismereteket adjuk közre, az alábbiak szerint.

Példa T51 használatára:

A gyanta komponensek kimérését célszerű műanyag poharakban elvégezni.

A térhálósítót az átöntési veszteség kizárása érdekében az „A” komponenshez, a gyantához keverve mérjük ki.

T 51 esetén A4 mérethez, 2,2 - 2,3 mm vastagságú bevonathoz 160 gr „A” komponens, 80gr TH 6, és 16 gr HY 956 szükséges. A „B” rész –térhálósító - össztömeg tehát 96 gr.

Megjegyzések:

1. A bekevert gyanta öntőtálcára öntésekor a műanyag pohár falán maradó veszteség kb. 10 gr.

Összeöntést követően a keverést 105 °F-ig (40 °C) kell folytatni, géppel, legalacsonyabb fordulaton.

A gép áramellátását külső kapcsolón át kell biztosítani és rögzített sebességfokozatba kell kapcsolni.

A poharat fel-le kell mozgatni keverés közben. 105 °F-nál (40 °C) vákuumozni szükséges 1 percre (a buborékképződés meggátlása érdekében).

A hőfokot folyamatosan ellenőrizni kell, 115 °F-nél (46 °C) lehet kiönteni a 100 °F-ra (38 °C) előmelegített öntőtálcára.

Kézi keverés esetén az eljárás a fentiekben leírt elvek szerint folyik.

2. Vilepox és Vilter használata esetén nincs szükség vákuumozásra. Ez a rendszer kevésbé érzékeny az öntőtálca előmelegítésének elmaradására.
3. A bevonatok feszültségoptikai állandója (egyres terminológiák szerint *k* jelöléssel is használják, jelen dolgozatunkban is használjuk), $S = 13,0 - 18,0$ N/mm tartományba esik, 2,2 - 2,3 mm bevonati vastagság esetén.
4. Ragasztó elkészítésekor a rendszer gyanta komponensébe - „A” komponens - alumínium pigmentet keverünk, a tükrösítés (a fény visszaverődésének fokozása) biztosítása érdekében.

A ragasztó keverési aránya: 100 gr AL porhoz (néhány mikron alumínium pigment méretű) 150 gr gyanta „A” komponens keverendő. Ezt követően az automata vagy kézi keveréssel (automata esetén legfeljebb 120 fordulat/perc beállításával), 15 percig kell keverni, míg fényes elegy nem keletkezik.

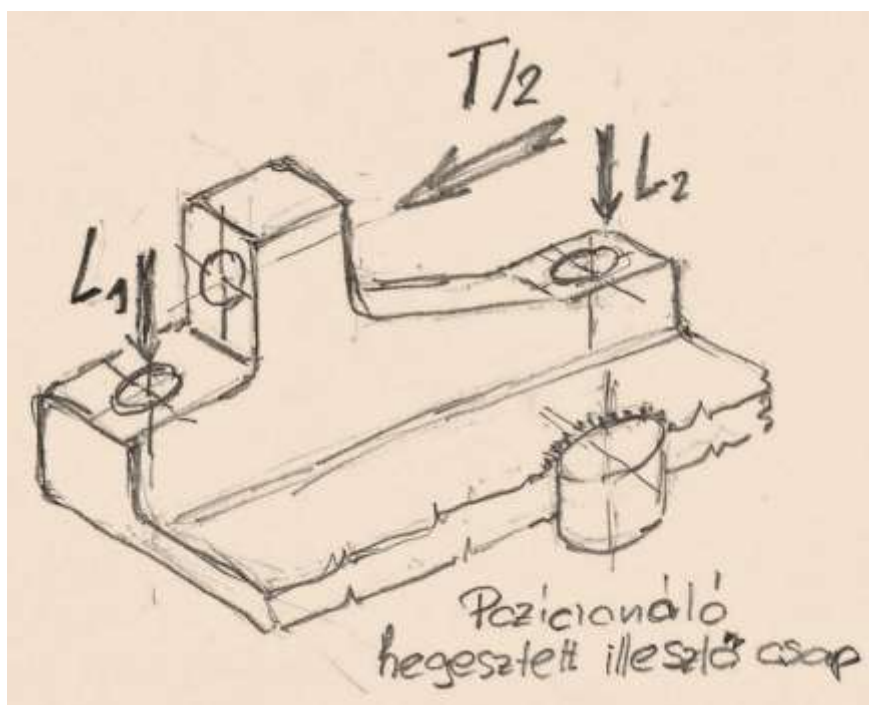
A4 méret ragasztásához az alábbi mennyiséget kell előkészíteni:

100 gr fényes elegyet (Vilepox-ra épülve) keverünk a térhálósítóval, 10 gr „B” komponenssel (Vilter), amíg a keverés közben a hőmérséklet 5,0 °C értéket nem emelkedik. Ekkor a ragasztás megkezdhető. Egyéb gyanták alkalmazásakor a keverési arány fentiek szerinti.

M4. Esettanulmány az eljárás konstrukció javításában történt alkalmazásáról

Jelen tanulmány egy, az autóbuszokon alkalmazott, öntött kivitelű bekötőbak vizsgálatának egyes fejezeteit mutatja be rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat alkalmazásával [48] alapján. A vizsgálat célja a meghibásodások (törések) okainak feltárása, ezt követően javaslattétel az okok megszüntetésére, valamint a javaslatok figyelembevételével egy módosított megoldás kialakítása, majd annak ismételt vizsgálata.

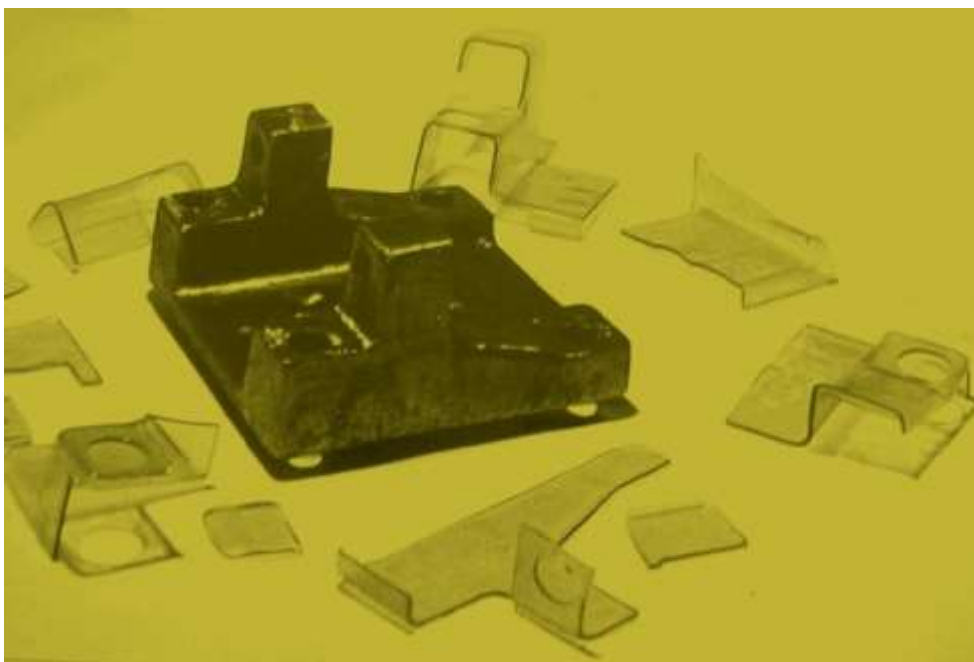
A vizsgálat tárgyát képező bekötőbak feladata toló- és fékerők felvétele valamint továbbítása. A bak távlati szabadkézi vázlatát, félnézetben bemutatott kialakítását az M4.1. ábrán adjuk közre.



M4.1. ábra Öntött bekötőbak távlati félnézeti szabadkézi vázlata [48]

A bekötőbakot az M4.1. ábrán látható módon egy behegesztett pozicionáló (H7/h7 illesztéssel) csap tájolja a megfelelő felhelyezés érdekében, majd 4 db lefogó csavarral rögzítik, előírt nyomatékkal meghúzva. A meghibásodások minden esetben a pozicionáló csap környezetében következtek be, oly módon, hogy a csap hegesztési varrata meghibásodott, a csap kitört. A meghibásodások elhárítására végzett korábbi változtatások, nevezetesen pozicionáló csap hegesztésének módosítása, a lefogó csavarok meghúzási nyomatékának növelése, nem vezettek eredményre.

A feladat megoldásaként a bekötő bakot, annak teljes felső felületét rétegbevonattal láttuk el. Az elkészített bevonat szegmenseket, valamint a bekötő bakot az M4.2. ábrán mutatjuk be [48].



M4.2. ábra Öntött bekötőbak vizsgálatára készített rétegbevonat szegmensekkel [48]

A feszültségoptikai rétegbevonat készítésének menetét az alábbiakban foglaljuk össze. Mindenek előtt meghatározzuk a bevonni kívánt felület nagyságát, abból a célból, hogy a rendelkezésre álló, A4 méretű öntőtálcákból mennyit készítsünk elő a bevonatok számára. Jelen számításunk azt mutatta hogy egyetlen A4 méretű elegendő lesz a 2,2 – 2,3 mm vastagságú bevonat elkészítéséhez.

Ezt követően az öntőtálcát előkészítjük. Az öntőtálca teflonbevonatú, így a műgyanta nem fog hozzá tapadni, azonban ezen túlmenően a formaleválasztást (bevonat leemelése a tálcáról) biztosítani kell. A tálc felületének zsírtalanítását követően formaleválasztó, (célszerűen valamilyen szilárd viasz) kezelés ajánlott.

Az öntőtálcát vízszintbe állítjuk a bekevert gyanta fogadására. Erre a célra pontos mérőeszközt kell használni. Szerencsés megoldás, ha az öntőtálcát a szintezéshez állító csavarokkal látjuk el. Fontos, hogy a megfelelő hőelvezetés érdekében az öntőtálca jó hővezetésű anyagból készüljön és kellően nagy legyen a tömege.

Az öntőtálca egy lehetséges kivitelét az M4.3.a.) ábra mutatja.



a.)

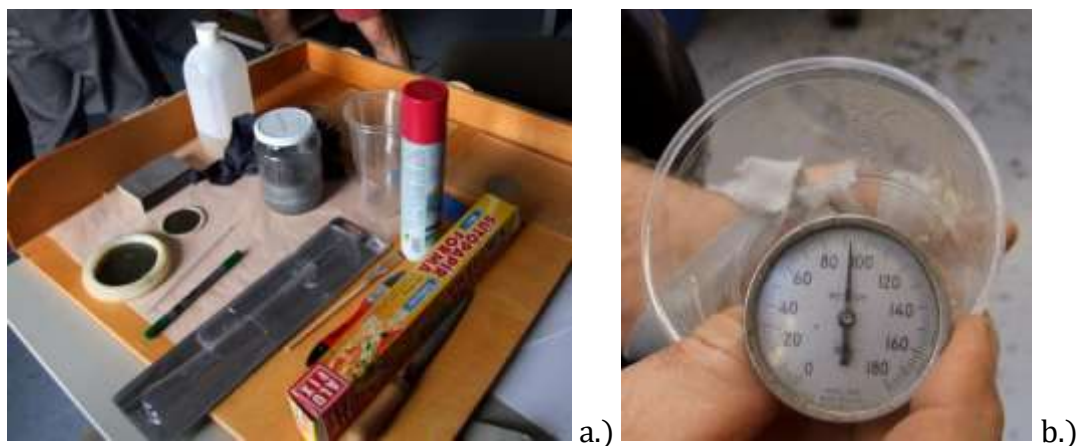


b.)

M4.3. ábra Öntőtálca szintbeállítással a.), valamint a vízszintező mérőeszköz b.) [50]

Ezt követően elkezdhető a bevonati anyag komponenseinek megfelelő kimérése és összekeverése. A szükséges eszközök gyűjteményéről egy fényképfelvételt az M4.4. ábrán mutatunk be.

A felvételen megtaláljuk a megfelelő mennyiség meghatározásához szükséges eszközöket (analitikai mérleg), a keverés eszközeit (poharak, keverők), polarizációs szűrőket a feszültségmentesség ellenőrzéséhez, valamint a kiöntés megfelelő állapotának (időpontjának) eldöntéséhez szükséges, a keveréshez is felhasználható hőmérőt.

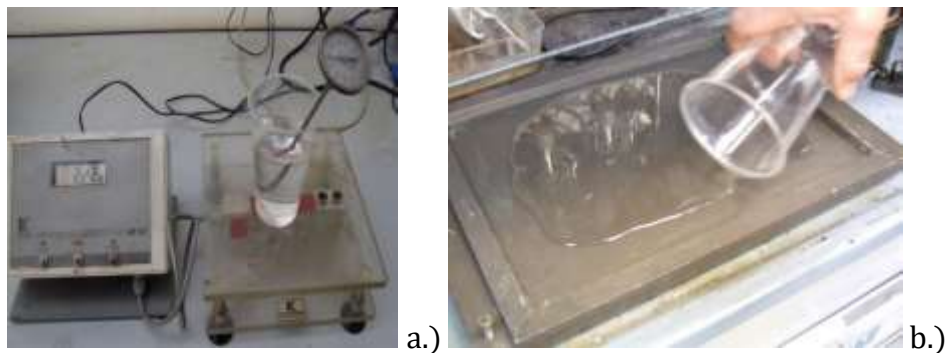


M4.4. ábra Rétegbevonat készítés eszközei [50]

Jelen munkánkban a Vilepox-Vilter rendszert alkalmaztuk, fém felületen történő méréshez.

Az A4 felület lefedésére szükséges mennyiség 2,2 - 2,3 mm rétegvastagság esetén (lásd M3.1. táblázat) 150 gr „A” + 18 gr „B” komponens. A táblázat megjegyzésében szereplő 2,6 mm elméleti érték, a bevonat készítése során mindig számolni kell rétegvastagság veszteséggel. A kimérés analitikai mérlegen vagy más, tizedgramm pontossággal mérő eszközön lehetséges. Az összekevert komponenseket, azok térhálósodási folyamatát a keverés közben hőmérővel ellenőrizzük. Amint eléri a 105 °F (40°C) értéket, kiöntjük az öntőtálcára (lásd még M3. mellékletben leírtakat).

A kimérés, keverés, valamint kiöntés folyamatát az M4.5. ábra mutatja.



M4.5. ábra Komponensek kimérése, keverése a.), valamint kiöntése b.) [50]

Az öntőtálcán levő gyantaelegy térhálósodása folytatódik, amely néhány óra időtartamot vesz igénybe. Annak megállapítása, hogy elérkezett-e a térhálósítás azon szakaszához, ahol felemelhető (levehető) a tálcáról és felformázható a vizsgált darabra, szálhúzással ellenőrizzük. Ez egy üveg pálcával történik, a bevonat egy kiválasztott sarkában. Belenyomjuk a pálcát óvatosan és ha annak kiemelésekor már nem húz szálát, akkor a bevonatot leemelhetjük, formázásra kész. (M4.6. ábra).



M4.6. ábra Formázásra kész bevonati anyag [48]

Az így felemelt bevonatot szegmensenként a vizsgált felületre formázzuk. Ennek megkezdése előtt a vizsgált munkadarab felszínét formaleválasztóval (pl. Szilikon spray) kezeljük annak érdekében, hogy a felformázott bevonat ne tapadjon rá a munkadarab felszínére.

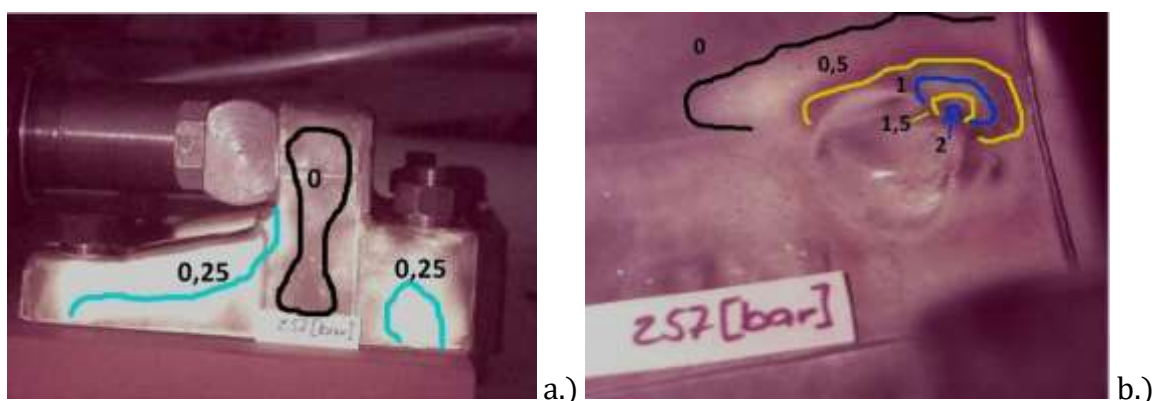
24 óra elteltével a bevonat szegmenseket leemeljük. Zsírtalanítjuk, majd a tükrösítő anyagot tartalmazó ragasztóval, ami gyakorlatilag megegyezik a bevonat gyantájával azzal a különbséggel, hogy annak „A” komponensébe alumínium pigment port keverünk, majd ehhez az elegyhez tesszük hozzá a térhálósító komponenst. A keverés szabályai megegyeznek a bevonat készítésekor leírtakkal (lásd még M3.).

Ezt követően a bekötő bakot célkészülékben, üzemi terhelésének megfelelő nyomóerővel, hidraulikus munkahenger alkalmazásával terheltük. A terhelés módjáról készült felvételt az M4.7. ábra mutatja.



M4.7. ábra Vizsgálatra kész bekötőbak [48]

Rögzítettük a terhelés hatására kialakult rendszámeloszlásokat, melyekből két jellegzetes ábrát az M4.8. ábrán mutatunk be.

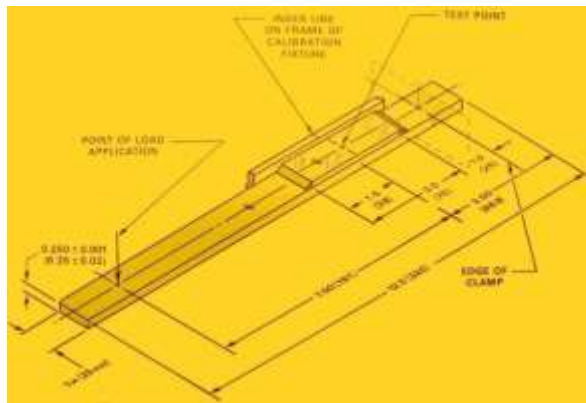


M4.8. ábra Rendszámeloszlások a bekötő bak terhelésekor annak oldalfelületén a.), és talplemezén b.) [48]

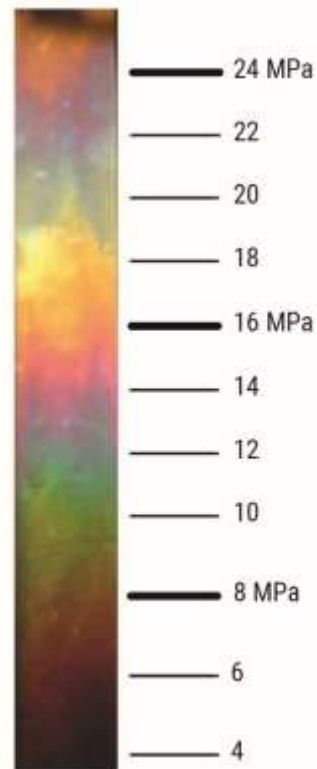
A talplemez illesztő csapjának környezetében, helyi felfekvésre utalóan megjelent a második rendszámérték. A kialakult rendszámeloszlást az alábbiak szerint értékeljük. Első lépésként kalibrálással összerendeljük a szín-sáv értékeket (a rendszámokat) a terhelés, valamint geometriai adatok alapján a számítható feszültségértékekkel. Erre minden esetben szükségünk van amennyiben egy új öntést készítünk, melynek pl. vastagsága eltér a már korábban vizsgált, így ismertnek feltételezhető rendszám – feszültség kapcsolat értékétől. A kalibráló készülék egy hajlító berendezés, amelyben ismert geometriájú kalibráló pálcára felragasztott rétegbevonatban terhelés hatására mérhető rendszámeloszlást (M4.9. ábra) kötjük a hajlított tartó terhelésekor (lehajlásakor) számítható feszültség értékhez. A kalibrálást követően tehát rendelkezésünkre fog állni a vizsgálati anyagunk optikai kalibrálási állandója, vagy más terminológia használatával érzékenységi mutatója (k vagy S érték az irodalomban).



a.)



b.)



c.)

M4.9. ábra Kalibrálás eszközei

a.) kalibráló (hajlító) készülék, b.) kalibráló pálc,
c.) kalibrálás során mért színsáv (rendszer) eloszlás [50]

Az M4.10. ábrán a kalibráló pálcán be van jelölve az a pont, ahol a számítással meghatározott és a mért értéket egymásnak megfeleltetjük. (Erre a pontra számítjuk ki a hajlított tartóban keletkező feszültséget.)

Az ábra jobb oldali részén egy olyan kalibráló pálcát mutatunk be, ahol annak teljes felületére ragasztottunk bevonatot, így a teljes lehajlás szakaszában nyomon tudjuk követni a kialakuló rendszer értékeket és azokat feszültség értékekhez tudjuk rendelni.

A rendszerokból a feszültségre történő számítás menete az alábbiakban követhető nyomon.

A mérési eljárás alapfeltevése: ha a vizsgált alkatrész felszínén (annak szélső szálában) kialakuló alakváltozást azzal azonos módon a rá ragasztott bevonat átveszi, így amennyiben a felszíni megnyúlást mérni tudjuk a rétegbevonattal, ez esetben a két anyag (vizsgált anyag valamint vizsgálóréteg) anyagjellemzőinek ismeretében a terhelés hatására kialakuló rendszerértékeket feszültséghez tudjuk kötni.

A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat alkalmával vizsgálatainkra az általunk kifejlesztett és acélszerkezetek mérésére általánosan alkalmazott réteganyagot használtuk.

Az alkalmazott réteganyag érzékenységi mutatója a vizsgálóréteg anyagának kalibrálása alapján, $d = 2,6$ mm rétegvastagság esetén $k = 780 \mu\text{Strain}$ (azaz $0,78 \cdot 10^{-3}$ mm/mm) értékre adódott. A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat alapösszefüggése szerint a rétegbevonattal ellátott felszín bármely felszíni pontjában az érzékelt fajlagos nyúlás az (M1) összefüggéssel számítható.

Nyúlásmérési eredményeink feszültségre történő átszámításakor a vizsgált szerkezet anyagának $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa értékű rugalmassági modulus, és $\nu = 0,33$ Poisson- tényező értékének feltételezésével számoltunk, mikor is az egységnyi rendszámhoz tartozóan ($m = 1$ esetére, ennek színe a lila átmenet a felvételeken) feszültségértékre az alábbi összefüggés érvényes:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = m \cdot k \quad (\text{M1})$$

ahol:

m - a vizsgált pontban észlelt színsáv rendszámértéke,

$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ - a vizsgált felszíni pont főnyúlásainak különbsége.

$$\sigma = \sigma_1 = \frac{k \cdot E}{1 + \nu} \quad (\text{M2})$$

behelyettesítve:

$$\sigma = \sigma_1 = \frac{0,78 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^5}{1 + 0,33} = 123,16 \text{ MPa}$$

A kapcsolat a főnyúlások (ε_1 és ε_2) valamint a főfeszültségek (σ_1 , és σ_2) különbsége között az (1) és (2) összefüggések alapján:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1 + \nu} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = m \frac{kE}{1 + \nu} \quad (\text{M3})$$

ahol:

E - a vizsgált felület anyagának rugalmassági modulusa,

ν - a Poisson-tényezője.

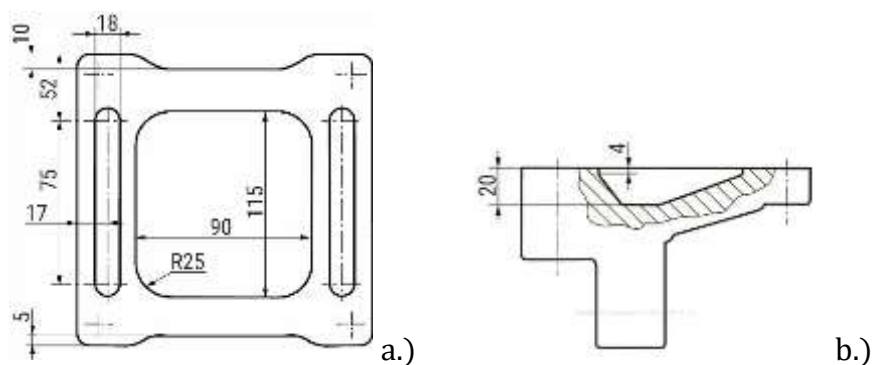
Összefoglalva tehát: az észlelt rendszámot annak egységéhez tartozó feszültség értékkel felszorozva megkapjuk a felszínen mérhető feszültség értékét.

Ezek alapján elemezve a M4.8. b.) ábrán látott és rögzített rendszámeloszlást megállapíthatjuk, hogy az illesztő csap környezetében igen magas, 250 MPa-t meghaladó feszültségkoncentráció jelentkezik. Ugyanakkor a bekötő bak oldalfelületén elenyésző, mintegy 30 MPa érték mérhető, ami meglehetősen csekély érték üzemi terhelés esetén. A feszültségoptikai képek elemzése alapján azt a döntést

hoztuk, hogy a konstrukciót jelentős mértékben átalakítjuk. Mivel a bekötési és rögzítési pontokhoz, elhelyezkedésükhöz nem nyúlhattunk, az adott geometrián belül alakítottunk ki egy egyenszilárdságot jobban megközelítő kivitel.

A bekötő bak támaszainak belső felületéből kimunkáltunk valamint az állandó meghibásodást okozó tájoló csapot a talprésszel együtt eltávolítottuk.

A tájolást a felfogó csavarok közül 2 db illesztett hengeres felületű csavarral oldottuk meg. Az átalakított konstrukciót az M4.10. ábra mutatja [48].



M4.10. ábra Módosított bekötő bak a.) alulnézete és b.) oldalnézete

A módosított bekötő bakot, a lefogásokra alkalmazott csavarokkal az M4.11. ábrán láthatjuk.



M4.11. ábra Vizsgálatra kész bekötőbak [48]

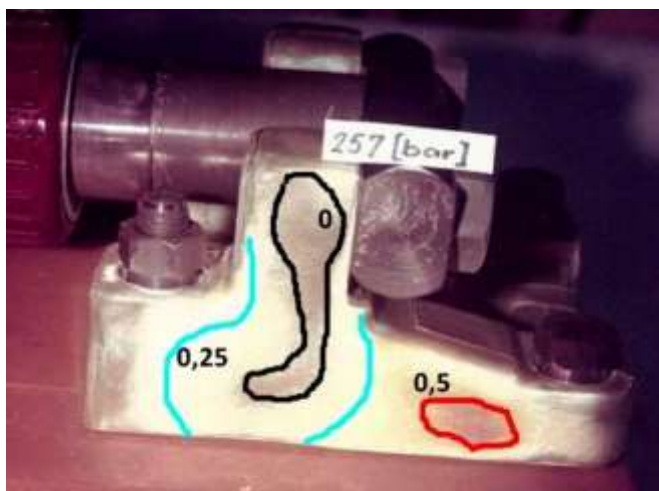
Az így átalakított bekötő bakot ismételt ellenőrzésnek vetettük alá, elsősorban annak vizsgálatára, hogy az egyenszilárdság elvének alkalmazásával létrehozott konstrukciós módosítás megfelelőnek bizonyult-e.

A vizsgálóréteggel ellátott, átalakított bak fényképét az M4.12. ábra mutatja.



M4.12. ábra Átalakított (könnyített) bekötő bak vizsgálóréteggel [48]

Miután a talp tájoló csapja, mint hibaforrás megszűnt, elegendő volt a talp homloklapfelületét ellenőrizni. Az erről készült, összerajzolt rendszámeloszlást az M4.13. ábrán mutatjuk be.



M4.13. ábra Átalakított (könnyített) bak oldalfelületének összerajzolt rendszámeloszlása [48]

A kiértékelés alapjául szolgáló összefüggés ismeretében láthatjuk, hogy a leginkább igénybevett területen sem lépi túl a feszültség a 70 MPa értéket.

Azt is megállapíthatjuk, hogy az oldalfelület feszültségeloszlása egyenletesebbé vált, ugyanakkor a feszültség mértéke megnyugtató 30 MPa szinten volt. Összességében beavatkozásunk mintegy 23% tömeg megtakarítását jelentett. Miután a bak a következőkben is öntési technológiával készült, így a változtatáskor alkalmazott tömegcsökkentés a bak támasz felületeinek belsejében a tömeggyártáskor nem okozott járulékos megmunkálási költséget (erre a formára öntötték).



M4.14. ábra Módosítás előtti kivitel felülről, (bal oldali alkatrész) – módosítást követő kialakítás, alulról (jobb oldali alkatrész) [48]

M5. Fogalmak és jelölések jegyzéke

Fogalom	Értelmezése
analizátor ($\lambda/2$)	kitüntetett irányának megfelelő síkban jut át rajta a fényhullám
epoxy gyanta	több célra felhasználható polimer
fehér fény (egyes terminológiákban színtelen fény)	a fehér fény összetett, a látható színek színeinek keveréke, üvegprizma segítségével színeire bonthatjuk, ez a színszóródás jelensége
generatív tervezés	tervezési paraméterek ismeretében alternatívák sokaságának megjelenítés e célra fejlesztett programokkal
izoklínák (izoklín vonalak/sávok)	a kialakuló nyúlás/feszültség állapot irányát megmutató sávok
izokromáták (izokróm vonalak/sávok)	terhelés hatására változó kettőstörés mértéke
izotrópia	a tér minden irányában anyagtulajdonságok tekintetében azonos anyagtulajdonságok, azonos viselkedés
kettőstörés	terhelés hatására két kitüntetett irányban mutatott eltérő törésmutató
monokromatikus fénynyaláb	monokromatikus, vagy egyszínű az a fénynyaláb, mely minden részecskéjének frekvenciája azonos
negyedhullám lemez ($\lambda/4$)	negyedhullám fáziseltolást megvalósító szűrő
ortotrópia	az anyagtulajdonságok egymásra merőleges három tengely mentén eltérőek, egymástól függetlenek
polarizáció	térben minden irányban egyenletesen terjedő fényhullám adott síkba rendezése
polarizátor ($\lambda/2$)	kitüntetett irányának megfelelő síkban jut át rajta a fényhullám
rendszám	kettőstörés mértéke
trajektória	iránysávokból összerajzolt, egymásra merőleges hálózat, amely minden pontjában húzott érintője és az arra merőleges a főirányokat jelöli ki

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
a	repedés mérete	mm
A	fényhullám amplitúdó (szöghelyzet függő)	m
C_1, C_2	a vizsgálati anyag 1. és 2. irányokban mérhető feszültségoptikai jellemzői	-
E	rugalmassági modulus	N/mm ² v. MPa
F	terhelő erő	N
I	fény intenzitás mértéke (polarizátorok egymáshoz viszonyított helyzete függvényében)	%
k	az alkalmazott réteganyag érzékenységi mutatója	μStrain
K_C (K_{IC} ; K_{IIIC} K_{IIIIC})	törési mód függvényében kialakuló kritikus (c , vagy <i>krit</i>) feszültség intenzitási tényező, (indexben: <i>I, II, III</i> , lehetséges törési módok)	MPa√mm
m	a rendszám rendje, lehet egész (0, 1, 2,...) és fél (0,5; 1,5; ...) értékű a polarizátorok egymáshoz viszonyított helyzete függvényében	-
n_0	a terheletlen állapotban mért kettőtörés mértéke,	-
n_1, n_2	a főirányokban mérhető kettőtörés mértéke (1. főfeszültség, 2. főfeszültség irányában)	-
S	feszültségoptikai arányossági tényező	N/mm
ν	modell vastagság	mm
σ_1 és σ_2	főirányokban a főfeszültségek	N/mm ² v. MPa
σ_{0krit}	a repedés pillanatához tartozó kritikus feszültség értéke	N/mm ² v. MPa
ε_1 és ε_2	a relatív nyúlások a főirányokban	μStrain, (10 ⁻⁶ mm/mm)
ν	Poisson tényező	-

5. Irodalomjegyzék

- [1] Borbás, L.: Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat fejlesztése száloptika alkalmazásával. Ph.D. értekezés, BME Közlekedésmérnöki Kar, 2002.
- [2] Thamm, F., Ludvig, Gy., Huszár, I., Szántó, I.: A szilárdságtan kísérleti módszerei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
- [3] Borbás Lajos: Járműfelépítmények vizsgálata fejezet. TÁMOP 4.1.2 „Egységesített jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés”, www.tankonyvtar.hu
- [4] Csiszár Imre: előadás, SZTE Ságvári E. Gyakorló Gimnázium, Szeged, 2006 szeptember.
- [5] F. Zandmann, S. Redner, J.W. Dally: Photoelastic Coatings. Society for Experimental Stress Analysis, Westport, 1977.
- [6] Oppel, G.: Das polarisationsoptische Schichtverfahren zur Messung der Oberflächen Spannung am Beanspruchten Bauteil ohne Modell. V.D.I. Zeitschrift 28.sz.1937.
- [7] Kuske, A.: Verfahren der Spannungsoptik, Deutscher Ingenieur-Verlag GmbH. Düsseldorf. 1951
- [8] F. Zandmann, S. Redner, J.W. Dally: Photoelastic Coatings. Society for Experimental Stress Analysis, Westport, 1977.
- [9] Nagy Sándor: Kísérleti és numerikus feszültséganalízis. A műszaki mechanika néhány kísérleti módszere. Optikai feszültségvizsgálat. Miskolc 1999. Tempus S_JEP_11271 Projekt támogatásával
- [10] Vishay Buletin, 060 Series, modular transmission polariscope
- [11] Vishay Buletin, Series 500 transmission polariscope
- [12] Huszár István, Thamm Frigyes, Borbás Lajos: 25 éves a feszültségvizsgáló bizottság. GÉP, 1989. Budapest, XLI évfolyam, 9. szám. Szeptember.
- [13] Thamm Frigyes: Kísérleti vizsgálatok, optikai feszültségmérés. Egyetemi jegyzet, Műszaki Mechanika Tanszék, 1975. BME, Budapest, Hungary
- [14] <https://classes.mst.edu/civeng2200/lessons/12/photoelasticity/index.html> (megnyitva: 2020. május 15.)
- [15] Thamm Frigyes: Optikai módszerek a szilárdtestek mechanikájában. BME előadás, Műszaki Mechanika Tanszék könyvtára, 2006. 11. 06.
- [16] Tóth László: Kísérleti és numerikus feszültséganalízis. (Paul C. Paris VIDEO sorozat kézikönyve) Miskolci Egyetem Bay Zoltán Intézet. Készült: a TEMPUS S_JEP_11271 projekt támogatásával, Miskolc, 1999.
- [17] Griffith, A. A. (1921), "The phenomena of rupture and flow in solids" (<http://www.cmse.ed.ac.uk/AdvMat45/Griffith20.pdf>), Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 221

- [18] F. Thamm, L. Borbás, R. Gáti, J. Gál: Untersuchung der interlaminaren Festigkeit einheimischer GFK-Lamine. Österreichische Ingenieur- und Architekten - Zeitschrift. 142. Jahrgang Heft 6/1997. p.:458...464. (R. L.)
- [19] OTKA kutatási jelentés T22073/2000 Erősített anyagok tulajdonságainak meghatározása, Témavezető Borbás Lajos, BME.
- [20] Investigation of Prof. Thamm, Előadás, BME, Műszaki Mechanika Tanszék, Hungary, 1978
- [21] Thamm, F.: The role of stress trajectories as an aid in the choice of the suitable shape of load-bearing structural elements of engines and structures. Periodica Politechnica Ser. Mech. Eng. BUTE, Vol. 44. No. 1/pp.: 171-183/2000.
- [22] The stress intensity near a stiffener disclosed by photoelasticity. G. Noselli, F. Dal Corso, D. Bigoni Received: 7 January 2010/ Accepted: 29 April 2010/ Published online: 19 August 2010. © Springer Science+Business Media B.V. 2010
- [23] Thamm, F., Ágoston, Gy.: Aufbau, Arbeitsweise und Fehlerquelle des Trajektorienzeichners für spannungsoptische Isoclinenaufnahmen. Zeitschrift Instrumentenkunde Vol. 72. 1964.
- [24] Taylor, C. E., Bowman, R. P., North, W. P., Swinson, W. F.: Application of lasers to photoelasticity. Denver, Colo. SESA, USA. 1976.
- [25] Alexandrov, A. L., Shandrov, L.G.: Wave Propagation in Photoelastic coatings, application to the solution of dynamic problems. Proc. 7th All-Union Conf. Photoelasticity, Tallin, USSR, 1971.
- [26] Robert, A., Boyer, J., Varelle, A.: Photoelasticimeters a deux longueurs d'onde appareils automatiques et semi-automatiques. Annales des Ponts et Chassees. 2. E. Trim., Paris, 1978.
- [27] Vozato, H., Nagata, R.: Holographic photoelasticity by using Dual Hologram Method. Journal of Appl. Phys. Vol. 16.No.1., 1977., Japan
- [28] Marvicz, H.: Techniken der Experimentellen Mechanik Produktwerdegang in der KFZ-Industrie. Meesen-Prüfen-Automatisieren. Stuttgart, pp.:178-184, April, 1989.
- [29] Kaifás, F.: Forgatónyomaték mérése feszültségpolitikai módszerrel, laboratóriumi kísérletek. Járművek, Mezőgazdasági Gépek, 1967. 17. évf. 6. sz. 210-216 p.
- [30] Vishay Intertechnology, Inc: Reflection polariscope for stress analysis using photostress technique. Bulletin S-103, USA., 1992.
- [31] A., Stupnicki, J.: Polariskop do badanmetoda elastooptycznej warszy powierchniowej z zastosowaniem światowodv. XIV. Lengyel Feszültségmérő Kongresszus. Varsó, 1990.
- [32] Vishay Bulletin SFC-300/1980.
- [33] Borbás Lajos: Additív (felépítéses) gyártástechnológiák: korlátlan műszaki lehetőségek, szigorú technológiai előírások, sok esetben kérdőjeles anyagtulajdonságok. MMK Munkabiztonsági Tagozat szakmai nap, 2017. május 02.

- [34] L. Borbás, F. Thamm: Investigation of the optimum design of frame junctions with respect to the welding procedure. ÖIAZ, 1989. No.: 7/8., pp.: 415...418
- [35] L. Borbás, I. Kabai, Á. Zsáry: Loading, strain and stress conditions of autobus frame junction points. International Journal of Vehicle design. Vol. 12., Nov. 5-6 1991. Inderscience Enterprises Ltd., UK.
- [36] Lajos Borbás, Frigyes Thamm: Evaluation of measurement results of rotation symmetrical parts having curved surfaces in case of photostress analysis. ÖIAZ, 1990. Jahrgang 135., July/August Heft 7/8., pp.:333...335
- [37] Thamm Frigyes, Borbás Lajos: Szerelési feszültségek vizsgálata és kimutatása optikai úton. GÉP XI. évfolyam, 1988. 8. szám, augusztus. Gépipari Tudományos Egyesület folyóirata, pp.: 293...296
- [38] Borbás Lajos: Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat. Lehetőség a konstrukció megítélésére, javítására. Előadás: MMK továbbképzés, 2014.11.07. BPMK, Budapest, Angyal utca, Székház.
- [39] Borbás L.: Design by experiment. Mérnöktovábbképző előadás: Experimental Approach to mechanical structural design, in Italian: Il Metodo sperimentale applicato alla Progettazione strutturale, Italy, Bari, 15-18 November 2013.
- [40] P. Ficzer, L. Borbás: New application of 3D printing method for optical photostress investigation. Available online at www.sciencedirect.com ScienceDirect, © 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.
Selection and Peer-review under responsibility of the Committee Members of 32nd DANUBIA ADRIA SYMPOSIUM on Advanced in Experimental Mechanics (DAS 2015)
- [41] Ferenc GYÖKÖS, Lajos BORBÁS, Frigyes THAMM: Following the process of failure during fatigue testing of a bus frame structure by photoelastic coating. pp.: 7...12. Published by Slovakian Academy, Materials Engineering, Zilina, Volume XII. 1/2005. (R. L.) ISSN 1335-0803
- [42] Borbás, L.: Improvement of the measurement parameters of force transducers using photoelastic coating technique. Lecture at Bologna University on course of Design by Experiment, 20. of Marc, 2009.
- [43] Lajos Borbás, István Ballon, László Péntek: Improvement of the measurement parameters of force transducers using photoelastic coating technique. Österreichische Ingenieur- und Architekten - Zeitschrift. 136. Jahrgang Heft 7/8, 1991. p.:331...335. (R. L.)
- [44] L. Borbás: Some problems of data evaluation of photoelastic coating technique in case of small size, fibre-optics fitted equipment. ICEM 12 advances in EXPERIMENTAL MECHANICS, 12th International Conference on Experimental Mechanics Mercure Hotel Villa Romanazzi Carducci, Bari, Italy 29 August – 2 September, 2004 CD kiadvány, személyre kereséssel, dolgozat sz.: 301.
- [45] Lajos Borbás, Frigyes Thamm, László Oláh: Comparison of strain gage technique and photoelastic coating method in the investigation procedure of femur prostheses. Journal of Computational and Applied Mechanics, Vol. 7., No. 1., (2006), pp. 3-12.

- [46] Gáspár, Judit, Borbás, Lajos, Thamm, Frigyes: Experimental tests on mandible and tooth prosthesis. XXII. DAS, Parma (Italy), 2005. September 28...October 1. p.: 130...131.(R. L.) (On Web: <http://das.tuwien.ac.at>)
- [47] Lothar Borchers, Siegfried Kottman: Spannungsanalyse am Modell eines Dentalimplantats. Messtechnische Briefe 19, (1983), Heft 2., pp.: 31...36.
- [48] Bekötő bak rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálata. BME Közlekedésmérnöki Kar, Gépelemek Tanszék. Kutatásfejlesztési tanulmány III. rész. Megbízó: IKARUS Karosszéria- és Járműgyár. Munkaszám BME: 468.001/86. IKARUS: 501.196. Budapest, 1986. július. Témavezető: Borbás Lajos
- [49] Bjørn Eske Sørensen: A revised Michel-Le'vy interference colour chart based on first-principles calculations.
Downloaded from: https://pubs.geoscienceworld.org/eurjmin/article-pdf/25/1/5/3130364/005_ejm25_1_005_010_sorensen_gsw.pdf
- [50] Az ábrákon szereplő kísérleteknél alkalmazott eszközök a szerző munkái során készült felvételek alapján kerültek bemutatásra.
- [51] A rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálatra alkalmas anyagok a szerző kísérletei és összeállítása szerint.

A sorozat keretében eddig megjelent kiadványok

2017.

1. NÉMETH András, MILÁVECZ Richárd Iparban használatos vízminőségek
2. DR. SZILÁGYI Zsombor, DR. SZUNYOG István Mérések a gáziparban
3. DR. BARNA Lajos, EÖRDÖGHNÉ DR. MIKLÓS Mária, DR. SZÁNTHÓ Zoltán, DR. BALLA József A biztonságos ívóvízellátás megteremtésének tervezési eszközei
4. BORBÁS Lajos Dr. Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben
5. BERENCSI Miklós, BEREZKY Ákos, HORVÁTH László, KOVÁCS Gergely, MIHÁLFFY Krisztina Kerékpárosbarát közlekedéstervezés
6. TÜDŐS Tibor, DR. VARJÚ György, DR. PETRI Kornél, GÁBOR András A csillagpontkezelés legújabb külföldi és hazai eredményei (Útmutató és tervezési segédlet)
7. DR. GARBAI László, DR. JASPER Andor, VÁRADI András Fűtési és használati melegvíz-igények kockázati elvű méretezése példákkal
8. KÁDI Ottó, DOHÁNY Máté, JÓZSA Bálint, LÁSZLÓ Csaba Tibor, JAKKEL Ottó A közúti vasutak (villamos) tervezésével kapcsolatos kézikönyv

2018.

9. BLAZSOVSZKY László A gázfogyasztó készülékek égéstermék elvezetésével kapcsolatos szabályozások hiányosságai és ellentmondásai
10. CSORDÁS Szilveszter, FORGÁCS Lajos Dr., PÓLYA Endre ifj., RÉV Zoltán, UDVARDY Péter Orvostechológiai továbbképzés ismeretanyaga
11. NÁDASDY Tamás, EGYHÁZY Zita, KOVÁCS Ákos Sándor, SZECSŐ Dániel Géza A közúti biztonsági audit (KBA) jelentések elkészítésének alkalmazási segédlete – A közúti infrastruktúra közlekedésbiztonsági kezeléséről szóló jogszabályhoz és ügyi műszaki előíráshoz kapcsolódó értelmezési, kidolgozási és elfogadtatási javaslatrendszer
12. DR. SZILÁGYI Zsombor, HORÁNSZKY Beáta Földgáz kereskedelem (mérnöki segédlet)
13. DR. SZILÁGYI Zsombor Az energiahordozók jövője – kőolaj, földgáz, megújulók
14. S. VÍGH Judit, DOHÁNY Máté Magános közlekedők baleseti súlyosságának csökkentése mobil applikáció segítségével
15. DR. BALIKÓ Sándor, DR. CSÜRÖK Tibor, NOVÁK Dániel, ORBÁN Tibor, DR. ZSEBIK Albin Ötletlapok I. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
16. DARABOS Zoltán, KOLTAI Henrik, SZABÓ Tamás, SZÁSZ Béla, VAJDA Sándor Felvonók felújítása és átalakítása – Műszaki segédlet
17. TÜDŐS Tibor, KRUPPA Attila Alapozásföldelők új tervezési elvei és kivitelezési módszerei – Tervezési segédlet és kivitelezési útmutató
18. FENYVESI Zsolt Tűzvédelmi tervek tartalmi szabályainak átdolgozása

19. GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH József Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás Nagyméretű informatikai beruházásoknál (fejlesztéseknél) ajánlott szoftveroldali tervdokumentációk tartalmi elemeinek meghatározása (I. – II. kötet)
20. DR. DIVÓS Ferenc Az élő fák stabilitása – mérnöki megközelítés – Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek
21. DR. KARÁCSONYI Zsolt Faanyagok tartós szilárdsága
22. BARNA Lajos Dr., ERDEI István, JASPER Andor Dr., TAKÁCS Gyula Segédlet épületek csatorna-berendezéseinek tervezéséhez
23. ANTÓK Péter István, FÜZÉR Ferenc, SÁRKÖZI András Fényvezető kábelszakaszok műszaki-minőségi ajánlás gyűjteménye
24. JANCsó Béla, DR. KULCSÁR Alexandra, NÉMETH Gábor, DR. VÍMI Zoltán, DÉRI Lajos, SZIMANDEL Dezső Vízbiztonsági engedélyezési eljárással kapcsolatos dokumentációk és engedélyeztetéssel kapcsolatos követelmények a 2018.01.01-én hatályba lépett 41/2017. (XII.29.) BM rendelet alapján
25. DR. TAKÁCS Bence, DR. SIKI Zoltán, DR. ÉGETŐ Csaba, BÉNYI László Mérnökegeodéziában alkalmazott alapponthálózatok – A jó gyakorlat bemutatása mintapéldákkal
26. DR. MÓCZÁR Balázs, LAUFER Imre, TÓTH Gergő, WOLF Ákos Korszerű támszerkezetek tervezése
27. HALÁSZ Györgyné Dr., CSERVENYÁK Gábor, TUCZAI Attila, VIRÁG Zoltán Különböző funkciójú épületek klimatechnikája II.
28. KÁDI Ottó, JÓZSA Bálint Kerékpáros balesetek létesítmények szerinti vizsgálata
29. GARBAI László Dr., JASPER Andor Dr., PELLER József Bendegúz Hőteljesítményátviteli tényező alkalmazása távhőrendszerek optimális szabályozásának modelljében
30. GARBAI László Dr., SÁNTA Róbert Dr., JASPER Andor Dr. A kompresszoros hőszivattyúk optimalizálása – Tervezés és üzemeltetés
31. LADÁNYI Gábor Dr. Diagnosztika a karbantartásban
32. MÉSZÁROS János, MOLNÁR Tibor, RITZL András KIÜRÍTÉSI ÉS MENEKÜLÉSI ÚTVONALBA ÉPÍTETT AJTÓK tervezési segédlet (2018)

2019.

33. BLAZSOVSZKY László Földgáz elosztóvezetékek üzemeltetése
34. DR. SZILÁGYI Zsombor A megújuló energiahordozók jövője Magyarországon
35. FORGÁCS Lajos Dr., HAIDEgger Tamás Dr., PÓLYA Endre ifj. Új fejlesztések, innovatív megoldások az orvostechnológia terén
36. VARRÓ Beáta, DR. KIS András Magyarországon előforduló, épületekbe beépített faanyagokat károsító gombák vizsgálata és azonosítása DNS diagnosztikával
37. MANNINGER Marcell, SZEPESHÁZI Attila, SCHEURING Ferenc, MOLNÁR György Munkatér határoló szerkezetek
38. KORSÓS András, RÁDULY Zsolt A közterületi és belterületi térfigyelő kamerarendszerek tervezési irányelvei
39. GERGELY Edit, DR. BEZEGH András Módszertani útmutató az üvegházhatású gázok közvetlen és közvetett kibocsátásának számítására
40. DR. BEZEGH András, BITE Pálné Dr., GERGELY Edit Városi környezetvédelem (Fenntartható és okos városok)

41. GÓDOR Balázs, DR. KÁSA László, SZÉKELY Bence Híddaruk méretezési segédlete (2019.)
42. FÜRJES Andor Tamás, KOTSCHY András, NAGY Attila Balázs, CSOTT Róbert Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban
43. DR. KARÁCSONYI Zsolt Faanyagok tartós szilárdsága
Faanyagok szilárdságának változása az idő függvényében
44. DR. BALIKÓ Sándor, ORBÁN Tibor, VARGA Péter, DR. ZSEBIK Albin Ötletlapok II. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
45. PRIMUSZ Péter, PhD. Hajlékony útpályaszerkezetek méretezése talajstabilizációk figyelembevételével
46. NÉMETH Balázs, HÁMORI Sándor, KOSTYÁK Attila, VÍGH Gellért Különböző funkciójú épületek klímatechnikája III. Segédlet ipari épületek lég- és klímatechnikai rendszereinek tervezése
47. JANCSÓ Béla, KAVECZKI Gergely, KÓCZÁN Gábor, LABORCZI Tamás, KNOLMÁR Marcell, RAUM László Csapadékvízgazdálkodás tervezési követelményei
Hogyan tervezzünk városi csapadékelvezető rendszereket
48. DOHÁNY Máté, SCHVANNER Norbert Kerékpárosok sebességének felülvizsgálata jelzőlámpás csomópontokban
49. JÓZSA Bálint, S. VÍGH Judit Sebességcsökkentés hatásainak vizsgálata gyorsforgalmi utakon
50. DR. ZSEBIK Albin, NOVÁK Dániel Projektlapok I. – Energiahatékonyság növelő javaslatok projektlapjai
51. DR. MÓGA István Beruházási projektek szabályozási és szabvány környezete, Tervezési követelmények meghatározása
52. DR. GÁBORI László, DR. BEINSCHRÓTH József, NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás Informatikai Tervező szakmai minősítő rendszere (Informatikai szakmai terület illesztése a Mérnök Kamarai működési rendbe és rendszerekbe)
I. kötet: Konceptió és modell
II. kötet: Modell illesztése
III. kötet: Tudástár
53. VIRÁG Zoltán, GYURKOVICS Zoltán, SZAKÁL Szilárd, VIRÁG Zsolt, ORCSI Attila Országos Tűzvédelmi Szabályzat épületgépész értelmezése a szakmai gyakorlatban
Segédlet a gyakorló épületgépész mérnökök számára I.

2020.

54. DR. KISS Jenő, CSERMELY Gábor JAVASLAT az egyszerű bejelentésű lakóépület megvalósításának – tervezés építés – módszerére
55. DR. SZILÁGYI Zsombor A hidrogén a környezetbarát energiahordozó, Hidrogén az energetikában
56. VARGA Tamás, DR. SZEDENIK Norbert, DR. KOVÁCS Károly, KRUPPA Attila, KULCSÁR Lajos, KAPITOR György, TURI Ádám A nem norma szerinti villámvédelem egységes műszaki követelményrendszerének kialakítása és javaslat a teljes villámvédelmi szabályrendszer jövőbeli egységesítésére
57. KÁDI Ottó A gyalogosközlekedés közúti keresztezései
58. MOLNÁR Szabolcs „Hulladékból konnektorba” A települési szilárd hulladék energetikai hasznosításának lehetőségei

- | | | |
|-----|--|---|
| 59. | VÁRDAI Attila | Segédlet szabadidős létesítmények tartószerkezeti tervezéséhez |
| 60. | DR. BEJÓ László | Szénlábnyom-elemzés készítése a faiparban |
| 61. | JANCSÓ Béla, NÉMETH Gábor, SZIMANDEL Dezső | Szakmai útmutató vízilétesítmény tervezők számára a 2020 január 1-én hatályba lépett „VIZEK keretrendszer” használatához |
| 62. | FELLEGI Zsóka, KARAFI Balázs, KOCH Edina, KOVÁCS Gábor, MURINKÓ Gergő, TÓTH Gergely József | Munkagödrök és földművek víztelenítése |
| 63. | HOLÉCZY Ernő, OLÁH Róbert, DR. SIKI Zoltán, DR. TAKÁCS Bence, DR. TÓTH Zoltán, VARGA Tibor | Módszertani útmutató az elavult ingatlan-nyilvántartási térképek korszerű technológiákkal végzett felújításához |
| 64. | DR. GÁBORI László, DR. MOLNÁR Bálint, NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás | Az Informatikai Tervező tervezési segédlete |
| 65. | NÁDASDY Tamás, TOMASCHEK Tamás, PALÁSTY István, SZECSŐ Dániel Géza | Dinamikus forgalomirányítás tervezői segédlete gyorsforgalmi úthálózat esetén |
| 66. | LENGYEL István | Szakmai útmutató szolgalmi jogok alapításához (mérnöki segédlet) |
| 67. | NÉMETH Balázs, SZLOVÁK Krisztián, VÍGH Gellért | Épületgépészeti tervezéshez praktikus, gyakorlati adatbázis |
| 68. | FÜRJES Andor Tamás, BORSINÉ Arató Éva, NAGY Attila Balázs, ILLYÉS László, BORSI Gergely | Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban (példatár) |
| 69. | DR. BORBÁS Lajos, GONDA Zoltán | Optikai feszültségvizsgálat – Kísérleti eljárás a konstrukció fejlesztésére, szerkezetek anyagfelhasználásának és teherviselésének optimalizálására |