

تحلیل تجربی تنش به روش پوشش تنش تصویری

ابوذر ملکیان^۱، روح اله حسینی^۲ *^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران^۲ دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، تهران، ایران

* مسئول مکاتبات: kprhosseini@ihu.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

تنش تصویری
پوشش
فتوالاستیسیته
تحلیل تنش تصویری
تحلیل تجربی تنش

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۷

استفاده از روش‌های تجربی جهت اندازه‌گیری تنش همواره مورد توجه مهندسان بوده است. اما روش‌های مختلف تجربی مشکلاتی نیز به همراه دارند. در این میان، فتوالاستیسیته روشی تجربی است که به کمک آن قادر خواهیم بود تا تنش و کرنش را در قطعات مختلف و در حالت استاتیکی و دینامیکی اندازه‌گیری کنیم. یکی از زیر مجموعه‌های این تکنیک، روش تنش تصویری است. با استفاده از روش تنش تصویری، یک پوشش پلاستیکی حساس به کرنش بر روی سطح نمونه چسبانده می‌شود. پس از آنکه نمونه تحت بار قرار گرفت، نور پلاریزه شده به پوشش تابانده شده و در نهایت کرنش‌های ایجاد شده بصورت یک الگوی رنگی نشان داده شده و به کمک روش پردازش تصویر، مشخصات تنش و کرنش بدست خواهد آمد. این مقاله به مروری بر فعالیت‌های انجام شده در خصوص روش تنش تصویری پرداخته و در ادامه به بررسی روش محاسبه تنش - کرنش در این روش و خواص پوشش‌ها می‌پردازد.

۱ مقدمه

انجام دادند.

در طراحی مهندسی، مسئله مورد نظر و مهم توزیع تنش قطعه هست. به کمک روش‌های ریاضی می‌توان بطور دقیق یا تخمینی توزیع تنش را بدست آورد. اما اگر تحلیل همراه با آزمایش باشد، نتایج رضایت بخش و مطمئن می‌شود. تمامی مسائل با تحلیل ریاضی قابل حل نیستند و یا جواب مورد نظر را برای طراحی ارائه نمی‌دهند. در نتیجه برای دقت حل مساله و داشتن جوابی مطمئن، از روشهای تجربی استفاده می‌شود.

در برخی موارد، مهندسان از کرنش سنج برای بدست آوردن توزیع تنش در قطعه استفاده می‌کنند، اما با کرنش سنج نمی‌توان توزیع تنش در کل قطعه را بدست آورد، چرا که زمانبر بوده و بایستی از نمونه ای با اندازه واقعی استفاده نمود که این موارد موجب گرانی این روش می‌شود.

فتوالاستیسیته تکنیکی تجربی است که به کمک آن قادر خواهیم بود تا تنش و کرنش را در قطعات مختلف و در حالت استاتیکی و دینامیکی اندازه‌گیری کنیم. اساس این روش بر انکسار مضاعف است که در برخی از مواد، در حالتی که تحت تنش قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد. این پدیده اولین بار توسط بروستر^۱ در سال ۱۸۱۶ بر روی شیشه مشاهده گردید.

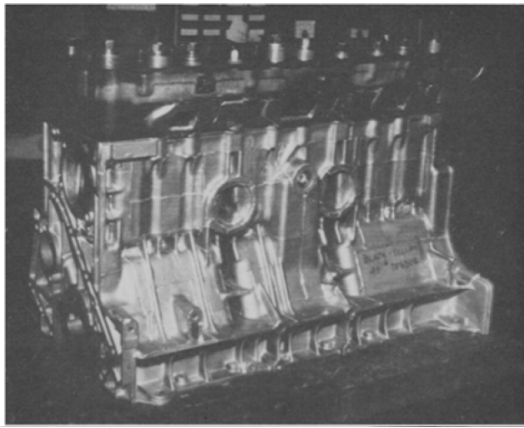
اگرچه شیشه ماده‌ای ایده‌آل برای استفاده در این روش نبود، اما بروستر دریافته بود که این پدیده می‌تواند در اندازه‌گیری تنش مورد استفاده قرار گیرد. مدت‌ها بعد در سال ۱۸۵۳ ماکسول^۲ رابطه‌ای تحلیلی برای این پدیده ارائه کرد. این تکنیک هنوز ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری تجربی تنش نبود تا اینکه وارد قرن بیستم شدیم. در سال ۱۹۳۱ کوکر و فیلون^۳ و همچنین در سال ۱۹۵۰، جساپ و هریس^۴ فعالیت‌های قابل توجهی در این خصوص

مسناجر^۵ اولین شخصی بود که به مطالعه مفهوم فتوالاستیک انعکاسی پرداخت. در ادامه آپال^۶ در سال ۱۹۳۷ به توسعه این روش پرداخت و به جای ذرات شیشه که توسط مسناجر استفاده شده بود از صفحات باکلیت استفاده نمود که هر دوی این مواد پوشش دهنده، چندان برای روش فتوالاستیک ایده‌آل نیست. چرا که شیشه دارای مدول الاستیسیته بالایی بوده و منجر به تقویت شدن قابل ملاحظه نمونه می‌گردد و باکلیت نیز دارای اثرات شدید زمان-لبه هست. در کنار این عیوب، کمبود چسب مناسب برای اتصال این مواد به نمونه نیز از مشکلات این دو ماده پوششی بود. هرتینی^۷ در سال ۱۹۳۸ تلاش‌هایی را برای تحلیل تنش سه بعدی انجام دادند. ساخت رزین‌های اپوکسی در دهه ۵۰ میلادی تاثیر بسزایی بر رشد فتوالاستیسیته نمود [۱].

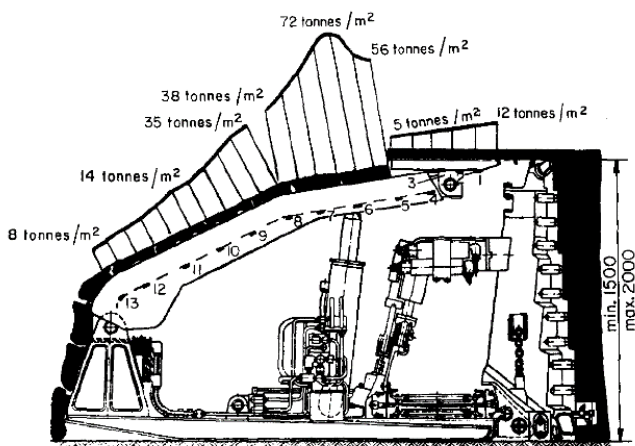
زادمن^۸ در سال ۱۹۶۰ به روشی منحصر به فرد دست یافت که در آن از پلاستیک با قابلیت ایجاد کانتور تنش، جهت پوشش دهی نمونه‌های صنعتی استفاده نمود. زادمن به بررسی مشکلات ناشی از تقویت نمونه توسط مواد پوشش دهنده پرداخت و از فاکتور تصحیح برای تفسیر الگوهای هاله‌ای ایجاد شده جهت استفاده‌های مهندسی پرداخت. این تکنیک هم اکنون با نام تجاری تنش تصویری شناخته می‌شود.

در سال ۱۹۶۱ پست^۹ مفاهیم رفتار مواد پوشش دهنده دو انکساره برای هر دو حالت تنش‌های صفحه‌ای و مسایل کرنش سطحی را توسعه داد. در اجسام الاستیک و برای تنش‌های صفحه‌ای، دقت تنش‌ها یا کرنش‌ها در طول لبه‌های آزاد تماماً مستقل از ضخامت ماده پوشش دهنده هست در حالی که نسبت پواسون ماده پوشش دهنده و نمونه سازه‌ای برابر نباشند، حالت تنش

^۱Brewster ^۲Maxwell ^۳Coker & Filon ^۴Jessop & Harris ^۵Mesnager ^۶Oppel ^۷Hetenyi ^۸Zandman ^۹Post



شکل ۲: موتور خودرو که به روش دایکست تولید شده و پوشش فتوالاستیک بر روی آن پوشانده شده است [۴]



شکل ۳: دیاگرام فشار وارده بر تکیه گاه های سقف معدن [۶] (استفاده از روش پوشش تنش تصویری در محاسبه میزان تنش وارده)

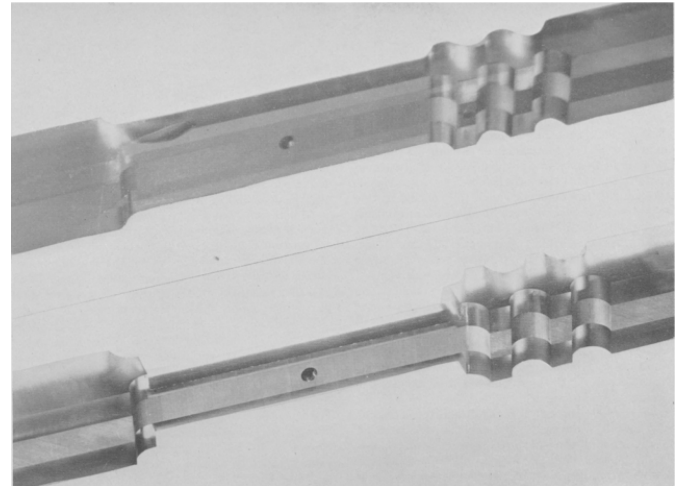
در سال ۱۹۶۶ ترامباچو^۲ از یک شرکت روسی به کاربرد تجربی روش پوشش دهی فتوالاستیک برای محاسبه تنش ها و بارهای بوجود آمده در تکیه گاه های تونل های معدنی پرداخت [۶].

در سال ۱۹۷۵ آدمز^۳ روشی جهت لحاظ نمودن تاثیر تقویتی پوشش جهت اندازه گیری کرنش در سازه فلزی ارائه کرد. روابط ارائه شده در این مقاله که از ویژگی های کرنش سختی فلز سازه و خواص پلاستیک و چسبندگی استفاده می کند، قادر است کرنش ها را در منطقه بعد از تسلیم سازه نیز محاسبه نماید. البته به این شرط که مشخصات تنش-کرنش ماده پوشش دهنده و فلز معلوم باشند [۷].

در سال ۱۹۷۷ بلام^۴ به تحلیل عملی استفاده از این پوشش در تحلیل تنش قطعات یک موتور احتراق داخلی پرداخت [۸].

در سال ۱۹۸۰ دورلی^۵ به بررسی تحلیل نتایج آزمایشات در روش پوشش تنش تصویری پرداخت. او دریافت که ممکن است تفسیر نتایج بدست آمده از این روش کاملاً اشتباه انجام گیرد و منجر به خطاهای فاحش در تحلیل و طراحی سازه گردد. تفسیر صحیح این نتایج نیازمند جداسازی کرنش های اصلی هست که این امر تا آن زمان با سختی های زیادی همراه بوده است. او پیشنهاد داد که سوراخ های ریزی بر روی ماده پوششی ایجاد شده و میزان

در سازه ممکن است متأثر از حضور ماده پوششی باشد. در مقاله پست تست هایی برای چهار هندسه غیر پیوسته با ماده پوششی تا ضخامت ۰/۹ اینچ که نسبت پواسون ماده پوششی و نمونه برابر نمی باشند، انجام گرفته است. نتایج نشان داد که ضخامت ماده پوششی هیچ تاثیری در کرنش لبه ها ندارد [۲].



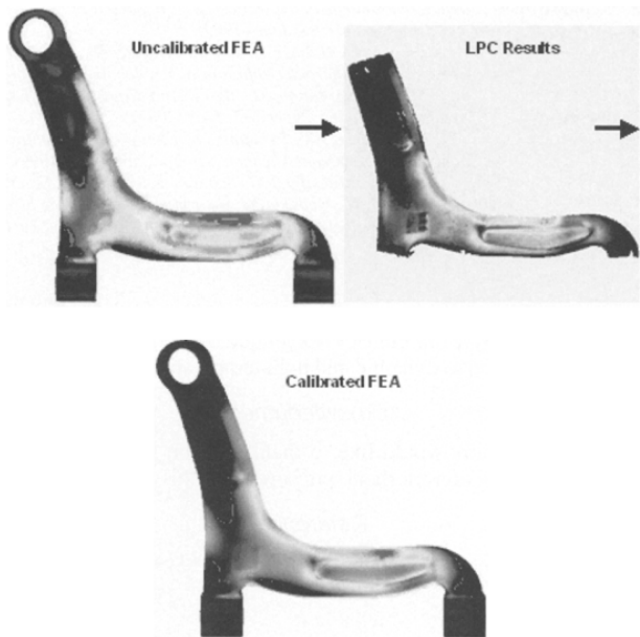
شکل ۱: نمونه کششی با سوراخ عمودی که در بخش های بالا و پایین دارای ضخامت پوششی متفاوت است [۲]

در سال ۱۹۶۲ زادمن به بررسی نقش پوشش در تحمل بخشی از بارهای سازه و همچنین تاثیر ضخامت پوشش در محاسبات میزان کرنش پرداخت. او ضرایب تصحیح خود را به کمک آزمایشاتی در حالت های تنش صفحه ای، خمش ورق ها، پیچش شفت ها، مخازن تحت فشار سیلندری و موارد ترکیب بارگذاری صفحه ای-خمشی بدست آورد [۳].

در سال ۱۹۶۳ زادمن به بررسی استفاده از روش پوشش تنش تصویری در اندازه گیری تنش در میدان های حرارتی پرداخت. او دریافت که اگر ضریب هدایت حرارتی پوشش و ماده مورد تست برابر باشد و همچنین حساسیت اپتیکال-کرنش با دما تغییر ننماید، از این روش می توان در دیگر دماها همانند دمای اتاق استفاده نمود. او ضرایب تصحیح را به روش تحلیلی و تست بدست آورد. ضرایب تصحیح او استفاده از پوشش را برای حالت هایی که ضریب انبساط حرارتی پوشش و قطعه تحت تست اختلاف دارند، امکان پذیر می سازد. کرنش سطحی ناشی از بارگذاری خارجی و نیز تنش های حرارتی می تواند در بازه دمایی منفی ۶۰ تا مثبت ۳۵۰ فارنهایت در این حالت محاسبه گردد [۴].

در سال ۱۹۶۵ ریگان^۱ روشی تجربی جهت محاسبه کرنش ها در تمام نقاط روی سطح سازه ارائه داد. او نوارهای باریک رزین-اپوکسی را بر روی یک فیلم نازک به سطح نمونه مورد مطالعه چسباند. مطالعات او نشان داد که الگوی دو طرفه شدن (شکست دوطرفه) این نوارها تنها به کرنش طولی در راستای محور این نوارها بستگی دارد. زمانیکه این نوارها به همراه پوشش فتوالاستیک پیوسته مورد استفاده قرار می گیرد کرنش سطحی می تواند در همه نقاط و از طریق مشاهده مستقیم الگوهای نوری محاسبه گردد [۵].

¹Regan ²Trumbachew ³Adams ⁴BLUM ⁵Durelli ^۱birefractive



شکل ۶: کالیبره نمودن نتایج تحلیل عددی [۱۱]

در سال‌های ۱۹۸۰ جهش عظیمی در افزایش ظرفیت پردازش کامپیوترها رخ داد و FEM جایگزین دیگر روش‌های سنتی گردید. سرعت و سادگی روش FEM کار را برای مهندسان بسیار راحت کرده بود. اما با وجود اینهمه قابلیت، هنوز به روشی برای صحنه‌گذاری تجربی طراحی نیاز بود. در نتیجه فتوالاستیسیته دوباره به عنوان ابزاری کارا معرفی گردید. فتوالاستیسیته یکی از قدیمیترین روش‌های اندازه‌گیری تجربی تنش بوده و هم اکنون نیز به عنوان ابزاری مدرن جهت تحلیل تنش انواع قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در سال ۱۹۹۷ کویار^۳ به استفاده از تکنیک پوشش تنش تصویری در اندازه‌گیری تنش پسماند پرداخت. تست‌های او بر روی بدنه یک دمنده و سینک شستشو انجام گرفت [۱۲].

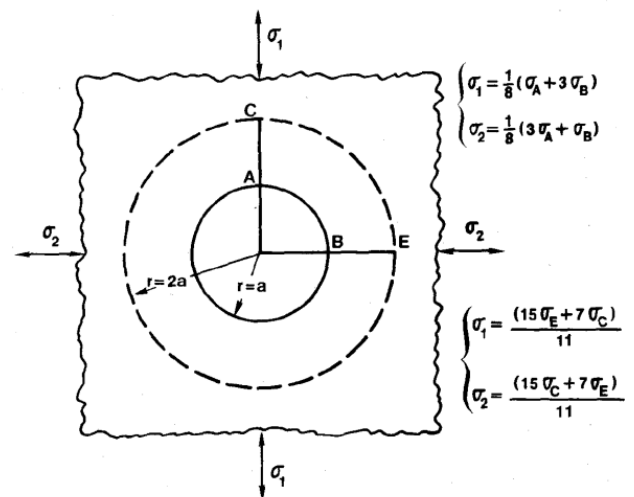
در سال ۲۰۰۴ هابنر و همکاران تکنیک جدیدی جهت اندازه‌گیری میدان‌های کرنش سطحی بر روی اجزا سازه‌ای سه بعدی پیچیده تحت بارگذاری استاتیکی ارائه کردند این روش از نظر هزینه‌ای کاملاً مقرون به صرفه بوده و مناسب جهت استفاده در سیکل طراحی اجزاء به همراه روش‌های المان محدود هست. در این روش از یک پوشش روشن کاملاً جدید به همراه تصویر برداری دیجیتال جهت نگاشت میدان کرنش صفحه‌ای استفاده شده است.

پوشش مورد استفاده شامل یکسری الیاف پلیمری بوده که به همراه این الیاف از یک رنگ روشن (درخشان) استفاده می‌گردد. این رنگ به سطح مورد تست با استفاده از روش افشانه‌ای، اسپری شده و زمانی که این پوشش توسط نور ماوراء بنفش تحریک می‌گردد شدت انتشار از ماده پوششی از طریق یک دوربین دیجیتالی اندازه‌گیری می‌شود. چندین تست پایه‌ای بر اساس این روش در مقاله حاضر انجام گرفته و نتایج ارائه گردیده است.

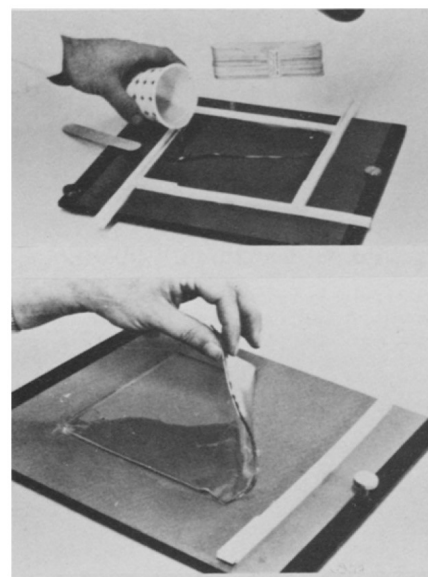
این روش نیاز به تجهیزات پیچیده نداشته و زمان مورد نیاز برای این تست کم بوده و دوام ماده اسپری شده بر روی نمونه بسیار عالی می‌باشد [۱۱].

دوطرفه شدگی^۱ در لبه‌های سوراخ مذکور ثبت گردد. در لبه این سوراخ‌ها تنش تک محور بوده و می‌توان براحتی با توجه به تک محوره بودن، این تنش تک محوره را محاسبه نمود. تئوری مورد نیاز این روش مورد بررسی قرار گرفته و تکنیک‌های مورد نیاز تشریح گشت. او در ادامه دقت این روش نسبت به روش‌های پیشین مورد بررسی قرار داد [۹].

در سال ۱۹۸۰ ردنر^۲ به بررسی مزایای پوشش‌دهی تنش تصویری پرداخت. او به بیان استفاده از این روش تحلیل تنش بر روی اجزاء واقعی و در حین عملکرد و شرایط سرویس دهی قطعات پرداخت. او نحوه استفاده از این روش برای بدست آوردن میدان تنش را ارائه کرد و نشان داد که نحوه کاربرد این روش کاملاً ساده بوده و نیاز به تجهیزات ساده‌ای داشته که همین امر باعث گردیده است این روش از نظر اقتصادی کاملاً مقرون به صرفه باشد چرا که تصویری از میدان تنش بر روی کل منطقه پوشش داده شده بدست می‌آید و کمک شایانی در شناسایی مناطق دچار واماندگی در سازه می‌نماید [۱۰].



شکل ۴: نحوه محاسبه تنشها در راستای ۱ و ۲ با استفاده از سوراخ‌های دایروی در میدان تنش تک محوره [۹]

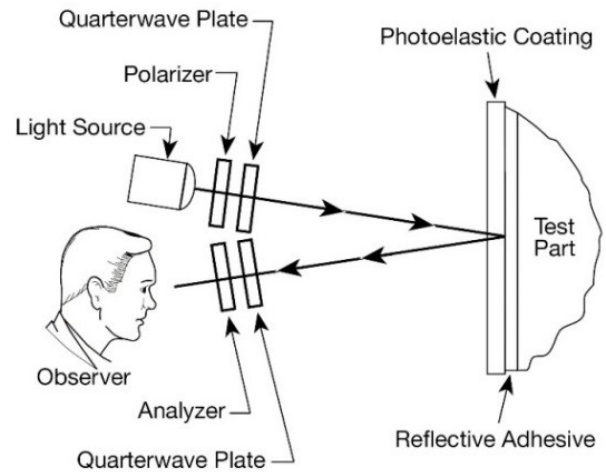


شکل ۵: ایجاد فیلمی از پوشش [۱۰]

²Redner ³Corby

۲ کلیات

تنش تصویری، تکنیکی با کاربری گسترده برای اندازه‌گیری دقیق تنش‌های سطحی در یک قطعه یا سازه تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی هست. با استفاده از روش تنش تصویری، یک پوشش پلاستیکی حساس به کرنش به سطح نمونه چسبانده می‌شود. پس از آنکه نمونه تحت بار قرار گرفت، نور پولاریزه شده به پوشش تابانده می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۷: شماتیکی از پولاریسکوپ انعکاسی [۱۳]

ایجاد شده توزیع کلی کرنش و به تبع آن تنش و همچنین نقاط پر تنش را نشان می‌دهد. با اتصال مبدل (جبرانگر) به پولاریسکوپ نور، الگوی کمی تنش به سرعت بدست خواهد آمد. سابقه توزیع را می‌توان به صورت عکس برداری یا ویدئو ضبط نمود. با استفاده از روش تنش تصویری، می‌توان:

- مناطق بحرانی تحت تنش یا تنش بیش از حد را فوراً شناسایی کرد.
- با دقت بالا حداکثر تنش را تعیین کرده و تنش را در اطراف سوراخ‌ها، لبه‌ها، لبه‌های گرد و ... بدست آورد.
- توزیع تنش در قطعات و سازه را به منظور حداقل کردن وزن و حداکثر قابلیت اطمینان بهینه کرد.
- تنش‌های اصلی و جهات آن را در هر نقطه روی پوشش اندازه‌گیری نمود.
- با تغییر نیرو و بدون تعویض پوشش تست را انجام داده و داده‌برداری نمود.
- تنش را در محل یا در آزمایشگاه بدون اثر رطوبت و زمان اندازه‌گیری نمود.
- تنش‌های مونتاژی و تنش‌های پسماند را مشاهده کرد.
- ناحیه تسلیم و توزیع مجدد کرنش در محیط پلاستیک را مشاهده نمود.

پوشش را می‌توان تقریباً بر روی هر سطح و در هر شکل و اندازه و جنسی نصب کرد. برای پوشش‌های با اشکال پیچیده (شکل ۹)، پلاستیک مایع ابتدا در یک قالب صفحه‌ای ریخته و در حالیکه هنوز پوشش حالت انعطاف پذیر دارد به کمک دست بر روی قطعه، فرم داده می‌شود. هنگامی که پوشش کاملاً سفت شد، به کمک چسب بر روی قطعه چسبانده می‌شود. برای سطوح مسطح، ورق پیش ساخته در اندازه مورد نیاز بریده شده و بطور مستقیم بر روی قطعه نصب می‌شود.



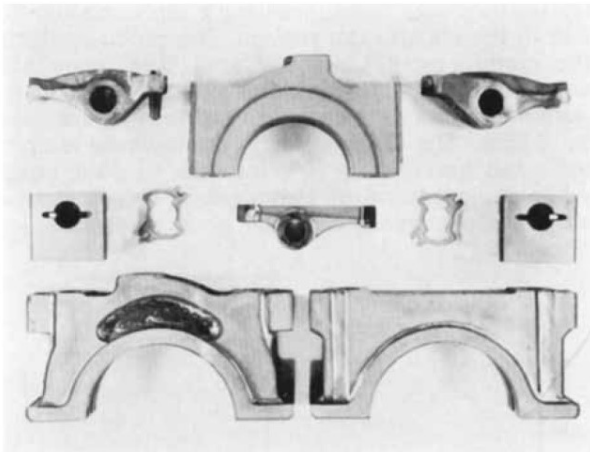
شکل ۹: پوشش شکل داده شده، در حال نصب بر روی پوسته پمپ آب هست [۱۳]

تکنیک اندازه‌گیری تنش به روش پوشش انعکاسی از گذشته‌های دور مورد استفاده بوده و در زمینه‌های مختلفی چون خودرو، ماشین‌آلات کشاورزی، هواپیما، مخازن تحت فشار، پل‌ها، کشتی‌سازی، تجهیزات دفتری و اداری، پل‌ها، لوازم و ... بکار می‌رود [۴].

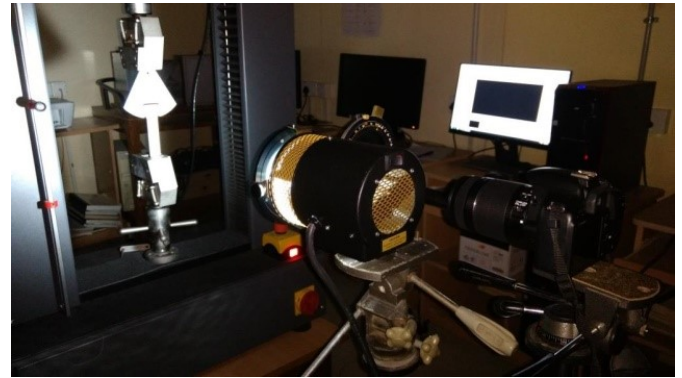


شکل ۸: پولاریسکوپ انعکاسی [۱۴]

هنگامی که از طرف پولاریسکوپ به پوشش نگاه کنیم، پوشش، کرنش‌های ایجاد شده را بصورت یک الگوی رنگی نشان می‌دهد. الگوی



شکل ۱۳: استفاده از پوشش فتوالاستیسیته در اندازه‌گیری کرنش قطعات داخلی موتور [۱۶]



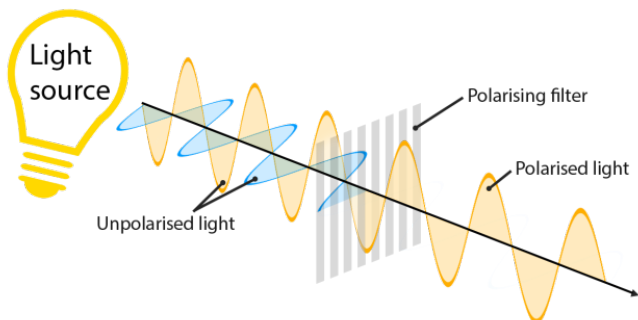
شکل ۱۰: پولاریسکوپ انعکاسی در آزمایشگاه [۱۴]

۳ نور پلاریزه شده

نور، اشعه‌های تابشی و ارتعاشات الکترومغناطیسی مشابه به امواج رادیویی هستند. یک منبع تابشی انرژی را در تمام جهات منتشر می‌کند. این تابش شامل کلیه طیف‌ها و موج‌ها با فرکانس و طول موج متفاوت هست. بخشی از این طیف‌ها، طول موجی بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر دارند که در محدوده ادراکی انسان هست. یک منبع نور، دسته‌ای از امواج را منتشر می‌کند که در آن امواج عمود بر جهت انتشار نور هست.

با عبور نور از فیلتر پولاریزه P (شکل ۱۵) تنها بخشی از این امواج منتقل می‌شود (که به موازات محور اصلی فیلتر است). چنین پرتو نوری به عنوان نور پولاریزه شده یا پولاریسکوپ صفحه‌ای شناخته می‌شود. زیرا امواج بصورت یک صفحه‌ای هستند. اگر فیلتر اضافه A در مسیر نور و بصورت عمود بر فیلتر اول استفاده شود، نور بصورت کامل کور شده و دیگر عبور نمی‌کند.

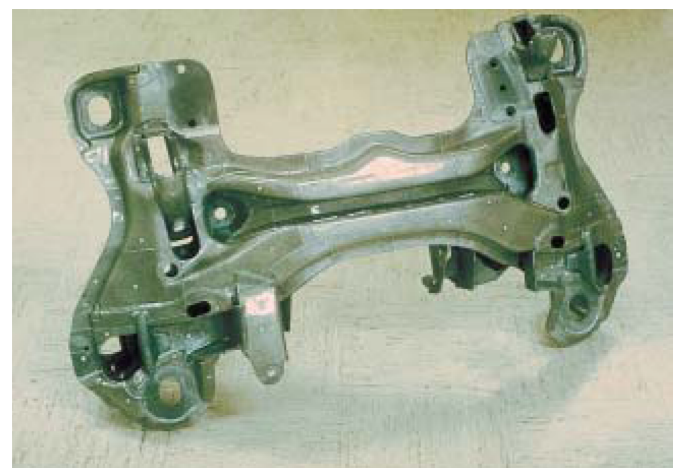
نور منتشر در خلاء یا هوا با سرعت $C = 3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$ منتشر می‌شود. در اجسام شفاف، سرعت V پایین تر بوده و C/V به عنوان شاخص انکسار نامیده می‌شود. در اجسام همسانگرد این شاخص بدون در نظر گرفتن جهت انتشار یا سطح ارتعاش ثابت است. برخی مواد به ویژه پلاستیک، در حالت بدون تنش رفتار همسانگرد دارند اما زمانی که تحت تنش قرار می‌گیرند رفتار نوری ناهمسانگرد دارند. تغییر در ضریب شکست تابعی از تغییر کرنش است که این پدیده مشابه تغییر مقاومت در کرنش سنج‌ها است.



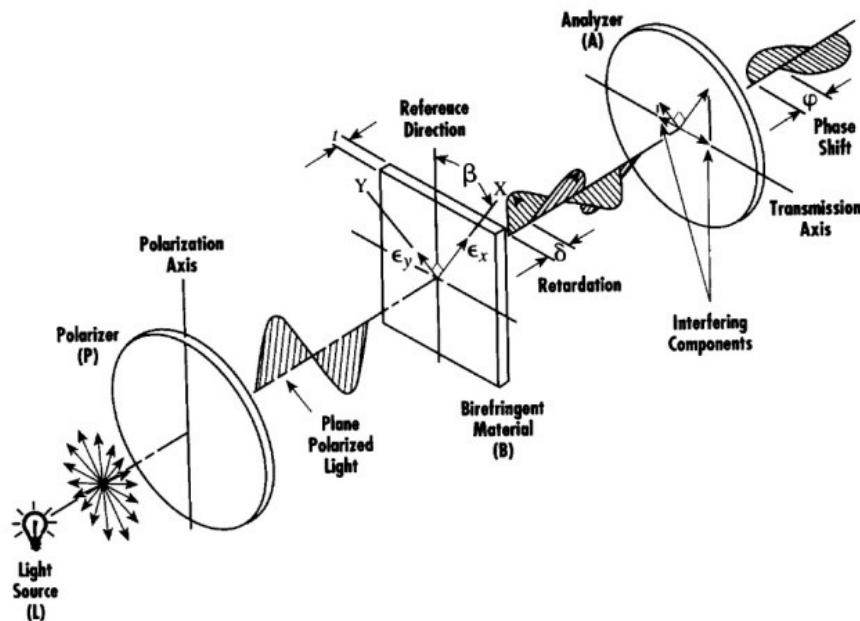
شکل ۱۴: نور پولاریزه شده [۱۷]



شکل ۱۱: پردازش تصویر در پولاریسکوپ انعکاسی [۱۵]



شکل ۱۲: استفاده از پوشش در یک قطعه پیچیده [۱۶]



شکل ۱۵: پولاریسکوپ صفحه‌ای [۱۳]

در نتیجه، رابطه اساسی برای اندازه‌گیری کرنش در تکنیک تنش تصویری (پوشش فتوالاستیک) بصورت زیر هست:

$$(\epsilon_x - \epsilon_y) = \frac{\delta}{\gamma t k} \quad (5)$$

با توجه به عقب ماندگی نسبی δ ، تحلیلگر A تنها یک بخش از این امواج (به موازات A) که در شکل ۱۱ نشان داده شده است را عبور می‌دهد. این امواج تداخل ایجاد کرده و شدت نور تابعی از پارامترهای زیر خواهد بود:

- عقب ماندگی δ
- زاویه بین تحلیلگر و جهت کرنش‌های اصلی $(\beta - \alpha)$

در حالت پولاریسکوپ صفحه‌ای، شدت نور پدیدار شده بصورت زیر است:

$$I = b^2 \sin^2(\beta - \alpha) \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda} \quad (6)$$

زمانی که $\beta - \alpha = 0$ شود و یا هنگامیکه نوری عبوری از فیلتر پولاریزه، تحلیلگر به موازات کرنش‌های اصلی است شدت نور برابر صفر می‌شود. بنابراین، چیدمان پولاریسکوپ صفحه‌ای برای اندازه‌گیری جهات کرنش‌های اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اضافه کردن فیلترهای نوری (که به عنوان صفحات ۱/۴ چهارم موج شناخته می‌شود) در مسیر انتشار نور، نور پلاریزه مدور ایجاد می‌کند (شکل ۱۵) و تصویر مشاهده شده تحت تاثیر جهات کرنش‌های اصلی قرار نمی‌گیرد. شدت نور عبوری عبارتست از:

$$I = b^2 \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda} \quad (7)$$

در پولاریسکوپ صفحه‌ای، در صورت معلوم بودن $\delta = N\lambda$ اختلاف کرنش‌های اصلی بصورت زیر بدست می‌آید:

هنگامی که یک پرتو پولاریزه شده از یک پلاستیک شفاف با ضخامت t (که در آن x و y جهت کرنش‌های اصلی در نقطه تحت بررسی هستند) عبور می‌کند، بردار نور به دو پرتو پولاریزه در صفحات x و y تبدیل می‌شود. اگر شدت کرنش در امتداد x و y به ترتیب ϵ_x و ϵ_y و همچنین سرعت امواج نور در این جهات V_x و V_y باشد، زمان لازم برای عبور از صفحه برای هر یک از آنها برابر t/V خواهد بود و عقب ماندگی نسبی بین این دو باریکه برابر است با:

$$\delta = c \left(\frac{t}{V_x} - \frac{t}{V_y} \right) = t(n_x - n_y) \quad (1)$$

n ضریب شکست است.

قانون بروستر^۱ ثابت می‌کند که "تغییر نسبی در ضریب شکست متناسب با اختلاف کرنش‌های اصلی است" یا:

$$(n_x - n_y) = k(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (2)$$

ثابت K "ضریب کرنش نوری" نامیده می‌شود و نشان دهنده مشخصه فیزیکی ماده است. این یک ثابت بدون بعد بوده و معمولاً با کالیبراسیون بدست می‌آید. این ثابت چیزی شبیه "فاکتور گنج" در کرنش سنج هست. با ترکیب عبارات بالا داریم:

$$\delta = tk(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (3)$$

در انعکاس (نور از پوشش پلاستیکی دو بار عبور میکند).

$$\delta = 2tk(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (4)$$

¹Brewster's law

$$(\epsilon_x - \epsilon_y) = \frac{\delta}{\lambda t K} = N \frac{\lambda}{\lambda t K} = N f \quad (8)$$

جدول ۱: مشخصات حاشیه ایزوکروماتیک [۱۳]

Color	Approximate Relative Retardation		Fringe Order
	nm	$\text{in} \times 10^{-6}$	N
Black	0	0/0	0/0
Pale Yellow	345	14/0	0/60
Dull Red	520	20/0	0/90
Red/Blue Transition	575	22/7	1/00
Blue-Green	700	28/0	1/22
Yellow	800	32/0	1/39
Rose Red	1050	42/0	1/82
Red/Green Transition	1150	45/4	2/00
Green	1350	53/0	2/35
Yellow	1440	57/0	2/50
Red	1520	60/0	2/65
Red/Green Transition	1730	68/0	3/00
Green	1800	71/0	3/10

۵ تحلیل فوتوالاستیک الگوهای حاشیه

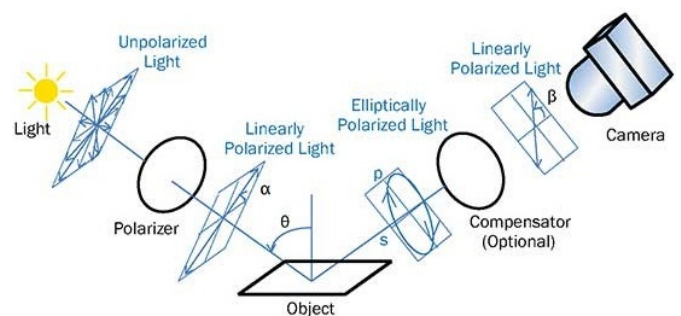
تنش تصویری قابلیت‌های زیر را در تحلیل و اندازه‌گیری ایجاد می‌کند:

۱. تفسیر کامل الگوهای حاشیه، امکان ارزیابی کلی از تنش/ کرنش حداکثری و تغییرات آن
۲. اندازه‌گیری کمی
 - جهات تنش‌ها و کرنش‌های اصلی در تمام نقاط در پوشش فتوالاستیک
 - بزرگی تنش مماسی در مرزهای آزاد (بدون بار) و در مناطقی که در آن حالت تنش تک محوره است.
 - در حالت تنش دو محوره، علامت و اختلاف تنش و کرنش‌های اصلی در هر نقطه دلخواه از سطح پوشش داده شده امکان پذیر است.

۱.۵ تفسیر کامل توزیع کرنش

علاوه بر قابلیت‌های که از آن برای اندازه‌گیری دقیق کرنش در هر نقطه استفاده می‌کنیم، تکنیک تنش تصویری قابلیت‌های دیگری نیز در تحلیل تنش دارد. این تکنیک ابزاری است برای تشخیص سریع تنش‌ها و کرنش‌های اصلی و بزرگی آنها، توزیع کلی کرنش و تشخیص نقاط تحت تنش و بحرانی. این ویژگی بسیار ارزشمندی بوده و به عنوان "تفسیر کامل میدان"^۱ شناخته می‌شود. این قابلیت در میان روش‌های فتوالاستیک منحصر به فرد هست. کاربرد موفق این روش بستگی به تشخیص مرتبه حاشیه به کمک رنگ‌ها و درک رابطه بین مرتبه حاشیه سفارش و بزرگی کرنش دارد. هنگامی که یک پوشش فتوالاستیک تحت بار قرار گرفت، تنش ایجاد شده منجر به کرنش‌هایی می‌شود که از روی سطح قطعه به پوشش منتقل می‌شود. معمولاً تنش و کرنش‌های دارای بیشترین مقدار، از اهمیت بیشتری برخوردار است. کرنش‌های ایجاد شده در پوشش تولید جلوه‌های نوری می‌کند که به عنوان حاشیه ایزوکروماتیک^۲ شناخته شده و در پولاریسکوپ انعکاسی قابل مشاهده است.

الگوی حاشیه تنش تصویری غنی از اطلاعات بوده و بصورت بصری قابل مشاهده است. به دلیل ایجاد تصویر کلی از تنش وارده به قطعه، امکان تحلیل نقاط تحت تنش حداکثر، حذف نقاط تمرکز تنش و تصمیم‌گیری در خصوص استفاده از نقاط عاری از تنش (در سهیم شدن تنش کلی وارده بر قطعه) وجود دارد.



شکل ۱۶: شماتیکی کارکرد پولاریسکوپ انعکاسی [۱۸]

N بیانگر مرتبه حاشیه بوده است. اندازه‌گیری N با توجه به رنگ ایجاد شده است. بدین صورت که با توجه به رنگ و مراجعه به جدول میزان N خوانده می‌شود. با توجه به جدول ۱ می‌توان دریافت که در قرمز مرتبه حاشیه ۱ و در رنگ سبز مرتبه حاشیه ۲ می‌باشد. مرتبه حاشیه در دیگر رنگ‌های میانی در جدول آورده شده است. مقدار f جزو خواص ذاتی پوشش هست. در ادامه نحوه شمارش N با ذکر مثال‌هایی آورده شده است.

۴ تجهیزات و مواد مورد استفاده در تکنیک تنش

تصویری

در تحلیل تنش تصویری، از یک پولاریسکوپ انعکاسی برای مشاهده و اندازه‌گیری کرنش سطحی در سطح تحت پوشش استفاده شده است (شکل ۱۲).

¹full-field interpretation ²isochromatic

نشان می‌دهد. بنابراین هر رنگ نشان دهنده انکسار مضاعف یا مرتبه حاشیه (سطح کرنش) در طول خط رنگ است. با درک این موضوع که الگوهای رنگی در هر حاشیه نقاط هم تنش را نشان می‌دهند می‌توان گفت که این الگوها نقشه توپوگرافی تنش را در قطعه به نمایش گذاشته‌اند.

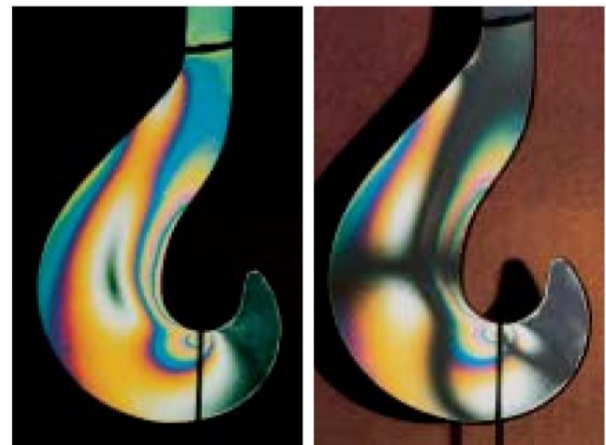
با شروع بارگذاری بر روی قطعه و افزایش میزان بار، الگوهای حاشیه ابتدا در نقاط پر تنش ایجاد می‌شوند (شکل ۱۵). با افزایش بار حاشیه‌های جدید ظاهر شده و به سمت نقاط با تنش کمتر به پیش می‌رود. با بارگذاری بیشتر، حاشیه‌های ایجاد شده همچنان به سمت نواحی با تنش صفر یا کمتر به پیش رفته تا اینکه بار به میزان حداکثری خود می‌رسد. الگوی تولید شده را می‌توان شماره‌گذاری کرد (بصورت اول، دوم، سوم و غیره). این شماره‌گذاری با تغییر میزان بار قابل تغییر خواهد بود.



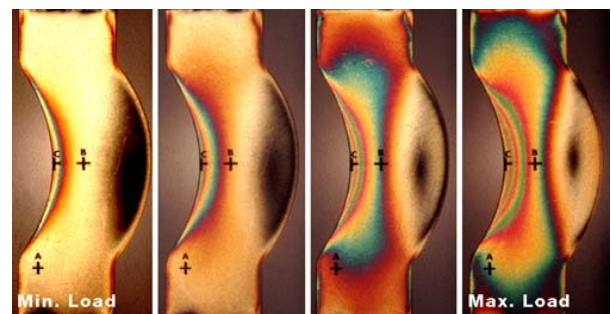
شکل ۱۷: پولاریسکوپ انعکاسی [۱۳]

۳.۵ تشخیص حاشیه

به طور کلی از نور سفید برای تفسیر کامل الگوهای حاشیه در تحلیل تنش تصویری استفاده می‌شود. نور سفید ترکیبی از انواع طول موج‌ها هست. بنابراین، عقب ماندگی نسبی که باعث خاموشی یک طول موج (رنگ) می‌شود در خاموشی کل نور تاثیر گذار نخواهد بود. با افزایش انکسار مضاعف، هر نور با توجه به طول موج خود خاموشی ایجاد کرده (شروع با بنفش که کوتاه‌ترین طول موج قابل مشاهده است) و ناظر طیف کاملی از رنگ‌ها را مشاهده می‌کند. این طیف کامل رنگ‌ها توسط نور سفید قابل تولید هست. ترتیب کامل رنگ‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. برای هر رنگ، عقب ماندگی نسبی و مرتبه عددی حاشیه آمده است. شکل ۲۰ شناسایی حاشیه را در روی یک قطعه که تحت تست کشش تک محوری قرار گرفته، نشان می‌دهد. بدلیل آنکه در هر لحظه چند رنگ دچار خاموشی می‌شوند، بالاترین مرتبه حاشیه بیشتر از اولین، دچار تیرگی می‌گردد. این ناحیه انتقال، بین سبز و قرمز قرار دارد. حاشیه‌های بالاتر از ۴ یا ۵، با نور سفید قابل تشخیص نیستند. اگر چه دستورات حاشیه بالاتر از ۳ به ندرت در تجزیه و تحلیل تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱۸: الگوی تنش در نقاط مختلف قلاب [۱۳]

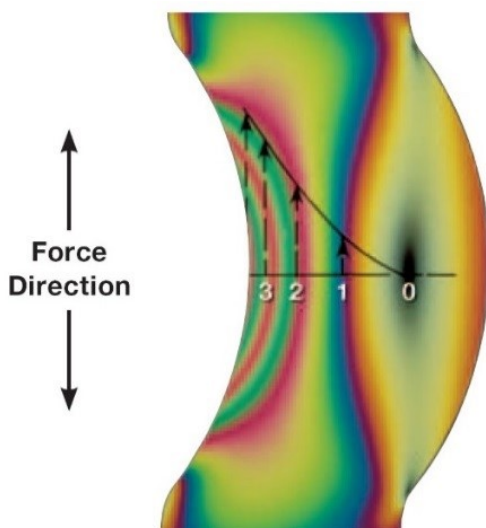


شکل ۱۹: افزایش نیرو در قطعه مورد تست [۱۳]

بدین ترتیب تحلیل تنش نمونه اولیه می‌تواند به طراحی مجدد برای رسیدن به وزن کمتر و کارایی بیشتر کمک کند. علاوه بر آن، این تکنیک به راحتی قابلیت مقایسه تنش حاصل از بارهای منفرد و بارکلی را در اختیار قرار می‌دهد. این مثال‌ها نشان دهنده آن است که تکنیک تنش تصویری اطلاعاتی در اختیار قرار می‌دهد که گویا توزیع تنش با کاربر سخن می‌گوید و این حالت قابل مقایسه با تکنیک‌های نقطه‌ای و کور اندازه‌گیری کرنش نیست.

۲.۵ تولید حاشیه

هنگامی که با یک پولاریسکوپ انعکاسی به قطعه نگاه می‌کنیم، الگوی حاشیه بصورت یک سری رنگ‌های بهم پیوسته مشاهده می‌شود (ایزوکروماتیک). هر باند نشان دهنده یک درجه از انکسار مضاعف بوده و یک تنش خاص را



شکل ۲۰: توزیع کرنش با تشخیص مرتبه حاشیه [۱۳]

هر نقطه از حاشیه منحصر به فرد است. علاوه بر این، همواره توالی در رنگ و شماره در حاشیه وجود دارد. بدین معنی که اگر حاشیه اول و سوم شناسایی شدند، حاشیه دوم حتماً ما بین آن قرار دارد. توالی رنگ در هر جهت، افزایش یا کاهش در آن جهت را تصدیق می‌کند.

با توجه به ویژگی‌های ذکر شده برای الگوی حاشیه فتوالاستیک، این الگوها می‌توانند همانند یک نقشه توپوگرافی رنگی در نظر گرفته شوند. در نتیجه، هر الگوی فتوالاستیک می‌تواند به عنوان نقشه‌ای از خطوط متفاوت (بدون توجه به علامت) بین تنش و کرنش‌های اصلی در سطح خارجی نمونه در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، اندازه کرنش، به اندازه سطح ارتفاع در نقشه توپوگرافی هست.

اگر حاشیه مرتبه صفر در الگو وجود داشته باشد معمولاً با رنگ سیاه و سفید خود را نشان می‌دهد. فرض کنید که منطقه پوشش داده شده گوشه آزاد یا نقطه‌ای است که عاری از تنش هست، در اینصورت مرتبه حاشیه صرفنظر از میزان نیرو، صفر خواهد شد.

هنگامی که یک حاشیه تشخیص داده شد مرتبه آن را با توجه دیگر حاشیه‌ها می‌توان تشخیص داد. باید مطمئن شد که جهت افزایش مرتبه حاشیه متناسب با توالی صحیح رنگ‌ها است؛ زرد، قرمز، سبز و

به کمک این فرآیند کاربر قادر خواهد بود بالاترین مرتبه حاشیه را شناسایی کرده و ناحیه با بیشترین کرنش را تشخیص دهد. با کمی تأمل می‌توان دریافت که سطوح وسیع با رنگ‌های خاکستری یا سیاه معمولاً مناطق عاری از تنش هستند.

در بسیاری از موارد فرآیند یافتن بالاترین مرتبه حاشیه، کاربر تحلیلگر تنش را به یک یا چند نقطه در مرز آزاد سوق می‌دهد. هنگامی که این اتفاق می‌افتد، تحلیلگر تنش می‌داند که تنش اصلی غیر صفر در چنین نقطه‌ای مماس به مرز است و بزرگی آن را می‌توان به طور مستقیم با ضرب مرتبه حاشیه در یک ثابت به دست آورد. علامت تنش (فشاری یا کشش) به راحتی به کمک پولاریسکوپ انعکاسی تعیین می‌شود.

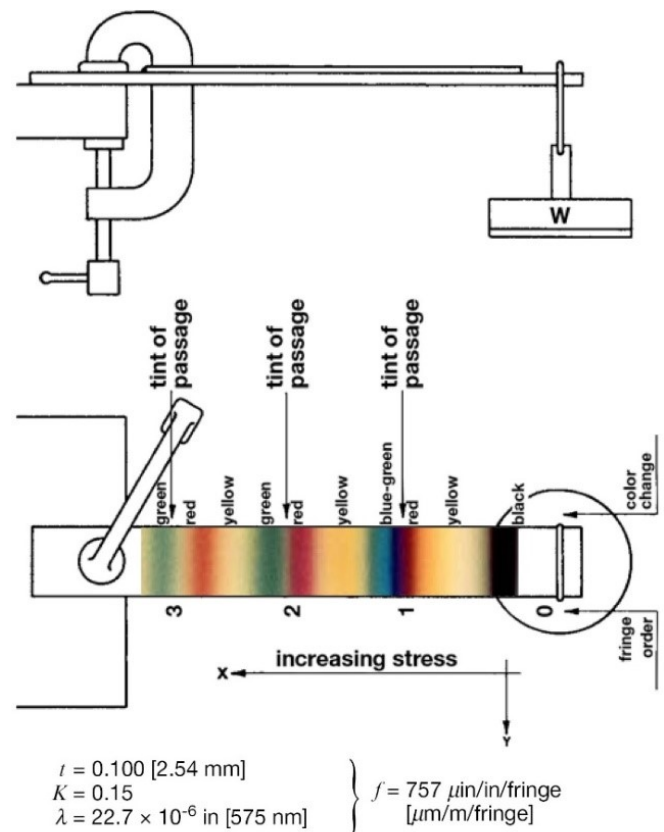
۶ اندازه‌گیری جهت کرنش اصلی

جهات کرنش اصلی همیشه با توجه به خطوط و صفحات اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، گام اولیه برای تعیین جهت و کرنش‌های (و یا تنش‌های) اصلی انتخاب مرجع مناسب هست. البته در اغلب موارد، جهت مرجع پیشنهاد داده می‌شود.

هنگامی که یک پرتو پلاریزه شده نور به یک پوشش فتوالاستیک برخورد می‌کند، به موج‌هایی با سرعت‌های متفاوت و در طول جهات اصلی کرنش تقسیم می‌شود.

پس از خروج نور از پوشش پلاستیک، این دو موج خارج از فاز یکدیگر بوده و همانند یک نور واحد، موازی نور تابیده شده به پوشش نخواهند بود. با این حال، در نقاطی که جهت تنش‌های اصلی به موازات محور فیلتر پلاریزه است، پرتو تخت تابیده شده به موازات پرتو ورودی خواهد بود. محور فیلتر تحلیلگر A عمود بر فیلتر پلاریزه p بوده و بار دیگر ارتعاشات در این نقاط را حذف می‌کند (شکل ۲۲ را ببینید).

یک تیر ساده یک سرگیر دار مطابق شکل ۲۱ تحت نیرو قرار گرفته است. برای ارتباط مرتبه حاشیه با کرنش این تیر را مورد بررسی قرار می‌دهیم. قسمت بالایی تیر توسط پوشش پلاستیک مخصوص تکنیک تنش تصویری پوشش داده شده و این پوشش از یک طرف محکم گرفته شده است. با استفاده از یک سیم و یا کابل، وزنه‌ای به انتهای آزاد تیر وصل می‌کنیم. هنگامی که با پولاریسکوپ (با استفاده از نور دایروی) به تیر نگاه می‌کنیم، افزایش عقب ماندگی متناسب با کرنش مشاهده می‌گردد.



Fringe Order, N	Strain, $(\epsilon_x - \epsilon_y) = Nf$
0 (Black Fringe)	0
1 (Red-Blue)	$757 \mu\text{in/in } [\mu\text{m/m}] (1f)$
2 (1st Red-Green)	$1514 \mu\text{in/in } [\mu\text{m/m}] (2f)$
3 (2nd Red-Green)	$2271 \mu\text{in/in } [\mu\text{m/m}] (3f)$

شکل ۲۱: تحلیل تنش تصویری در یک تیر یکسرگیردار حاشیه به افزایش مقدار کرنش (مطابق با جدول) وابسته است. به رابطه ۸ که ارتباط بین تنش/کرنش و مرتبه حاشیه را نشان می‌دهد توجه کنید [۱۳].

۴.۵ اهمیت کمی حاشیه

حاشیه فتوالاستیک دارای مشخصه‌های رفتاری است که در تفسیر الگوی حاشیه بسیار مفید است. در یک لحظه هر الگو یک نوار پیوسته، حلقه بسته یا خطوط منحنی است.

حاشیه سیاه مرتبه صفر معمولاً در نقاط ایزوله، خطوط و یا مناطق احاطه شده یا در مجاورت حاشیه مرتبه بالاتر قرار دارند. حاشیه هرگز قطع نشده و خصوصیات خود را از دست نمی‌دهد، بنابراین مرتبه حاشیه و سطح کرنش در

۷ اندازه‌گیری میزان تنش و کرنش

مرتب‌ه حاشیه مشاهده شده در تکنیک تنش تصویری متناسب با اختلاف بین کرنش‌های اصلی در پوشش (و در سطح مورد تست) هست. این رابطه ساده خطی به صورت زیر بیان [تکرار معادله (۸)] می‌شود:

$$\epsilon_x - \epsilon_y = Nf \quad (9)$$

در این رابطه:

کرنش‌های اصلی	$\epsilon_x - \epsilon_y$
مرتب‌ه حاشیه	N
اندازه حاشیه در پوشش	f
طول موج (در نور سفید ۵۷۵ nm)	λ
ضخامت پوشش	t
ثابت کرنش نوری مربوط به پوشش	K

اهمیت این فرمول در آن است که از اختلاف کرنش‌های اصلی، حداکثر کرنش برشی در سطح مورد تست بدست خواهد آمد. این کار به راحتی تشخیص مرتبه حاشیه و ضرب آن در ضریب حاشیه پوشش هست. مهندسان و طراحان اغلب با تنش به جای کرنش کار می‌کنند. برای این منظور، معادلات (۸) و (۹) می‌تواند به کمک قانون هوک و برای تنش دو محوره در مواد همسانگرد بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_x - \nu\epsilon_y) \quad (10)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_y - \nu\epsilon_x) \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1+\nu}(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (12)$$

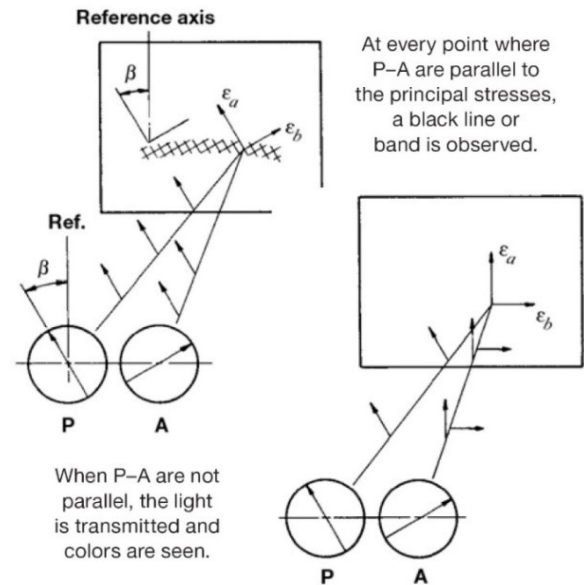
معادله (۸) را در معادله (۱۲) جایگذاری می‌کنیم:

$$\epsilon_x - \epsilon_y = \frac{E}{1+\nu}Nf \quad (13)$$

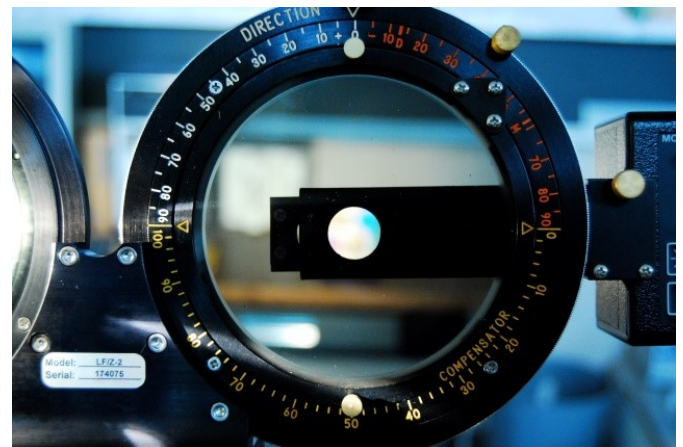
تنش‌های اصلی در سطح قطعه $\epsilon_x - \epsilon_y$
مدول الاستیک قطعه مورد تست E
ضریب پواسون مورد تست ν
حداکثر تنش برشی τ_{max} در هر نقطه از رابطه $(\epsilon_x - \epsilon_y)/2$ بدست می‌آید. داریم:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{1+\nu}Nf \right) \quad (14)$$

معادلات (۸) و (۱۳) روابط اولیه مورد استفاده در تحلیل تنش پوشش فتوالاستیک هستند و تنها تفاوت اندازه تنش‌های اصلی را بدست می‌دهند نه مقدار هر کدام از آنها را. برای تعیین مقدار و علامت تنش‌ها یا کرنش‌های اصلی (در حالت دو محوری) به رابطه دیگری نیاز است. برای حالت تنش دو محوری، رابطه دیگر اندازه‌گیری مجموع کرنش‌های اصلی است. برای مثال در یک شفت تحت گشتاور پیچشی رابطه $\epsilon_x - \epsilon_y = -1$ و برای مخازن جدار نازک تحت فشار رابطه $\epsilon_x/\epsilon_y = 2$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادلات می‌تواند با رابطه (۱۳) ترکیب شده و تنش‌های اصلی را بدست دهد. حالتی را در نظر بگیرید که تنش تک محوره است. در اینصورت معادله ۱۳ می‌تواند بصورت زیر خلاصه شود:



شکل ۲۲: جهت تنش اصلی با چرخش محور پولاریزه / تحلیلگر برای تولید نقاط تاریک از نور، آشکار می‌گردد [۱۳].



شکل ۲۳: جهات تنش‌های با چرخش فیلتر پولاریزه / تحلیلگر برای حذف نور در نقطه مورد نظر انجام می‌گیرد. در اینجا از پولاریسکوپ صفحه ای استفاده می‌گردد. پس از ظاهر شدن ایزوکلینیک در نقطه مورد نظر، جهت به کمک جهات‌های مرجع تعیین می‌گردد [۱۳].

با مشاهده قسمت تحت تنش در پولاریسکوپ انعکاسی (شکل ۲۳) خطوط (و یا حتی مناطق) سیاه و سفید، ظاهر می‌شود. این خطوط ایزوکلینیک^۱ نامیده می‌شود. در هر نقطه بر روی ایزوکلینیک، جهات کرنش‌های اصلی موازی جهت پولاریسکوپ‌های A و P هست. با توجه به محور انتخابی، اندازه‌گیری جهت در یک نقطه به سادگی و با چرخش A و P با هم تا زمانی که یک ایزوکلینیک سیاه و سفید در نقطه پدیدار گردد، امکان پذیر است.

اگر ایزوکلینیک‌ها باریک و تیز باشند بدان معناست که جهات ϵ_x و ϵ_y به سرعت از یک مکان به مکان دیگر تغییر می‌کند. ایزوکلینیک‌هایی با خطوط پهن و سیاه مربوط به مناطقی است که جهات ϵ_x و ϵ_y به آرامی تغییر می‌کند. هنگامی که این اتفاق می‌افتد، مرز اطراف کل ایزوکلینیک باید علامت‌گذاری شود (نه صرفاً مرکز).

¹isoclinics

۸ خواص پوشش

$$\epsilon_x = \frac{E}{1 + \nu} N f \quad (15)$$

انتخاب پوشش و بکارگیری مناسب آن نقش اساسی را در یک تحلیل تنش موفق بازی می‌کنند. طیف گسترده‌ای از پوشش‌ها (شکل ۲۵) بصورت تخت و مایع برای استفاده در فلزات، بتن، پلاستیک و ... در دسترس است. پوشش‌ها مخلوط دقیقی از رزین‌ها هستند تا خواص فتوالاستیک تکرار پذیری را ایجاد نمایند. همچنین لوازم جانبی شامل همه موارد مورد نیاز برای نصب و راه اندازی موفق پوشش بر روی قطعات هست.

۱. یک پوشش ایده‌آل فتوالاستیک باید خصوصیات زیر را داشته باشد:
۱. ضریب کرنش K بالایی داشته باشد تا با ضخامت کم بتواند اطلاعات اپتیکی کافی را بدهد.
۲. مدول یانگ پایین داشته باشد تا ضخامت پوشش به عنوان مقاومتی در مسیر نیرو نباشد.
۳. رابطه تنش-کرنش و کرنش-حاشیه خطی باشد.
۴. به راحتی قابل نصب بر روی نمونه‌ها با جنس‌های متفاوت باشد.
۵. قابلیت ماشینکاری خوب داشته باشد.
۶. قابلیت انعطاف کافی برای نصب روی سطوح منحنی و اجزای پیچیده را داشته باشد.



شکل ۲۵: پوشش مورد استفاده در تحلیل تنش تصویری: صفحات تخت، پلاستیک مایع برای ایجاد ورق‌های ریخته‌گری کنترل شده، چسب‌ها [۱۹].

انتخاب ماده پوشش دهنده بستگی به جنس نمونه و سطح کرنش وارده به آن دارد. پوشش‌های خاصی برای نمونه‌های با مدول بالا (فلزات)، مدول متوسط (غیر فلزات) و مدول پایین (مشابه لاستیک) وجود دارد. معمولاً ورق‌های از پیش آماده با ضخامت‌های ۳-۰/۲۵ mm وجود دارد. مواد مایع از پیش آماده‌ای وجود دارد که با ترکیب آنها می‌توان به روکش انعطاف پذیر دست یافت. ضریب کرنش K این پوشش معمولاً پایین‌تر از پوشش ورقی از پیش آماده است. البته کار با این پوشش مهارت خاص خود را می‌طلبد [۲۰]. سازندگان دستگاه تجاری تنش تصویری جدولی را برای انتخاب پوشش ارائه کرده‌اند. جهت استفاده از این جدول می‌بایست اندازه f را در اختیار داشت. f از تقسیم سطح کرنش بر مرتبه حاشیه بدست می‌آید. به کمک این پارمتر و دیگر خصوصیات ذکر شده در نمودار می‌توان به ضخامت ایده‌آل پوشش جهت نصب بر روی نمونه دست یافت.

موردی را در نظر بگیرید که یکی از تنش‌های اصلی سطحی در نمونه مستقیم و با سطح مقطع یکنواخت و در حالت کششی یا فشاری (یا خمشی) صفر است. حتی برای اعضای نسبتاً مخروطی، حالت تنش بسیار نزدیک به تک محوره بوده و معادله (۱۵) می‌تواند با یک تقریب بسیار خوب بکارگرفته شود.

بطور مثال یک نمونه سوراخ شده را در نظر بگیرید. در هر نقطه بر روی لبه سوراخ، محورهای اصلی نرمال و مماس به لبه هست. از آنجا که تنش نرمال اصلی لبه لزوماً صفر است، حالت تنش تک محوره بوده و تنها تنش اصلی غیر صفر مماس به لبه سوراخ هست. موارد بسیار دیگری، همچون فلنج‌ها، رینگ‌ها و قطعات "دو بعدی" دیگری وجود دارد که در آن حالت تنش در لبه، تک محوره است. در همه این موارد، تنها تنش اصلی غیر صفر، مماس به لبه بوده و مستقیماً از روی مرتبه حاشیه و جایگذاری در معادله (۱۵) و یا از ضرب مرتبه حاشیه در یک ثابت تعیین می‌گردد.

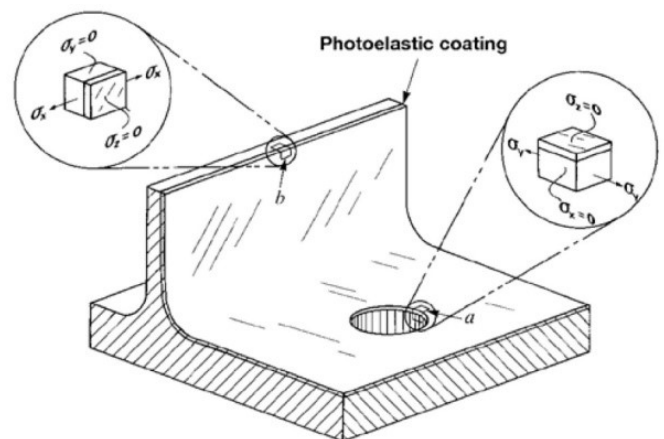
شکل ۲۴ قطعه‌ای فولادی را نشان می‌دهد که توسط یک پوشش تنش تصویری پوشانده شده است. پوشش با دقت بالا و لب به لب سوراخ چسبانده شده است.

حالت تنش در نقاط a و b تک محوره می‌باشد. با مشاهده پوشش از طریق دوربین پولاریسکوپ مرتبه حاشیه در نقطه a برابر ۲ مشاهده و در نقطه b برابر ۳/۴ مشاهده می‌گردد. اعداد حاصل از کالیبراسیون دستگاه نشان می‌دهد که هر مرتبه حاشیه برابر است با $1100 \mu\epsilon$ بنابراین با استفاده از معادله ۱۵ و برای جنس فولاد داریم:

$$\frac{E}{1 + \nu} = 162 \text{ GPa}$$

$$\sigma_x = 162 \times 10^9 \times 1100 \times 10^{-6} \times 2 = 356 \text{ MPa}$$

به طریقی مشابه تنش در نقطه b برابر با ۱۳۴ Mpa بدست خواهد آمد.

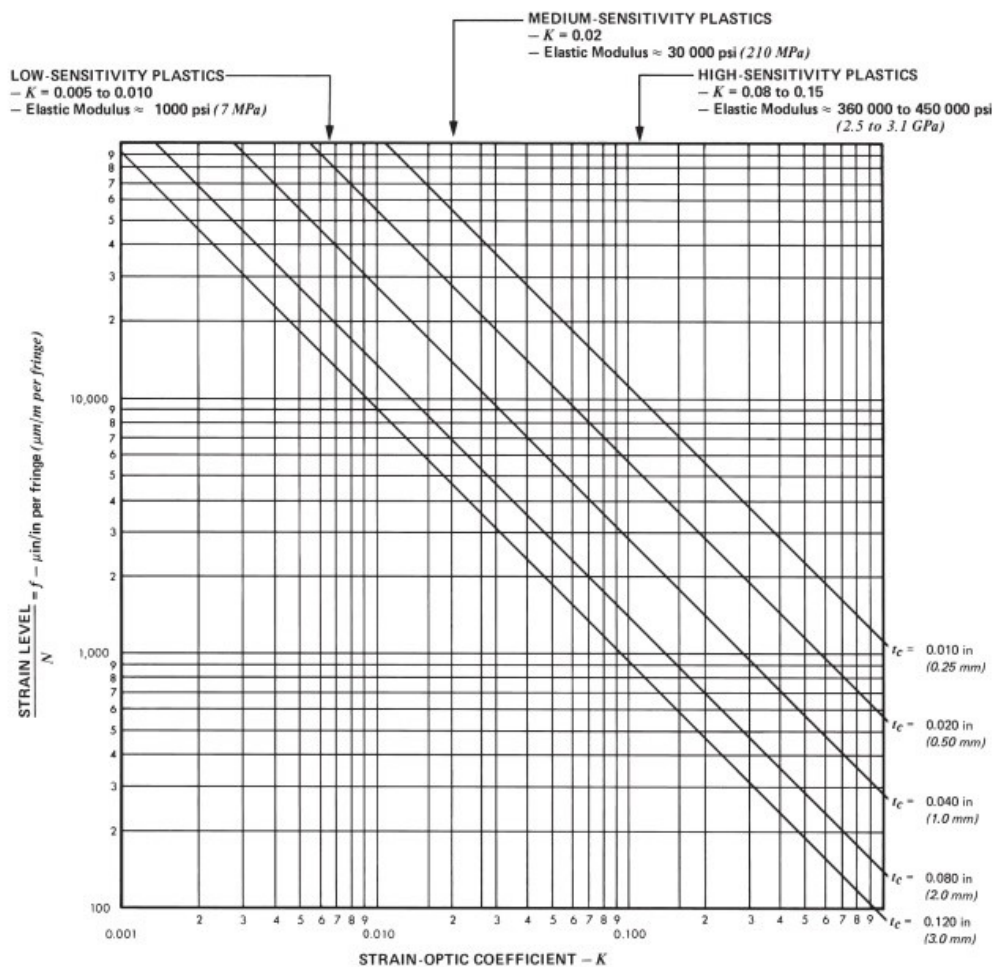


شکل ۲۴: بخش از یک عضو آزمون پوشش داده شده نشان تنش تک محوری بر روی لبه‌های رایگان [۱۳].

جدول ۲: خواص پوشش‌های فتوالاستیک [۲۰]

Material	E_c (GPa)	ν_c	K	Strain Limit %	Max. usable Temp. °C	Suitability
Coating Suitable for High Modulus Materials (Metallic Specimens)						
Polycarbonate	۲/۲۱		۰/۱۶			Flat
PS-۱ [†]	۲/۵۰	۰/۳۸	۰/۱۵	۱۰	۱۵۰	Flat
PS-۲ [†]	۳/۱۰	۰/۳۶	۰/۱۳	۳	۲۶۰	Flat
PS-۸ [†]	۳/۱۰	۰/۳۶	۰/۰۹	۳to۵	۲۰۰	Flat
PL-۱ liquid [†]	۲/۹۰	۰/۳۶	۰/۱۰	۳to۵	۲۳۰	Contourable
PL-۸ liquid [†]	۲/۹۰	۰/۳۶	۰/۰۸	۳to۵	۲۰۰	Contourable
Polyester	۳/۸۶		۰/۰۴	۱/۵		Flat
Epoxy with anhydride	۳/۲۸		۰/۱۲	۲/۰		Flat / Contourable
Coating Suitable for Medium Modulus Material (Non-metallic specimens)						
PS-۳ [†]	۰/۲۱	۰/۴۲	۰/۰۲	۳۰	۲۰۰	Flat
PL-۲ liquid [†]	۰/۲۱	۰/۴۲	۰/۰۲	۵۰	۲۰۰	Contourable
Coating Suitable for Low Modulus Materials (Rubber)						
Polyurethane	۰/۰۰۴		۰/۰۰۸	۱۵		Flat
PS-۴ [†]	۰/۰۰۴	۰/۵۰	۰/۰۰۹	> ۵۰	۱۷۵	Flat
PL-۳ liquid [†]	۰/۰۱۴	۰/۴۲	۰/۰۰۶	> ۵۰	۱۵۰	Contourable

[†]Courtesy Measurements Group, Inc., Raleigh, NC, USA.



شکل ۲۶: انتخاب ضخامت مناسب پوشش [۱۹].

۹ نتیجه گیری

تکنیک تنش تصویری روشی آسان، غیر مخرب و دارای کاربری گسترده هست. این روش می‌تواند تحلیل جامعی از سطح تحت تنش در اختیار کاربر قرار دهد. به جرأت می‌توان گفت هیچ تکنیک تجربی تحلیل تنش اطلاعاتی به این وسعت را در سرتاسر قطعه در اختیار کاربر قرار نمی‌دهد. به کمک پیشرفت های صورت گرفته در دهه های اخیر می‌توان به راحتی تنش و کرنش را در دماهای مختلف، بارگذاری های متفاوت، جنس های مختلف، سطوح با پیچیدگی های متفاوت (مانند بدنه موتور) و ... را بصورت استاتیکی و دینامیکی مورد تحلیل قرار داد. غیر مخرب بودن، تکرارپذیری، قابلیت استفاده در حد تسلیم الاستیک و پلاستیک ماده و در نهایت ارزانی نسبی این روش آن را به روشی محبوب برای تحلیل تنش تبدیل کرده است.

مراجع

- [10] Redner, Alex S. Photoelastic coatings. *Experimental Mechanics*, 20(11):403-408, 1980.
- [11] Hubner, JP, Ifju, PG, Schanze, KS, Liu, Y, Chen, L, and El-Ratal, W. Luminescent photoelastic coatings. *Experimental Mechanics*, 44(4):416-424, 2004.
- [12] Corby Jr, Thomas W and Nickola, Wayne E. Residual strain measurement using photoelastic coatings. *Optics and lasers in engineering*, 27(1):111-123, 1997.
- [13] Introduction to stress analysis by the photostress® method. <http://www.vishaypg.com>.
- [14] Application of photostress method in the analysis of stress fields around a notch. <http://pubs.sciepub.com/ajme/1/7/35/>.
- [15] The lf/z-2 computer ized ref lection polar iscope system for full-field stress analysis. <http://www.vishaypg.com>.
- [16] Micro-Measurements. Photostress. <https://www.photostress.com>.
- [17] Linear polarized 3d glasses and the physical shape of light waves. <https://physics.stackexchange.com/>.
- [18] Focus on polarization. <https://www.photonics.com>.
- [19] TN, Tech Note. How to select photoelastic coatings. <http://www.vishaypg.com>.
- [20] Ramesh, K. Fusion of digital photoelasticity, rapid prototyping and rapid tooling technologies. in *Digital Photoelasticity*, pp. 347-367. Springer, 2000.
- [1] Solaguren-Beascoa Fernández, M, Alegre Calderón, JM, Bravo Diez, PM, and Cuesta Segura, II. Stress-separation techniques in photoelasticity: a review. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 45(1):1-17, 2010.
- [2] Post, Daniel and Zandman, Felix. Accuracy of birefringent-coating method for coatings of arbitrary thickness. *Experimental Mechanics*, 1(1):21-32, 1961.
- [3] Zandman, Felix, Redner, SS t, and Riegner, EI. Reinforcing effect of birefringent coatings. *Experimental Mechanics*, 2(2):55-64, 1962.
- [4] Zandman, F, Redner, SS, and Post, D. Photoelastic-coating analysis in thermal fields. *Experimental Mechanics*, 3(9):215-221, 1963.
- [5] O'Regan, Richard. New method for determining strain on the surface of a body with photoelastic coatings. *Experimental Mechanics*, 5(8):241-246, 1965.
- [6] Trumbachev, VF and Katkov, GA. Experimental application of photoelastic coatings for the determination of stresses and loads on the supports of mining excavations. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 3, pp. 337-347. Elsevier, 1966.
- [7] Adams, C and Beese, JG. The reinforcing effect of birefringent coatings when applied to plastically deformed structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 8(9):1084, 1975.
- [8] Blum, AE. The use and understanding of photoelastic coatings. *Strain*, 13(3):96-101, 1977.
- [9] Durelli, AJ and Rajaiah, K. Determination of strains in photoelastic coatings. *Experimental Mechanics*, 20(2):57-64, 1980.