

OBSAH

PREDHOVOR	9
1 ÚVOD	11
2 ZÁKLADY TEÓRIE VLNENIA A INTERFERENCIE	13
2.1 VLNY A ČASTICE	13
2.1.1. Vlnová dĺžka a uhlový vlnočet	15
2.1.2. Perióda, uhlová frekvencia a frekvencia	16
2.2 RÝCHLOSŤ POSTUPNEJ VLNY	17
2.3 RÝCHLOSŤ VLNY NA STRUNE	18
2.3.1 Rozmerová (dimenzionálna) analýza	18
2.3.2 Odvodenie rýchlosti z druhého Newtonovho zákona	19
2.4 ENERGIA A VÝKON VLNY	20
2.4.1 Kinetická energia	20
2.4.2 Potenciálna energia napätosti	20
2.4.3 Prenášaný výkon	21
2.5 PRINCÍP SUPERPOZÍCIE	22
2.6 INTERFERENCIA VLŇ	23
2.7 FÁZORY	25
2.8 STOJATÉ VLNY	26
2.9 VLASTNÉ KMITY	28
2.10 ZVUKOVÉ VLNENIE	30
2.10.1 Rýchlosť zvuku	31
2.10.2 Šírenie zvukových vln	33
2.10.3 Interferencia	35
2.10.4 Intenzita zvuku a jej hladina	36
2.10.5 Zdroje zvuku	38
2.10.6 Záchvevy	41
2.10.7 Dopplerov jav	42
2.10.7.1 Detektor v pohybe, zdroj v klude	42
2.10.7.2 Zdroj v pohybe, detektor v klude	44
2.10.7.3 Rovnica všeobecného Dopplerovho javu	45
2.10.7.4 Dopplerov jav pri malých rýchlostiach	45
2.10.7.5 Nadzvukové rýchlosti, rázove vlny	45
2.11 DOPPLEROV JAV PRI SVETLE	46
2.12 SVETLO AKO ELEKTROMAGNETICKÉ VLNENIE	47
2.13 POLARIZÁCIA	54
2.13.1 Polarizované svetlo	54
2.13.2 Anizotropia	57
2.14 ODRAZ A LOM	58
2.14.1 Chromatická disperzia	60
2.15 ÚPLNÝ ODRAZ	61
2.16 POLARIZÁCIA ODRAZOM	62
2.16.1 Brewsterov zákon	63
2.17 INTERFERENCIA	64
2.17.1 Svetlo ako vlnenie	64
2.17.2 Difrakcia	67
2.17.3 Youngov interferenčný pokus	68
2.17.4 Koherencia	71
2.17.5. Intenzita pri interferencii svetla z dvoch štrbín	72



2.17.6. Interferencia na tenkej vrstve	75
2.17.7. Michelsonov interferometer	79
3 FYZIKÁLNE ZÁKLADY FOTOELASTICIMETRIE	81
3.1 SVETLO AKO NOSITEĽ INFORMÁCIÍ	81
3.2 JONESOVA MATICA	83
3.3 ČASTI POLARISKOPU	84
3.3.1 Polarizátor	84
3.3.2 Oneskorovacie (retardačné) dosky	85
3.4 URČENIE PARAMETROV SVETELNÝCH VĽN PRECHÁDZAJÚCICH ČASŤAMI OPTICKÝCH SÚSTAV S VYUŽITÍM JONESOVHO VÝPOČTU.....	87
3.4.1 Výpočet parametrov svetelných vln prechádzajúcich sústavou polariskopov.....	87
3.5 ODRAZ A LOM SVETLA NA ROZHRAŇÍ DVOCH PROSTREDÍ	90
3.6 ODRAZ A LOM VYJADRENÝ JONESOVOU MATICOU	95
3.7 TEÓRIA MECHANICKO - OPTICKÉHO EFEKTU	96
3.8 OPTICKÉ SÚSTAVY PRE VYŠETROVANIE DEFORMÁCIE METÓDOU FOTOELASTICKÉHO POVRSTVENIA	100
3.8.1 Priamkový polariskop	101
3.8.2 Kruhový polariskop.....	101
3.8.3 Súosový polariskop	102
3.8.4 Polariskop s polopriepustným zrkadlom pre osvetlenie povrstvenia v smere normály.....	102
3.8.5 Kruhový polariskop s V usporiadaním pre šikmé osvetlenie povrstvenia	103
3.8.6 Polariskop s V usporiadaním pre šikmé symetrické osvetlenie povrstvenia.....	104
3.8.7 Kompenzátory pre skúmanie zlomkových rádoz izochróm	104
3.9 KONŠTRUKCIA POLARISKOPU PRE ANALÝZU METÓDOU FOTOELASTICKÉHO POVRSTVENIA.....	105
3.10 MATEMATICKÉ MODELY POLARISKOPOV PRE ANALÝZU METÓDOU FOTOELASTICKÉHO POVRSTVENIA	106
3.10.1 Matematický model priamkového polariskopu v usporiadaní V	106
3.10.2 Matematický model kruhového polariskopu v usporiadaní V	110
3.10.3 Matematické modely polariskopov pre určovanie zlomkových rádoz izochromát s použitím kompenzácie.....	112
3.10.3.1 Určovanie zlomkových rádoz izochróm Tardyho kompenzačnou metódou.....	112
3.10.3.2 Určovanie zlomkových rádoz izochróm použitím Soleilovho-Babinetovho kompenzátora.....	114
3.10.4 Matematický model polariskopu pre šikmé asymetrické osvetlenie povrstvenie.....	115
3.10.5 Matematický model polariskopu pre šikmé symetrické osvetlenie povrstvenia	116
4 VYUŽITIE METÓDY PHOTOSTRESS PRE ANALÝZU DEFORMÁCIE A NAPÄTOSTI.....	119
4.1 ANALÝZA FOTOELASTICKÝCH PRUHOVÝCH OBRAZCOV	124
4.1.1 Výklad o celkovom rozložení deformácií.....	124
4.1.2 Vytváranie pruhov	125
4.1.3 Identifikácia pruhu	126
4.1.4 Určenie veľkosti hodnoty pruhov.....	127
4.2 MERANIE HLAVNÝCH SMEROV DEFORMÁCIÍ – ZÁKLADNÝ PRINCÍP.....	128
4.3 MERANIE VEĽKOSTI DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ.....	130
4.3.1 Vzťahy medzi radmi pruhu a veľkosťou deformácie a napätia.....	130
4.3.2 Merania v bode	132
4.3.2.1 Oneskorená (goniometrická) Tardyho kompenzácia	133

4.3.2.2 Meranie hlavných napätí na nezaťažených okrajoch pomocou oneskorenej (goniometrickej) kompenzácie.....	134
4.3.2.3 Meranie použitím kompenzácie s nulovou rovnováhou.....	133
4.4 METÓDY SEPARÁCIE HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ RESP. NAPÄTÍ PRI METÓDE PHOTOSTRESS	136
4.4.1 Metóda šikmého dopadu.....	136
4.4.2 Separačná metóda s využitím tenzometrie	137

5 SEPARÁCIA HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ PRI MERANÍ METÓDOU PHOTOSTRESS139

5.1 DEFORMÁCIA A PODMIENKA SPOJITOSTI.....	139
5.2 NAPÄTOSŤ A DIFERENCIÁLNE ROVNICE VNÚTORNEJ ROVNOVÁHY.....	141
5.3 FYZIKÁLNE ROVNICE.....	143
5.4 EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA DEFORMAČNÉHO A NAPÄŤOVÉHO POĽA	144
5.5 URČENIE POĽA DEFORMÁCIÍ Z POĽA IZOCHROM A IZOKLÍN	145
5.5.1 Rozdelenie deformácie v hraničných bodoch	146
5.5.2 Určenie rozloženia zložiek deformácií riešením Laplaceovej diferenciálnej rovnice	148
5.5.3 Rozloženie deformácií pozdĺž ľubovoľnej priamky	149
5.6 URČENIE POĽA NAPÄTÍ Z POĽA IZOCHROM A IZOKLÍN	152
5.6.1 Zostrojenie poľa izostatických čiar	152
5.6.2 Výpočet šmykových napätí	153
5.6.3 Metódy separácie napätí.....	153
5.6.3.1 Separácia hlavných normálových napätí pozdĺž izostatickej čiary	154
5.6.3.2 Metóda rozdielov šmykových napätí.....	157
5.7 URČENIE DEFORMAČNÉHO A NAPÄŤOVÉHO POĽA NA ZÁKLADE ĎALŠIEHO PARAMETRA URČENÉHO EXPERIMENTOM	161
5.7.1 Využitie metódy šikmého osvetlenia pre separáciu zložiek deformácií.....	161
5.7.1.1 Metóda šikmého osvetlenia v rovinách hlavných smerov	161
5.7.1.2 Metóda šikmého osvetlenia v ľubovoľných rovinách	163
5.7.1.3 Metóda šikmého osvetlenia pri využití nesymetrického šikmého osvetlenia	164
5.7.2 Separácia hlavných pomerných deformácií, resp. hlavných normálových napätí pomocou tenzometrov.....	165
5.7.2.1 Separačný tenzometer Photostress.....	166
5.7.2.2 Korekcie pre efekty povrstvenia.....	168
5.7.2.3 Fotoelastické korekcie	169
5.7.2.4 Tenzometrické korekcie	172
5.7.2.5 Poznámky k využitiu špeciálnych tenzometrov k separácii zložiek deformácií	176
5.7.2.6 Numerické príklady	177
5.7.3 Separácia pri využití drážky (Slitting)	180
5.7.4 Metóda separácií deformácií založená na využití poľa izopách.....	181
5.8 SEPARÁCIA DEFORMÁCIÍ PRI VYUŽITÍ LEN POĽA IZOCHROM ALEBO POĽA IZOKLÍN	182
5.8.1 Metóda charakteristík založená na využití poľa izochrom.....	182
5.8.1.1 Zvláštne prípady využitia metódy charakteristík	186
5.8.1.2 Numerické spracovanie výsledkov experimentu pri uplatnení metódy charakteristík.....	188
5.8.2 Modifikovaná metóda charakteristík.....	190



5.8.3 Priama separácia pomerných deformácií na osi symetrie založená na využití charakteristík.....	193
5.8.4 Separácia pomerných deformácií založená na výlučnom využití poľa izoklín ...	195
6 KALIBRÁCIA FOTOELASTICKÉHO POVRSTVENIA A PRÍČINY VZNIKU SYSTEMATICKÝCH CHÝB	199
6.1 POSTUP PRI KALIBROVANÍ POVRSTVENIA	199
6.1.1 Aplikácia kalibrovaného povrstvenia	200
6.1.2 Kalibračné meranie	201
6.1.3 Redukcia dát	202
6.1.4 Odstraňovanie naaplikovanej fotoelastického povrstvenia z kalibračného nosníka.....	204
6.2 PRÍČINY VZNIKU SYSTEMATICKÝCH CHÝB PRI ODRAZOVEJ FOTOELASTOMETRII	204
6.2.1 Fotoelastický efekt v blízkosti voľného okraja povrstvenia a v blízkosti lokálnych koncentrátorov deformácií.....	204
6.2.2 Fotoelastický efekt vznikajúci v dôsledku rozdielnych hodnôt Poissonových čísiel konštrukcie a povrstvenia.....	206
6.2.3 Efekt zmeny teploty v priebehu merania	207
7 MATERIÁLY PRE FOTOELASTICKÉ POVRSTVENIE A ICH VÝBER	209
7.1 METÓDA APLIKÁCIE POVRSTVENIA	209
7.2 CITLIVOSŤ	210
7.3 ZLOŽITOSŤ OBRYSOV	213
7.4 EFEKT VYSTUŽENIA	213
7.5 MAXIMÁLNE PREDĹŽENIE.....	217
7.6 VPLYV TEPLoty PRI SKÚŠKACH.....	217
7.7 MATERIÁLY POVRSTVENÍ.....	218
7.7.1 Fólie pre povrstvenie rovinných plôch.....	218
7.7.2 Tekuté tvárne hmoty pre povrstvenia tvarových zložitých súčiastok.....	218
7.8 LEPIDLÁ PRE APLIKÁCIU POVRSTVENIA	220
8 KOREKCIA PORADIA RADU PRUHOV PRI METÓDE FOTOELASTICKÉHO POVRSTVENIA	221
8.1 POČIATOČNÝ DVOJLOM	221
8.2 SPEVNÚJÚCE EFEKTY POVRSTVENIA PRI ROVINNEJ NAPÄTOSTI	224
8.3 SPEVNENIE A EXTRAPOLÁCIA SPEVNÚJÚCICH EFEKTOV PRI OHYBE.....	228
8.4 ZAŤAŽENIE OHYBOM ALEBO OHYBOVOU DEFORMÁCIU	231
8.5 SPEVNENIE A KOREKCIA PRI KRÚTENÍ	233
8.6 SPEVNENIE A KOREKCIA PRI TLAKOVÝCH NÁDOBÁCH.....	233
8.7 KOREKCIA ÚČINKOV TEPELNÝCH ZMIEN	234
8.7.1 Povrstvené oblasti neobsahujúce okraj (vo vzdialenostiach, ktoré sú štyrikrát väčšie než hrúbka povrstvenia)	235
8.7.2 Voľná hrana telesa a okraja povrstvenia skúšobného telesa.....	236
8.8 URČENIE CITLIVOSTI MATERIÁLU POVRSTVENIA A JEJ DÔSLEDKY NA URČENIE DEFORMÁCIÍ SKÚMANEJ SÚČIASTKY	236
9 TECHNIKA EXPERIMENTÁLNEJ ANALÝZY NAPÄTÍ PRI POUŽITÍ OPTICKY CITLIVÝCH POVRSTVENÍ.....	239
9.1 PRÍPRAVA POVRSTVENIA NA SKÚŠOBNEJ VZORKE (T KUS)	239
9.2 PRÍPRAVA ŽIVICE A TUŽIDLA	241
9.3 PRIEBEH LIATIA.....	243

9.4 PRÍPRAVA SKÚŠANÉHO KUSA A POVRSTVENIA PRE VYTVAROVANIE.....	244
9.5 VYTVAROVANIE POVRSTVENIA NA SKÚŠANÚ VZORKU.....	246
9.6 PRÍPRAVA SKÚŠANÉHO KUSU A VYTVAROVANÉHO POVRSTVENIA NA LEPENIE.....	249
9.7 PRÍPRAVA LEPIDLA A LEPENIE.....	250
9.8 AKTUÁLNE OTÁZKY APLIKÁCIE METÓDY ODRAZOVEJ FOTOELASCIMETRIE.....	253
9.9 POKRYTIE ROVINNÝCH ČASTÍ (DIELOV).....	254
9.10 VŠEOBECNÉ PRÍKLADY POUŽITIA.....	255

10 MERANIE DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ ODRAZOVÝM POLARISKOPOM

PHOTOELASTIC - MODEL 030259

10.1 POPIS ODRAZOVÉHO FOTOELASCIMETRA, JEHO MONTÁŽ A NASTAVENIE.....	259
10.1.1 Všeobecne o odrazovom fotoelascimetri.....	259
10.1.2 Opis jednotky analyzátora.....	262
10.1.3 Svetelný zdroj.....	263
10.2 INTERPRETÁCIA FOTOELASTICKÝCH PRUHOV V CELOM POLI.....	264
10.2.1 Metodika interpretácie poradia pruhov.....	264
10.2.2 Vzťahy medzi poradím pruhov a veľkosťou namáhania.....	265
10.2.3 Identifikácia poradia pruhov.....	267
10.3 MERANIE SMEROV HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ.....	273
10.3.1 Izoklíny.....	273
10.3.2 Smery hlavných pomerných deformácií v bode.....	274
10.3.3 Smery hlavných pomerných deformácií v celom poli.....	275
10.4 MERANIE PORADIA PRUHOV PRI KOLMOM OSVETLENÍ KOMPENZÁCIOU S NULOVOU ROVNOVÁHOU.....	276
10.4.1 Princíp kompenzácie s nulovou rovnováhou.....	277
10.4.1.1 Kompenzátor s nulovou rovnováhou – model 232 a meranie poradia pruhov.....	277
10.4.1.2 Nastavenie kompenzátoru s nulovou rovnováhou.....	280
10.4.2 Meranie poradia pruhov pri kolmom osvetlení metódou Tardyho (goniometrickej) kompenzácie.....	281
10.4.2.1 Určovanie hlavných pomerných deformácií, resp. hlavných normálových napätí Tardyho (goniometrikou) kompenzáciou.....	283
10.4.2.1.1 Využitie metódy Tardyho kompenzácie pri priamkovej napätosti.....	284
10.4.2.1.2 Použitie Tardyho (goniometrickej) kompenzácie na bočnej stene nosníka.....	285
10.5 SEPARÁCIA HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ.....	286
10.5.1 Rozlíšenie jednotlivých hlavných pomerných deformácií.....	286
10.5.2 Zariadenie so šikmým osvetlením - model 033.....	287
10.5.3 Nastavenie prístroja pre meranie separovaných zložiek hlavných pomerných deformácií.....	287
10.5.4 Postup pri meraní hlavných pomerných deformácií.....	289
10.5.4.1 Znamienkový dohovor používaný pri meraní so šikmým osvetlením pri použití Tardyho (goniometrickej) kompenzácie.....	290
10.5.4.2 Znamienkový dohovor používaný pri kompenzácii s nulovou rovnováhou.....	290
10.5.5 Redukcia údajov.....	291
10.5.6 Separovanie hlavných pomerných deformácií pomocou nomogramov.....	292
10.6 PRÍSLUŠENSTVO ODRAZOVÉHO POLARISKOPU.....	294
10.6.1 Telemikroskop, model 137.....	294



10.6.2 Fotoaparát– model 335	298
10.6.3 Monochromátor – model 036	299
10.6.4 Stroboskopické svetlá – modely 134 a 234.....	300
10.7 AUTOMATICKE SNÍMANIE ÚDAJOV.....	301
10.7.1 Nastavenie a opis zariadenia na určovanie deformácie.....	302
10.7.2 Postup pri meraní smerov a veľkosti hlavných pomerných deformácií.....	305
10.7.3 Kalibrovanie.....	306
10.7.4 Prevádzka zapisovacieho zariadenia - model 532P.....	308
11 MERANIE DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ ODRAZOVÝM POLARISKOPOM PHOTOELASTIC - MODEL 040	311
11.1 OPIS ODRAZOVÉHO POLARISKOPU, JEHO MONTÁŽ A NASTAVENIE.....	311
11.1.1 Všeobecne o odrazovom fotoelascimetri	311
11.1.2 Interpretácia displeja	315
11.2 INTERPRETÁCIA FOTOELASTICKÝCH PRUHOV V CELOM POLI	318
11.3 MERANIE SMEROV HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ	321
11.3.1 Smery hlavných pomerných deformácií v bode	321
11.3.2 Smery hlavných pomerných deformácií v celom poli	323
11.4 MERANIE PORADIA PRUHOV PRI KOLMOM OSVETLENÍ KOMPENZÁCIOU S NULOVOU ROVNOVÁHOU	323
11.4.1 Princíp kompenzácie s nulovou rovnováhou.....	324
11.4.1.1 Nastavenie polariskopu a pozorovanie celého poľa	325
11.4.1.2 Meranie rozdielu hlavných pomerných deformácií	327
11.4.1.3 Meranie rozdielu hlavných normálových napätí.....	327
11.4.1.4 Meranie napätí na okrajoch	328
11.5 SEPARÁCIA HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ A HLAVNÝCH NORMÁLOVÝCH NAPÄTÍ	328
11.5.1 Separácia s využitím separačných tenzometrov.....	329
11.6 PRÍSLUŠENSTVO ODRAZOVÉHO POLARISKOPU	332
12 MERANIE DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ ODRAZOVÝM POLARISKOPOM FL/Z-2	333
12.1 MONTÁŽ ODRAZOVÉHO POLARISKOPU LF/Z-2	335
12.2 PRÍPRAVA POČÍTAČA A NASTAVENIE A OVLÁDANIE POLARISKOPU	336
12.3 ANALÝZA V CELOM POLI.....	337
12.4 SMERY HLAVNÝCH NORMÁLOVÝCH NAPÄTÍ A HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ.....	340
12.5 MERANIE HLAVNÝCH NORMÁLOVÝCH NAPÄTÍ A HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ POMOCOU KOMPENZÁTORA - MODEL 832	340
12.6 PROGRAM PSCALC™ NA VÝPOČET NAPÄTIA A DEFORMÁCIE	342
12.6.1 Výpočet hodnoty $\sigma_1 - \sigma_2$	343
12.6.2 Meranie a výpočet jednotlivých hlavných normálových napätí	344
12.7 ROVNICE PROGRAMU PSCALC™ PRE METÓDU DRÁŽKY AK JE DRÁŽKA V SMERE ε_1	345
12.7.1. Postup merania.....	345
12.7.2. Nástroje na vytvorenie drážky	346
12.7.3. Vytváranie drážky.....	346
13 LITERATÚRA	349