

Polikarbonátok vizsgálata optikai feszültségvizsgálati eljárással

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF POLYCARBONATES BY OPTICAL PhotoSTRESS method

Ficzere Péter^{1*}, Borbás Lajos²

¹ Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

² Műszaki Intézet, Tatabánya, EDUTUS Egyetem, Magyarország

1 Bevezetés

A polikarbonát (PC) mérnöki gyakorlatban történő alkalmazhatóságáról az 1890-es végén jelentek meg híradások a Münchener Egyetem közleményeiben (Alfred Einhorn). Több, mint 50 esztendő szünetet követően hallhatunk ismét az ún. „egyláncú” polikarbonátról, a Bayer vállalat alkalmazottjának szabadalma kapcsán (Hermann Schnell, 1953). Erre a szabadalomra épült a „Macrolon” márkanév [1], amelynek bejegyzési dátuma 1955. A világban több helyen párhuzamosan futó kutatások eredményeként a Bayer bejegyzését követően néhány nappal a General Electric (GE) alkalmazottja (Daniel Fox), a New York állambeli Schenectadyben egy többláncú polikarbonát szintetizálását jelentette be. Ezt követően mindkét vállalkozás termékei – a szabadalmakra vonatkozó megegyezést követően - kereskedelmi forgalomban is megjelentek, a Bayer a már ismert „Macrolon” néven (1958), míg a GE „Lexan” (1960) márkanéven indította meg a termékek forgalmazását [2].

Az eredetileg barnás árnyalatú termék víztiszta, üvegszerű változata az 1970-es évek elejére tehető. Ettől az időponttól válik érdekessé a termék anyagtulajdonágainak ismerete, ami beépítési, beépíthetőségi körülményeit alapvetően meghatározza. A Polikarbonát a látható fény számára áttetsző, statikus és dinamikus terhelésekkel egyaránt terhelhető, formázható, jó hőszigetelő, szerkezeti anyagként felhasználható termék.

A gyártási körülményekből adódóan a termékben kialakuló orientációs állapot (melyet több irodalom befagyott feszültségállapotként kezel) ugyanakkor alapvetően meghatározza a külső terhelések határállapotait (szuperpozíció). Ez az orientációs állapot az optikai feszültségvizsgálat eljárással vizsgálható [3], [4], [5].

2 Módszertan

Optikai feszültségvizsgálat eljárás

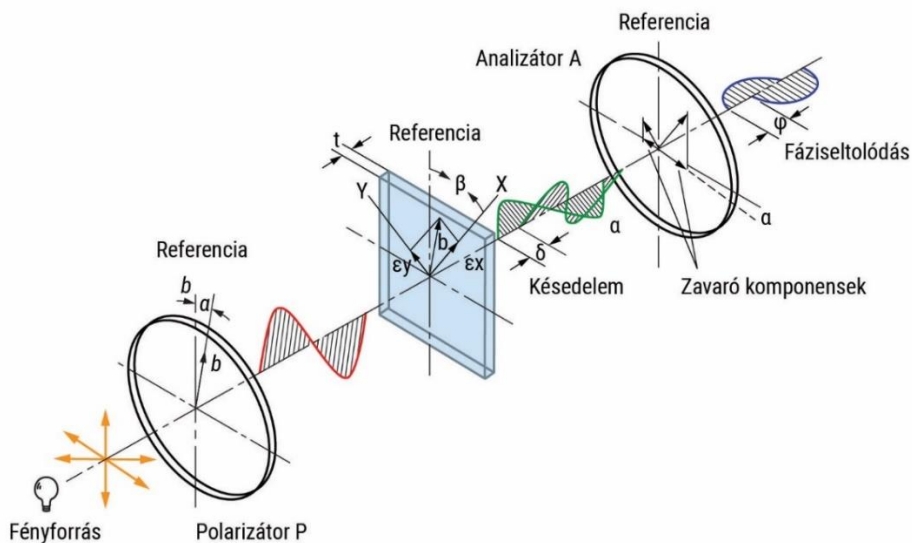
A kísérleti mechanika feszültségmérő eljárásai között az egyik legszemléletesebb az optikai feszültségvizsgálat. A polarizált fényben vizsgált, megfelelő optikai aktivitású átlátszó modell (vagy a tényleges alkatrészre felragasztott, hasonló mérés technikai tulajdonságokkal rendelkező optikailag aktív vizsgálóréteg) terhelés hatására polarizált fényben láthatóvá teszi a kialakuló nyúlás (feszültség) állapotot [6], [7]. A vizsgált szerkezet deformációs állapotát interferencia sávok formájában (hasonlóan a szintvonalas

* Kapcsolattartó szerző. Ficzere Péter
E-mail cím: ficzere.peter@kjk.bme.hu

térképekhez, vagy a numerikus számítási eljárások deformációs,- vagy feszültségképet mutató színsáv rendszeréhez) megjelenítő eljárás révén annak szilárdsági viselkedése – kellő biztonsággal – megítélhető [8], [9]. A polarizált fényben vizsgált alkatrész színsáv hálózata a megvilágító fényforrás függvényében színes (ez esetben a fényforrás fehér, vagy színtelen fény), vagy fekete/fehér sávrendszerként (ez esetben a fényforrás monokromatikus) figyelhető meg. Az eljárás alkalmazása során lehetőségünk van a terhelések egymásra épülő hatásának a vizsgálatára is (szuperpozíció), amely egyben azok hatásainak szétválasztását is lehetővé teszi (pl. szerelési feszültségekre épülő külső terhelések hatásainak elemzése).

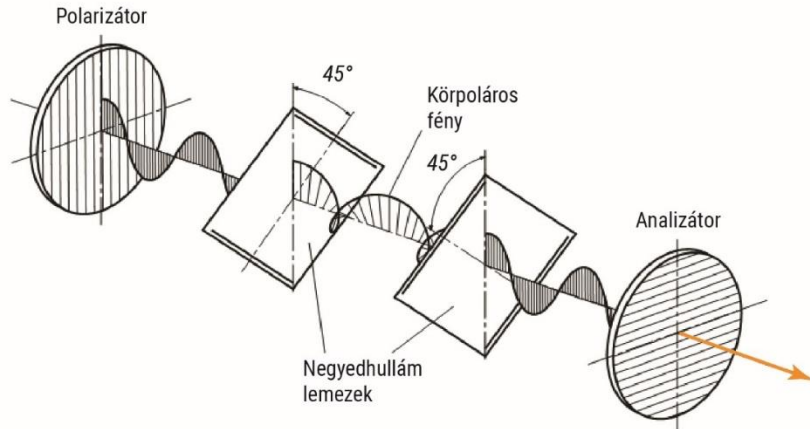
A mérési eljárásnak alapvetően két módszere ismert [10]. Történelmileg a modellezési, átvilágító eljárás volt az első (Oppel, 1937), amikor is a vizsgálni kívánt szerkezeti elemet 2D (síkbeli) transzparens modell segítségével vizsgálták alkalmasan megválasztott terhelő berendezésben, polarizációs szűrők között. A másik eljárás, amely az 1950-es években (Kuske, 1954, [11]) indult fejlődésnek, az optikailag érzékeny, transzparens anyagot (két komponenses epoxi- gyanta) a konkrét szerkezeti elemre ragasztva vizsgálta, így a modellezéssel járó valóságra történő átszámítás nehézségeit meg lehetett takarítani túl azon, hogy a vizsgált szerkezeti elemet valóságos terhelési körülmények között lehetett vizsgálni [8].

A modellezési eljárás során alkalmazott polarizációs optikai vizsgálóberendezés elvi összeállítását az 1. ábrán láthatjuk [8]. Az ábrán látható elvi elrendezésben a polarizációs szűrők lehetőséget biztosítanak a terhelések hatására kialakuló rendszámok (színsávok, az irodalomban szokásosan „m” jelöléssel) megfigyelésére, ill. alkalmas berendezéssel azok felvételére. A polarizációs készülékben. Ezekben a készülékekben tehát a polárszűrőkön kívül $\lambda/2$ szűrőt és $2\text{db. } \lambda/4$ szűrőt is találunk (2. ábra), melyek használatával az irányávokat figyelhetjük meg, amelyek alapján deformációs állapot (és az anyagjellemzők ismeretében ebből számítható feszültségállapot) irányultsága meghatározható (irányávok, amelyekből a trajektória hálózat összerajzolható) [8].



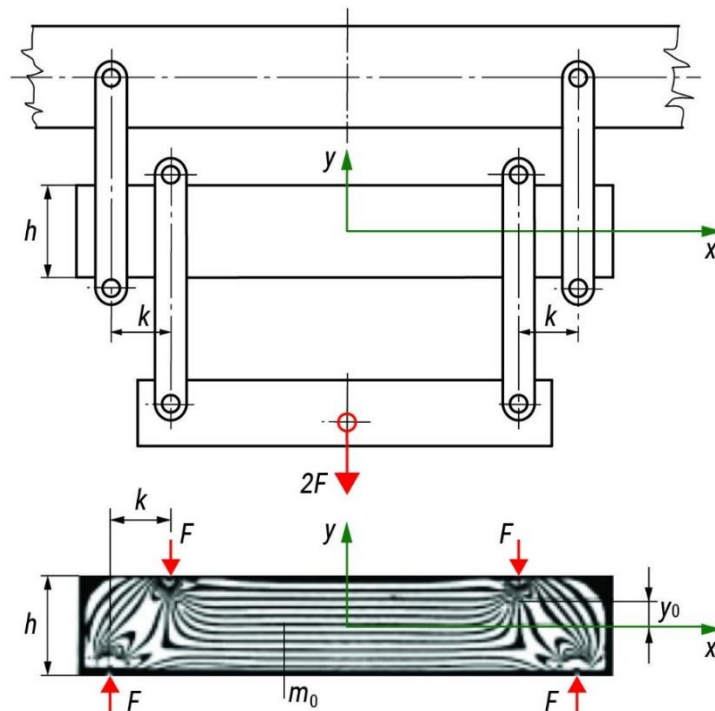
1. ábra. Polarizációs optikai berendezés elvi összeállítása [8]

A rendszámok deformációs állapotra történő számításának eljárása a kalibrálás, mikor is egy ismert geometriájú, ismert terhelésnek alávetett próbatestben számítással meghatározzuk deformációs állapotot, amelyet hozzárendelünk a polarizációs berendezéssel észlelt rendszám állapothoz.



2. ábra. Iránysávok vizsgálata polarizációs berendezésben, $\lambda/4$ lemezek alkalmazásával

Az eljárás során kapott rendszám eloszlást egy négy pontosan terhelt, téglalap keresztmetszetű tartó tiszta igénybevételi szakaszáról mutatjuk be, amely tartó szélső szálában számítással meghatározott deformációs állapot az optikai képhez köthető. Amennyiben a vizsgált tartó anyagjellemzőit ismerjük, az optikai kép feszültségállapotra is átszámítható (3. ábra, [12]). Az ábrán monokromatikus fényforrás használatával kialakult rendszám eloszlás látható.



3. ábra. Optikai feszültségvizsgálat kalibrálási eljárása négy pontosan terhelt téglalap keresztmetszetű tartó tiszta igénybevételi szakaszán [12]

3 A gyártási eljárás/alakítás hatása a Polikarbonát anyagtulajdonságaira

A polikarbonátok (PC) a polimerek hőre lágyuló műanyagcsoportjába tartoznak, kémiai összetételükben karbonátcsoportokat tartalmaznak. A műszaki gyakorlatban többnyire az optikailag átlátszó változatokat használják, rugalmas, szívós anyagok, könnyen megmunkálhatók, formázhatók és hőformázhatók, továbbá

időjárás álló, és jó hőszigetelő. Említett tulajdonságaik miatt, a polikarbonátokat sokféleképpen alkalmazzák. A polikarbonátok nem rendelkeznek egyedi gyantaazonosító kóddal (Resin Identification Code, RIC). a RIC-listán az "Egyéb", 7-es kóddal azonosítják. Megjelenési formái a lemezek, profillemezek, légkamrás lemezek, de ezeken kívül számos egyéb formában is előfordulnak a műszaki gyakorlatban (pl. csövek, profilok). Mechanikai jellemzőik közül érdemes a rugalmassági modulus: $E=2,0...2,4$ GPa, a húzószilárdság $\sigma_t=55...75$ MPa, valamint a nyomószilárdság: $\sigma_c > 80$ MPa értékeit figyelembe venni határállapotú jellemzők vizsgálatánál [13], [14], [15].

Jelen összeállításban a sík lemezekből kialakított, utólagos formázással készült termékek sajátos viselkedését, valamint több, egymásra épített rétegekből álló, fröccsöntéssel kialakított termékben kialakult hatásokat vizsgáljuk.

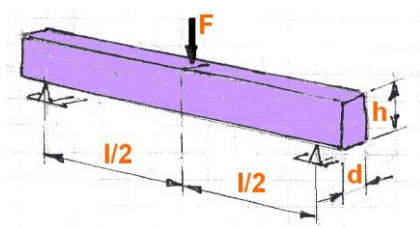
Az optikai feszültségvizsgálat optikailag átlátszó anyagok esetén lehetőséget biztosít a gyártás során keletkezett belső igénybevételek megfigyelésére, még azelőtt, hogy a vizsgált szerkezeti elemet külső igénybevétel terhelné. Ez a módszer egyben a gyártási iránytól függő tulajdonságokat is feltárja, amennyiben két, egymásra merőleges irányban tudunk vizsgálatokat végezni.

További fontos kérdés annak eldöntése, amennyiben külső terhelés alkalmazása nélkül is észlelünk színsávokat a vizsgált elemen, ez a hatás a gyártás/alakítás során kialakult molekula átrendeződés eredménye-e, amelyet orientációnak hívunk, vagy a gyártás hatására kialakult ún. maradó feszültségekből vezethető le.

A két, egymásra merőleges irányban végzett optikai feszültségvizsgálat lehetőséget ad annak megfigyelésére, a gyártási irány befolyásolta-e a termékben észlelhető molekula átrendeződést, adott esetben a maradó feszültségek kialakulását.

A polarizációs optikai vizsgálatok polimerek esetén egyszerre mutatják a vizsgált polimer molekulaszerkezetének jellegét és a vizsgált testben kialakuló deformációs állapotot (amely az anyagjellemzők ismeretében feszültségre átszámítható). A vizsgálóberendezésben a polarizációs szűrők közt átvilágított test színsávok struktúrája képezi a további vizsgálat tárgyát.

A vizsgálatok során az elkészített próbatesteket hárompontos hajlítással terheltük, melynek mechanikai modelljét a 4. ábrán mutatjuk be.



4. ábra. Hárompontos hajlítás mechanikai modellje

A tartó geometriai adatainak, valamint anyagjellemzőinek ismeretében az észlelt színsáv értéke az optikai feszültségvizsgálat alapegyenletének alkalmazásával feszültségre átszámítható (1).

$$\sigma = \frac{S}{d}m, \text{ ahol} \quad (1)$$

S: a vizsgált anyag feszültségoptikai (érzékenységi) mutatója,

d: a tartó vastagsági mérete (a fény áthaladás útja),

m: az észlelt rendszám értéke.

Esetünkben a terheletlen tartókon észlelt rendszám értékeket tekintjük kiindulási értéknek, amelyekre szuperponáljuk a külső terhelés hatását. Annak érdekében, hogy szét tudjuk választani a gyártásból/alakításból eredő hatásokat a külső terhelések okozta változásoktól, a két rendszámértéket (külső terhelésnél észlelt, valamint a terheletlen állapotban látott) egymásból ki kell vonnunk, amely esetben a Δm értékkel kell számolnunk a (2) összefüggés alapján:

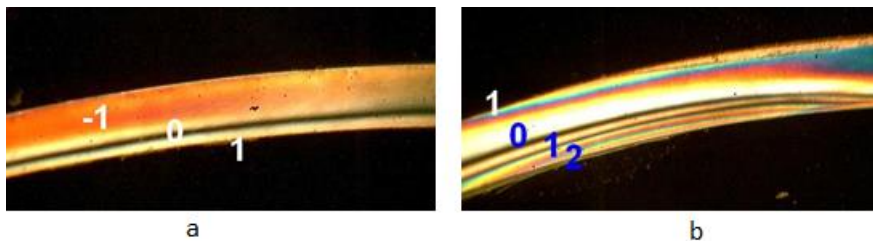
$$\sigma = \frac{S}{d} \Delta m, \text{ ahol} \quad (2)$$

Δm : a külső terheléskor észlelt rendszám érték, valamint a terheletlen állapotban mért rendszámérték különbsége.

A vizsgálatokat két egymásra merőleges irányban végeztük (gyártási/alakítási irány melyet hossziránynak neveztünk, ill. arra merőlegesen, melyet keresztiránynak neveztünk), így a gyártási/alakítási irány hatását is vizsgálni tudtuk.

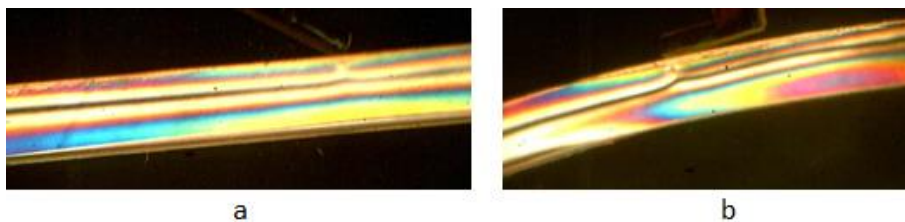
Az 5. ábra a terheletlen, hossz,- valamint keresztirányban mért rendszámeloszlást mutatja. Jól megfigyelhető a két egymásra merőleges irányban készített felvételen a terheletlen állapotban észlelt számottevő, irányfüggő viselkedésre utaló eltérés.

Az 5.b ábrán látható jelentős mértékű molekula átrendeződés hatása feltehetően az gyártás/alakítás hatására jön létre, és érdemes megjegyezni, hogy a gyártási/alakítási irányra merőlegesen fejt ki hatását.



5. ábra. Rendszámeloszlás hosszirány, tehermentes (a), keresztirány, tehermentes (b)

A tehermentes állapotra szuperponált külső erő hatását a 6. ábrán mutatjuk be.



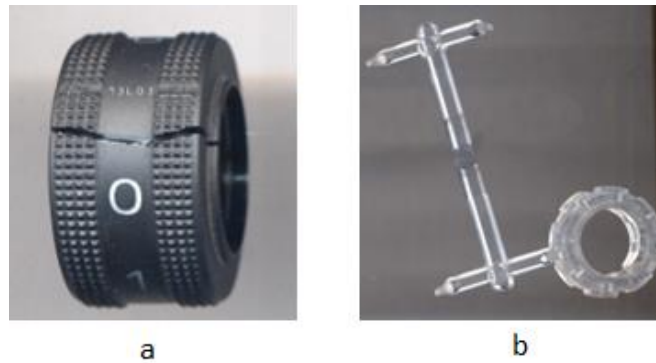
6. ábra. Hosszirány, 100 pond külső terhelés, 80 mm támaszköz (a) és keresztirány, 300 pond terhelés, 63 mm támaszköz (b)

Az 5. ábra, valamint a 6. ábra rendszámeloszlásának vizsgálatánál érdemes a semleges szál (fekete színű, nullás rendszám), elmozdulását nyomon követni. Ebből a tényből az a következtetés vonható le, miszerint a gyártás/alakítás maradó feszültségeket generált a szerkezetben. A gyártási/alakítási molekula orientáció külső terhelés változásának hatására ugyanis helyben marad, a külső terhelés változásának ugyanis nincs hatása a molekula szerkezet elrendezésére.

4 Eredmények

Fröccsöntéssel készült, egybeépített szerkezet PC alkatrészének vizsgálata

Vizsgálatunk tárgya egy többrétegű alkatrész, amelyben fröccsöntéssel kialakított szerkezeti elem az egyik alkatrész. A szerelt egység meghibásodása okán (törés) merült fel az egyik alkotó elem, a PC gyűrű gyártási körülményeinek meghibásodásra gyakorolt hatása. A meghibásodott, szerelt egységet, valamint annak fröccsöntött alkotó elemét a 7. ábrán mutatjuk be.



7. ábra. Meghibásodott szerelt egység (a), valamint annak fröccsöntött alkotó eleme (b)

A szerelt szerkezet oldhatatlan módon, szintén fröccsöntéssel készült, ahol is közbenső PC gyűrűre a külső egységet ráfröccsöntötték (8. ábra).



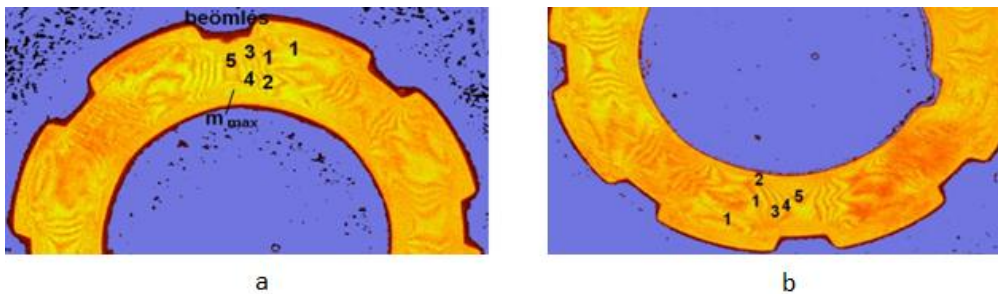
8. ábra. Végső, szerelt egység, fröccsöntött kivitel

A közbenső, PC alaptestet optikai feszültségvizsgálatnak vetettük alá. Miután az alaptest vastagsági mérete közel 16 mm, ezért ezt az alaptestet szeleteltük, annak érdekében, hogy a gyártás (fröccsöntés) hatását minél részletesebben tudjuk elemezni (az átvilágítás során a feszültségoptikai kép a vastagság menti átlagot mutatja). Az alaptestből 3 db szeletet készítettünk, a 9. ábrán bemutatott módon.



9. ábra. Szeletelt PC alaptest, feszültéoptikai vizsgálatra kész állapotban

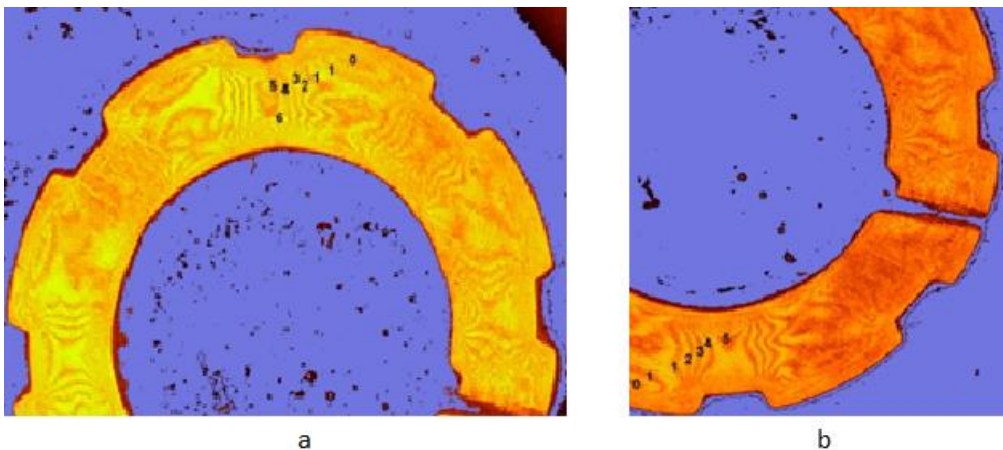
Az optikai feszültségvizsgálattal arra kerestük a választ, a gyártási technológia esetleges kedvezőtlen beállítási paramétereit felelősek lehetnek-e a szerelt egység meghibásodásáért. Az alaptestet két helyen vettük górcső alá: a beömlés, valamint a vele szemben levő összezapási környezetet vizsgáltuk a meghibásodás okainak feltárása érdekében. A 10. ábra az alaptest középső szeletének rendszámeloszlását mutatja, amely képbe berajzoltuk az észlelt rendszámok értékeit.



10. ábra. Alaptest középső szeletének polarizációs optikai felvétele a.) beömlési hely környezete, b.) összezapási hely környezete

Mivel az alapgyűrűk polikarbonát anyagának polarizációs optikai képe belső feszültség és molekula rendeződés hatását egyaránt mutatja, mindenekeelőtt tisztázni kellett, hogy esetünkben a két hatás közül melyik dominál.

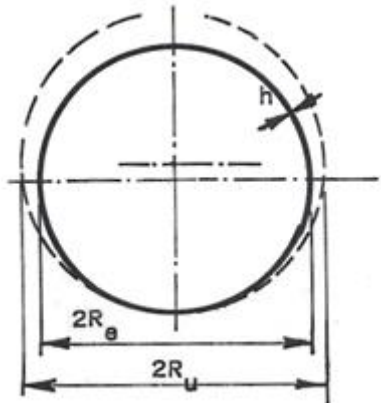
Ehhez egy alaptest gyűrű középső szeletét sugárirányban felmetszettük, és összehasonlítottuk az ép, és a felmetszett gyűrű polarizációs optikai képét. A felmetszett gyűrű polarizációs optikai képeit a 11. ábra mutatja, a.) a beömlés, b.) az összezapás környezetét.



11. ábra. Felmetszett alapgyűrű középső szelete a.) beömlés környezete, b.) összezapás környezete

A felmetszés alkalmából a befűrészelési hézag nagyrészt összehúzódott, ami a gyűrűben hajlítás jellegű maradó feszültség jelenlétére utal. A felmetszést követően a gyűrű külső sugara az eredetileg mért $R_e=11,55$ mm-ről $R_u=11,5$ mm-re csökkent, ami lehetőséget adott a maradó feszültség nagyságának meghatározására.

A gyűrű falvastagsága ($h=3,5$ mm) értékével a fajlagos tangenciális nyúlás a gyűrű szélő szálában a 12. ábra jelöléseinek alkalmazásával, figyelemmel az ott alkalmazott közelítésre (a levezetés mellőzésével):



12. ábra. Felhasított gyűrű modellje maradó feszültség meghatározásához

$$\varepsilon_t = \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R_u} - \frac{1}{R_e} \right) \quad (3)$$

$$s_t = \pm \frac{h}{2} \left[\frac{1}{R_u} - \frac{1}{R_e} \right] = \pm \frac{3,5}{2} \left[\frac{1}{11,5} - \frac{1}{11,55} \right] = \pm 3,765 \cdot 10^4 \quad (4)$$

Amiből a PC rugalmassági modulusát $E=2000$ MPa-ra, és a Poisson tényezőjét $\nu=0,4$ -re felvéve a feszültség a szélő szálban:

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \varepsilon_t = \frac{2 \cdot 10^3}{1-0,4^2} \cdot 3,765 \cdot 10^4 = 0,896 \text{ MPa} \quad (5)$$

Ez olyan kis érték, ami nem okozhatta a gyűrű felhasadását (7. ábra).

5 Konklúzió

Mindezek alapján az optikai feszültségvizsgálat eredménye egyértelműen gyártásból eredő orientációs hatást mutat, amely magas szintű orientáció a gyártás technológiai paramétereinek hatásának tudható be. A fentiekben bemutatottak alapján kimondható, hogy a polarizációs optikai képet a fröccsöntés technológiai körülményei és jellemzői (elsődlegesen fröccsnyomás, hőmérséklet, ebből következően a munkadarab gyártási ciklusideje), valamint a fröccsanyag termodinamikai paramétere (elsődlegesen MFI, valamint sűrűség) erősen befolyásolják.

Az optikai feszültségvizsgálat ebben az esetben rávilágított a gyártási eljárásból eredő kedvezőtlen molekula átrendeződésre (számítással kizártuk a jelentős maradó feszültségek jelenlétét), amely hatás a gyártási paraméterek átgondolt változtatásával módosítható.

Irodalomjegyzék

- [1] Macrolon resists heat and attracts insects <https://solutions.covestro.com/en/brands/makrolon> (megnyitva 2024. 06. 08.)
- [2] "Lexan sheet technical manual" (https://web.archive.org/web/20150316235516/http://sfs.sabic.eu/wp-content/uploads/resource_pdf/1345453948-48623687-Technical-Manual-Coated-Uncoated-Sheet.pdf) (megnyitva 2024. 06. 08.)
- [3] Martin, T., & Csaba, D. (2020). Fröccsöntő szerszám tervezése. Multidiszciplináris Tudományok, 10(2), 25-29., <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.2.4>
- [4] Topa, M., & Dömötör, C. (2019). Fröccsöntő szerszám tervezése. MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE, 9(3), 44-56., <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.3.4>
- [5] Bolló, B., Sarka, F., Voith, K., Felhő, C. (2024) "Thermal Analysis of a Simplified Railway Brake Model with Numerical Simulation", Periodica Polytechnica Transportation Engineering. <https://doi.org/10.3311/PPtr.36938>
- [6] Borbás, L.: Rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálat fejlesztése száloptika alkalmazásával. Ph.D. értekezés, BME Közlekedésmérnöki Kar, 2002.
- [7] Peter, Ficzere ; Lajos, Borbas ; Adam, Torok, Validation of Numerically Simulated Rapid-prototype Model by Photoelastic Coating, ACTA MECHANICA SLOVACA 18 : 1 pp. 14-24. , 11 p. (2014)
- [8] Borbás Lajos, Gonda Zoltán: Optikai Feszültségvizsgálat: kísérleti eljárás a konstrukció fejlesztésére, szerkezetek anyagfelhasználásának és teherviselésének optimalizálására. Magyar Mérnöki Kamara kiadványsorozata, 54. szám, FAP-2020/102-GPT.
- [9] [FICZERE, Peter, Usage of 3D printing in photostress investigation](#), PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES 7 : 2 pp. 16-19. , 4 p. (2015), <https://www.gpij.pl/production-engineering-archives/files/Vol.-7,-No.-2---04.P.Ficzere.pdf>
- [10] Thamm, F., Ludvig, Gy., Huszár, I., Szántó, I.: A szilárdságtan kísérleti módszerei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
- [11] Kuske, A.: Verfahren der Spannungsoptik, Deutscher Ingenieur-Verlag GmbH. Düsseldorf. 1951.
- [12] F. Zandmann, S. Redner, J.W. Dally: Photoelastic Coatings. Society for Experimental Stress Analysis, Westport, 1977.
- [13] <https://myhome.decorexpro.com/hu/strojmaterialy/polikarbonat-eto/> (megnyitva: 2024. 06. 18.)
- [14] Dömötör Cs, KRITÉRIUMOK ÉS LEHETŐSÉGEK ADDITÍV GYÁRTÁSRA OPTIMÁLT ALKATRÉSZEKNÉL (REQUIREMENTS AND POSSIBILITIES FOR COMPONENTS OPTIMIZED FOR ADDITIVE MANUFACTURING), GÉP, LXXV. évfolyam, 3-4 szám, pp 45-50, 2024., <https://doi.org/10.70750/GEP.2024.3-4.10>
- [15] Sarka, F., Almási, P., CSIGAHAJTÓMŰ REKONSTRUKCIÓJA 3D NYOMTATÁS SEGÍTSÉGÉVEL – ESETTANULMÁNY (RECONSTRUCTION OF A WORMGEAR DRIVE USING 3D PRINTING - CASE STUDY), GÉP, LXXV. évfolyam, 3-4 szám, 2024., <https://doi.org/10.70750/GEP.2024.3-4.19>