

فصل چهارم

متروولوژی

مقدمه

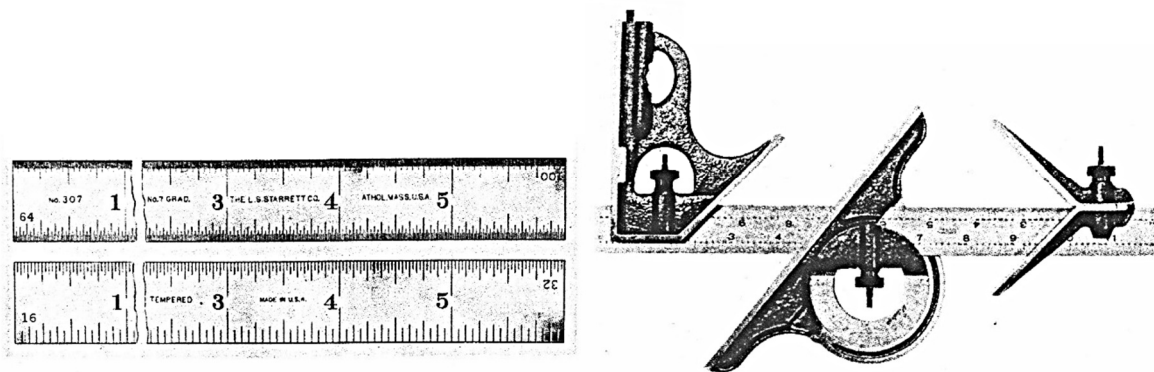
در این بخش به مطالعه و سایل اندازه گیری ابعاد پرداخته می شود. طول، زمان، جرم و دما چهار کمیت اصلی معرفی شده در سیستم اندازه گیری بین المللی می باشند و بقیه کمیت ها از این چهار کمیت نتیجه می شوند. شکل (۴-۱) منتج شدن کمیت های دیگر از این چهار واحد را نشان می دهد. خطوط ممتد نشانگر عمل ضرب و خط چین ها نمایانگر عمل تقسیم می باشند.

تا سال ۱۹۶۰ استاندارد طول عبارت بود از میله ای از جنس پلاتینیوم- ایریدیم که در موزه شهر لوور فرانسه نگهداری می شود (شکل ۴-۲). در این سال تعریف متر استاندارد عوض شد و مطابق تعریف جدید یک متر برابر با ۱۶۵۰۷۳۶۷۳ برابر طول موج نور لامپ کریتون ۸۶ می باشد. دقت حاصل شده با این روش ۲ واحد در ۱۰^8 مورد اندازه گیری است و در گستره ی 10^{-8} in تا 40 in امکان اندازه گیری وجود دارد. اما استاندارد ذکر شده برای درجه بندی مناسب نیست. مؤسسه بین المللی استانداردها و تکنولوژی (NIST) نیز استانداردهای مبنایی را معرفی کرده است. این استانداردهای آزمایشگاهی دقت کمتری دارند اما برای مقاصد کاربردی مهندسی مناسب تر می باشند (شکل ۴-۳).

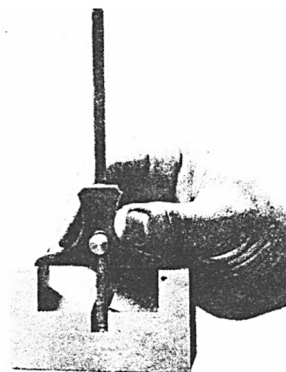
اندازه گیری ابعاد با دقت حدود ± 0.1 in را می توان با خط کش های مدرج ساده انجام داد. اما برای اندازه گیری ابعاد بزرگتر از مترهای نواری یا فنری می توان استفاده کرد. در تمام این موارد با تغییر دما مقداری خطا در اندازه گیری ایجاد می شود که به سادگی با داشتن دمای محیط می توان آن را برطرف کرد. برای اندازه گیری های دقیق تر از وسایل فوق نمی توان استفاده کرد. در زیر به سایر وسایل اندازه گیری ابعاد اشاره شده است.

خط کش ماشین کاری مرکب:

خط کش ماشین کاری از جنس فلزی ساخته شده و به طرز دقیق درجه بندی شده است و برای اندازه گیری طول و یا به عنوان لبه صاف استفاده می شود. متعلقاتی همچون اتصال گونیا، اتصال پرگاری، اتصال نقاله مورب و حباب تراز کمک شایانی به انواع مختلف اندازه گیری به خصوص در فضای کارگاهی می کند (شکل ۴-۴). همچنین نوعی از این خط کش ها مجهز به میله عمق سنج هستند که برای اندازه گیری ابعاد داخلی به کار می روند (شکل ۴-۵). انواع خط کش های کوتاه در ابعاد ۱/۴ الی یک اینچ برای اندازه گیری ابعاد دور از دسترس نیز ساخته شده است. دقت بهتر از نیم میلیمتر توسط اندازه گیری با خط کش متصور نیست. در خط کش های اینچی دقت اندازه گیری ۱/۳۲ اینچ قابل حصول است.



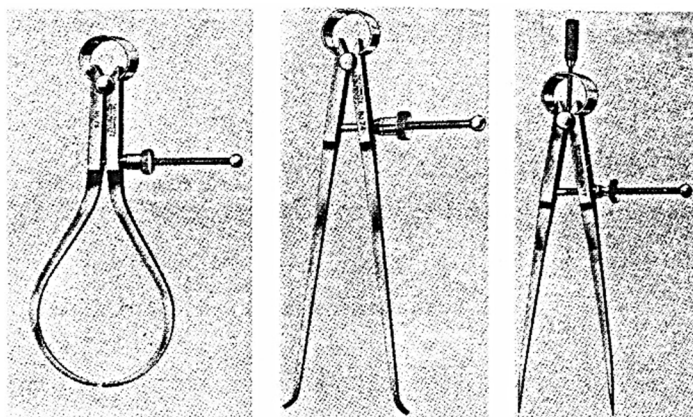
شکل (۴-۴) خط کش ماشین کاری مرکب



شکل (۴-۵) خط کش عمق سنج

پرگارهای اندازه گیری:

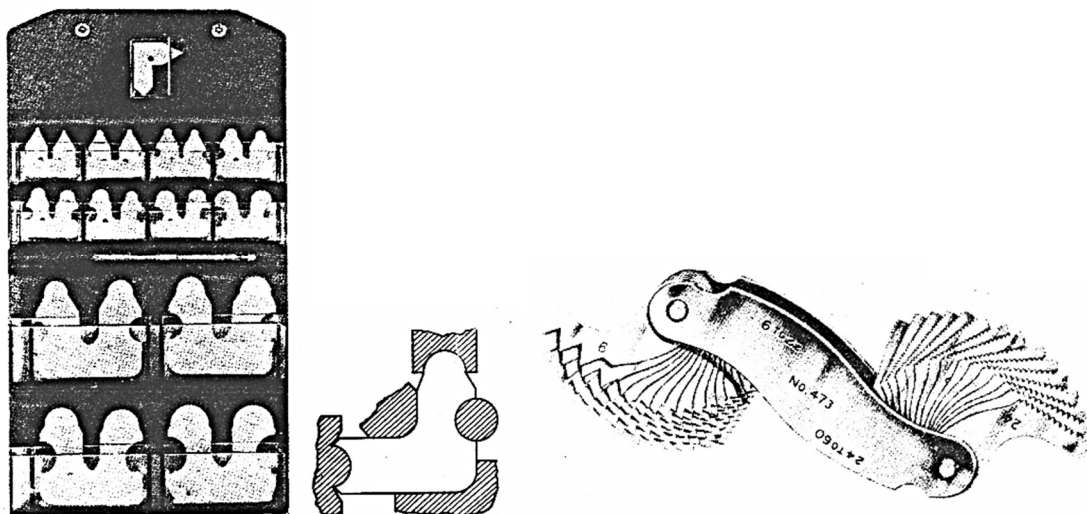
پرگارهای اندازه گیری بغیر از استفاده پرگاری، عمدتاً برای انتقال اندازه به خط کش، کولیس و استفاده می شوند و به دو شکل پرگار بیرونی و پرگار درونی ساخته می شوند (شکل ۴-۶). روش کار به این صورت است که پرگار بر روی بعد با اندازه مجهول جسم قرار گرفته و قفل می شود و سپس بروی خط کش گذاشته شده و اندازه معلوم می شود. دقت اندازه گیری بستگی به خوانایی وسیله مدرج شده دارد



شکل (۴-۶) پرگارهای اندازه گیری

صفحات و مربعات:

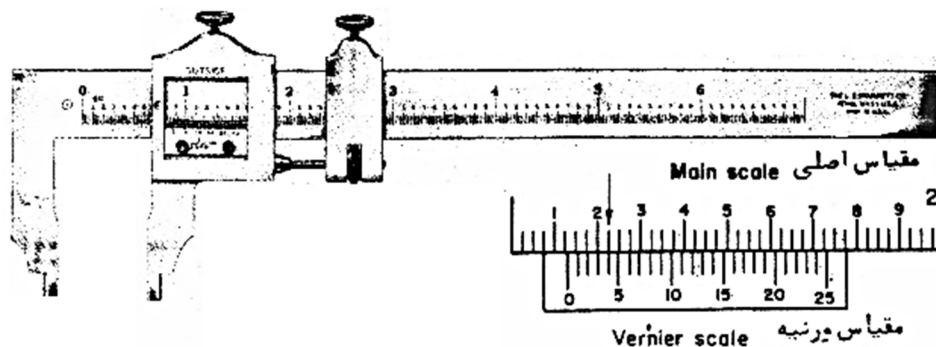
در ابتدا یک صفحه مرجع صاف برای اندازه گیری لازم است. میزهای اندازه گیری معمولاً از جنس چدن یا گرانیات به خاطر تغییرات کم ابعاد آنها با دما ساخته می شوند و باید سطح صاف و تراز داشته باشند. انواع شابلون‌ها، صفحات و مربعات و گوی‌ها نیز برای اندازه گیری ابعادی استفاده می شوند. کاربردهای استفاده از آنها بسیار متفاوت است. شکل (۴-۷) چند نمونه از این وسایل را نشان می دهد. از صفحات در اندازه گیری شیارها استفاده می شود. مربعات و استوانه‌ها برای ایجاد لبه عمود برهم به کار گرفته می شوند. قطعات گوه‌ای شکل برای لبه صاف زاویه دار استفاده می شود. شابلون‌های رزوه برای تعیین گام رزوه به کار می رود. همچنین شابلون‌های دنده، شعاع ریشه و قوس نیز وجود دارد. دقت اندازه گیری آنها به تعداد قطعات در یک ست و نمو اندازه بین آنهاست.



شکل (۴-۷) شابلون‌های اندازه‌گیری رزوه و شعاقوس

کولیس:

کولیس نوع اصلاح شده خط کش کارگاهی می‌باشد که دقت آن بالاتر از یک خط کش عادی است. ساختمان کولیس و تصویر بزرگ شده‌ی ورنیه آن در شکل (۴-۸) نشان داده شده است. مقیاس ورنیه دقت اندازه‌گیری را یک درجه بالاتر می‌برد. کولیس روی شیئی مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و به وسیله‌ی پیچ تنظیم دقیق، دو فک آن کاملاً قطعه کار را دربر می‌گیرند. مقیاس ورنیه نشان داده شده در شکل 0.001 in می‌باشد و دارای ۲۵ درجه‌ی مساوی معادل با 0.025 بوده و طول کلی آن 251.24 طول درجات مقیاس اصلی است. در نتیجه خطوط مقیاس ورنیه کاملاً در مقابل خطوط مقیاس اصلی قرار نمی‌گیرند. در شکل (۴-۶) عددی که از کولیس خوانده می‌شود $2/36in = (0.025)(14/25) + 2/35$ می‌باشد. دقت کولیس‌ها می‌تواند تا یک هزارم اینچ و یا 0.025 میلیمتر باشد.



شکل (۴-۸) کولیس، تصویر کناری نمایشگر مقیاس ورنیه است

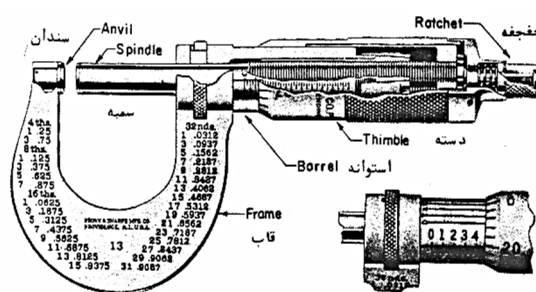
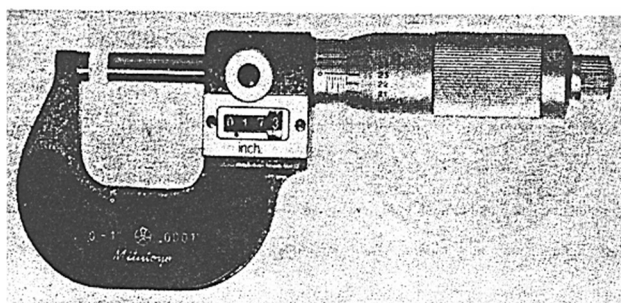
کولیس‌ها در انواع ورنیه‌ای، عقربه‌ای (ساعت‌دار)، عمق‌سنج، ارتفاع‌سنج و دیجیتالی برای کاربردهای گوناگون ساخته می‌شوند. شکل (۹-۴) نمونه‌ای از کولیس ارتفاع‌سنج را نشان می‌دهد. کولیس به طول نیم متر هم ساخته شده است.



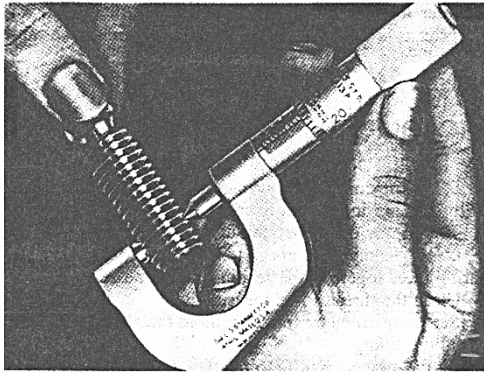
شکل (۹-۴) کولیس ارتفاع‌سنج

میکرومتر (ریزسنج):

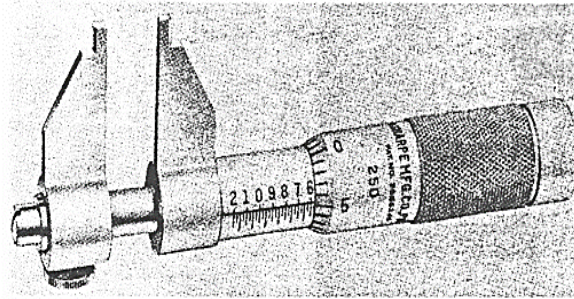
میکرومتر یکی دیگر از وسایل اندازه‌گیری ابعاد است. این وسیله دارای دقتی بالاتر از کولیس می‌باشد که در آن به جای ورنیه از یک پیچ مدرج با تقسیمات محیطی برای نشان دادن باقیمانده‌ی تقسیمات مقیاس اصلی استفاده شده است شکل (۱۰-۴) ساختار داخلی یک میکرومتر را نشان می‌دهد. برای اینکه اندازه‌گیری‌های مختلف به کمک این وسیله با دقت یکسانی انجام شود، بایستی فشار وارد شده به قطعه کار در این اندازه‌گیری‌ها یکسان باشد. جفجغه‌ی روی دسته که تحت نیروی فنر قرار دارد به این امر کمک می‌کند. اگر از میکرومتر به نحو صحیحی استفاده شود، می‌توان با دقت 0.001 in (0.025 mm) را با آن اندازه‌گیری کرد. شکل (۱۱-۴) میکرومتر با فک کولیزی، شکل (۴-۱۲) میکرومتر رزوه و شکل (۴-۱۲) میکرومتر عمق‌سنج و میکرومتر داخل‌سنج را نشان می‌دهد.



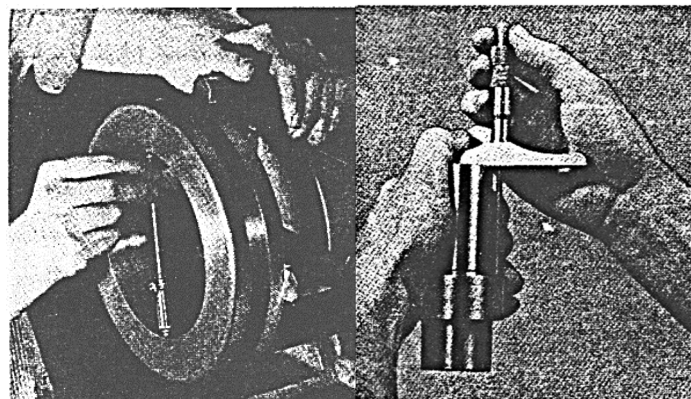
شکل (۱۰-۴) میکرومتر



شکل (۱۲-۴) میکرومتر رزوه



شکل (۱۱-۴) میکرومتر با فک کولیسی



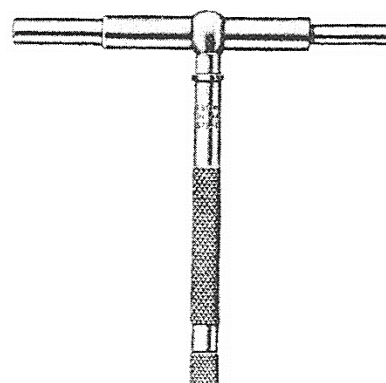
شکل (۱۳-۴) میکرومتر عمق سنج و داخل سنج

اندازه گیری ابعاد درونی:

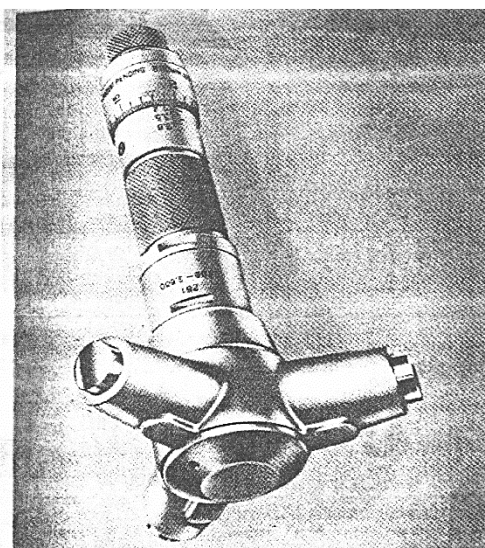
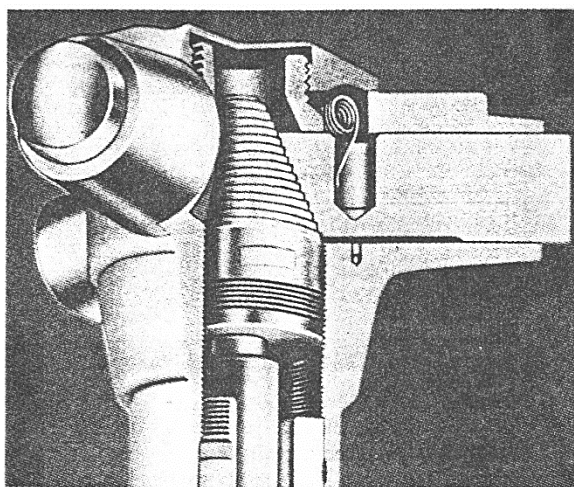
برای اندازه گیری ابعاد درونی از سنج‌های تلسکوپی، میکرومتر داخلی و اینترمیک استفاده می‌شود. شکل (۴-۱۴) نمونه‌ای از سنج تلسکوپی و شکل (۴-۱۵) سنج برای اندازه گیری ابعاد داخلی سوراخ‌های کوچک را نشان می‌دهد. مشکل سنج تلسکوپی در اندازه گیری سوراخ دایره‌ای این است که ممکن است بجای قطر، وتر دایره درونی سوراخ اندازه گیری شود. برای اندازه گیری دقیق ابعاد سوراخ دایره‌ای از سنج اینترمیک استفاده می‌شود. شکل و ساختمان این سنج در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. این سنج سه فک دارد که با پیچ میکرومتری باز می‌شوند و توسط آن‌ها می‌توان قطر سوراخ را به دقت اندازه گرفت. دقت اینترمیک تا 0.0001 اینچ است.



شکل (۴-۱۵) سنجه سوراخ‌های کوچک



شکل (۴-۱۴) سنجه تلسکوپ‌وار



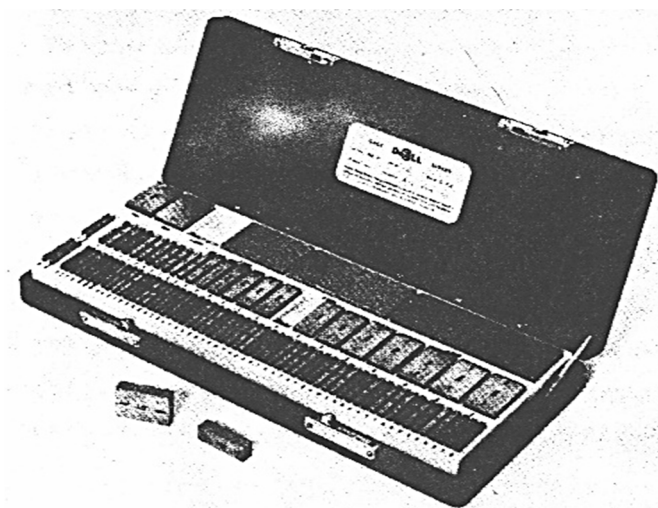
شکل (۴-۱۶) سنجه اینتیریمک

تکه‌های اندازه‌گیری:

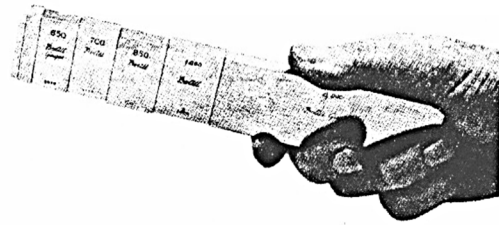
تکه‌های اندازه‌گیری سنجه‌های استاندارد صنعتی هستند. آن‌ها همان بلوک‌های کوچک فولادی به ابعاد $\frac{3}{8}in * 1\frac{3}{8}in$ و در طول‌های مختلف می‌باشند که سطوح موازی و کاملاً صیقلی دارند. این تکه‌ها به روش نوری با دقت بالا ساخته می‌شوند. تکه‌های اندازه‌گیری در ضخامت‌های مختلف موجودند و این امکان را می‌دهند که با استفاده از یک مجموعه ی ۸۱ تایی، با قراردادن آن‌ها بر روی هم، کلیه‌ی اندازه‌های بین $0/1in$ تا $8in$ با نمو $0/0001in$ اندازه‌گیری شوند. به منظور باقی نماندن فضای آزاد بین بلوک‌ها پس از روی هم گذاشتن آن‌ها، آن‌ها را تحت فشار قرار می‌دهند تا به واسطه‌ی سطوح صاف و صیقلی بلوک‌ها آن‌ها کاملاً به هم بچسبند. در بعضی موارد نیروی چسبندگی ایجاد

شده ممکن است تا ۳۰ برابر فشار اتمسفر برسد. به خاطر دقت فوق العاده زیاد تکه‌های اندازه‌گیری از آن‌ها غالباً برای درجه‌بندی سایر وسایل اندازه‌گیری ابعاد استفاده می‌کنند.

تکه‌های اندازه‌گیری اختراع یوهانسون (راپورتر یوهانسون) در زمان جنگ‌های جهانی است. از این مجموعه‌ها به دو صورت در فرایند اندازه‌گیری استفاده می‌شوند. روش اول همانطور که در بالا توضیح داده شد، برای ایجاد یک اندازه مرجع است که در تولید انبوه در صنعت کاربرد دارد. حالت دوم، ایجاد هر اندازه دلخواه در کاربردهای گوناگون است. شکل (۴-۱۷) یک مجموعه ۸۱ تکه‌ای و شکل (۴-۱۸) ابعاد تکه‌های این مجموعه را در چهار دسته بندی نشان می‌دهد. همچنین به‌عنوان یک مثال ساخت یک بعد به اندازه $2/6243$ را با این قطعات مرجع نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۷) یک مجموعه تیکه‌های اندازه‌گیری



شکل (۳-۱۶): چند سنجه مکعب مستطیلی که برای ایجاد اندازه خاصی بهم چسبانیده شده‌اند.

درجه بندی:

درجه ۱ (آزمایشگاهی) یا شاقص	اینج	± 0.000002
درجه ۲ (دقیق، مربع) یا بازبینی	اینج	$+0.000004$ -0.000002
درجه ۳ (دالر)	اینج	$+0.000008$ -0.000004

مثال:

برای بدست آوردن طول $2/4243$:

از دست:	اول	اینج	0.4003
	دوم	"	0.124
	سوم	"	0.400
	چهارم	"	2.000
	جمع	"	$2/4243$

دسته اول: ۹ قطعه با اختلاف طول ۰/۰۰۰۱ اینچ.

۰/۱۰۰۱ اینچ، ۰/۱۰۰۲ اینچ، ۰/۱۰۰۳ اینچ، ۰/۱۰۰۴ اینچ، ۰/۱۰۰۵ اینچ، ۰/۱۰۰۶ اینچ، ۰/۱۰۰۷ اینچ، ۰/۱۰۰۸ اینچ و ۰/۱۰۰۹ اینچ.

دسته دوم: ۴۹ قطعه با اختلاف طول ۰/۰۰۱ اینچ.

۰/۱۰۱ اینچ، ۰/۱۰۲ اینچ، ۰/۱۰۳ اینچ، ۰/۱۰۴ اینچ، ۰/۱۰۵ اینچ، ۰/۱۰۶ اینچ، ۰/۱۰۷ اینچ، ۰/۱۰۸ اینچ، ۰/۱۰۹ اینچ، ۰/۱۱۰ اینچ، ۰/۱۱۱ اینچ، ۰/۱۱۲ اینچ، ۰/۱۱۳ اینچ، ۰/۱۱۴ اینچ، ۰/۱۱۵ اینچ، ۰/۱۱۶ اینچ، ۰/۱۱۷ اینچ، ۰/۱۱۸ اینچ، ۰/۱۱۹ اینچ، ۰/۱۲۰ اینچ، ۰/۱۲۱ اینچ، ۰/۱۲۲ اینچ، ۰/۱۲۳ اینچ، ۰/۱۲۴ اینچ، ۰/۱۲۵ اینچ، ۰/۱۲۶ اینچ، ۰/۱۲۷ اینچ، ۰/۱۲۸ اینچ، ۰/۱۲۹ اینچ، ۰/۱۳۰ اینچ، ۰/۱۳۱ اینچ، ۰/۱۳۲ اینچ، ۰/۱۳۳ اینچ، ۰/۱۳۴ اینچ، ۰/۱۳۵ اینچ، ۰/۱۳۶ اینچ، ۰/۱۳۷ اینچ، ۰/۱۳۸ اینچ، ۰/۱۳۹ اینچ، ۰/۱۴۰ اینچ، ۰/۱۴۱ اینچ، ۰/۱۴۲ اینچ، ۰/۱۴۳ اینچ، ۰/۱۴۴ اینچ، ۰/۱۴۵ اینچ، ۰/۱۴۶ اینچ، ۰/۱۴۷ اینچ، ۰/۱۴۸ اینچ و ۰/۱۴۹ اینچ.

دسته سوم: ۱۹ قطعه با اختلاف طول ۰/۰۰۵ اینچ.

۰/۰۵۰ اینچ، ۰/۱۰۰ اینچ، ۰/۱۵۰ اینچ، ۰/۲۰۰ اینچ، ۰/۲۵۰ اینچ، ۰/۳۰۰ اینچ، ۰/۳۵۰ اینچ، ۰/۴۰۰ اینچ، ۰/۴۵۰ اینچ، ۰/۵۰۰ اینچ، ۰/۵۵۰ اینچ، ۰/۶۰۰ اینچ، ۰/۶۵۰ اینچ، ۰/۷۰۰ اینچ، ۰/۷۵۰ اینچ، ۰/۸۰۰ اینچ، ۰/۸۵۰ اینچ، ۰/۹۰۰ اینچ و ۰/۹۵۰ اینچ.

دسته چهارم: ۴ قطعه با اختلاف طول ۱/۰۰۰ اینچ.

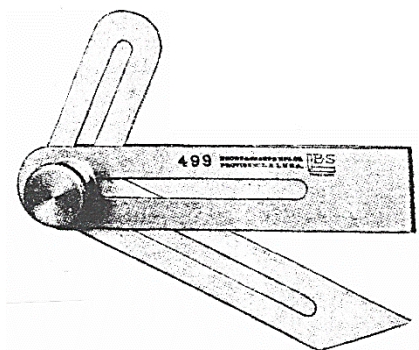
۱/۰۰۰ اینچ، ۲/۰۰۰ اینچ، ۳/۰۰۰ اینچ و ۴/۰۰۰ اینچ.

شکل (۴-۱۸) یک مجموعه تیکه‌های اندازه گیری

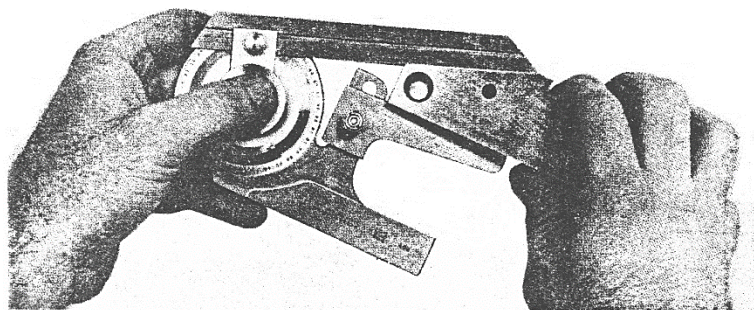
اندازه گیری زاویه:

برای اندازه گیری زاویه از نقاله مورب استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده، این سنجه دارای یک فک ثابت و یک فک متحرک که به نقاله متصل است ساخته شده و با دقت بهتر از 5° اندازه گیری زاویه را انجام می‌دهد. نقاله‌های جامع نشان داده شده در شکل (۴-۲۰) برای انتقال اندازه زاویه بر روی نقاله به کار می‌روند. برای قطعات پیچیده‌تر همچون قطعات مخروطی، اندازه گیری زاویه با استفاده از خط کش یا میله سینوسی به همراه راپر تراها و یک اندیکاتور عقربه‌ای انجام می‌شود (شکل (۴-۲۱)). میله‌های سینوسی به طول ۵ و ۱۰ اینچ موجودند و با تیرانس 0.002 اینچ ساخته می‌شوند. دقت صافی سطح آنها 0.00005 اینچ است.

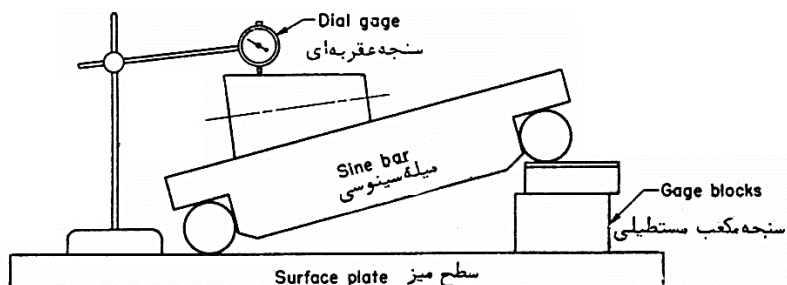
از صفحات سینوسی دو بعدی و سه بعدی (صفحه سینوسی مرکب) برای ایجاد یک صفحه مرجع با زاویه خاص در جهات مختلف استفاده می‌شود. شکل (۴-۲۲) هر دو نوع صفحه سینوسی دو بعدی و سه بعدی را نشان می‌دهد. همانند سطوح مرجع (میز اندازه‌گیری) این صفحات دارای رزوه برا نصب قطعات بر روی آن‌ها هستند.



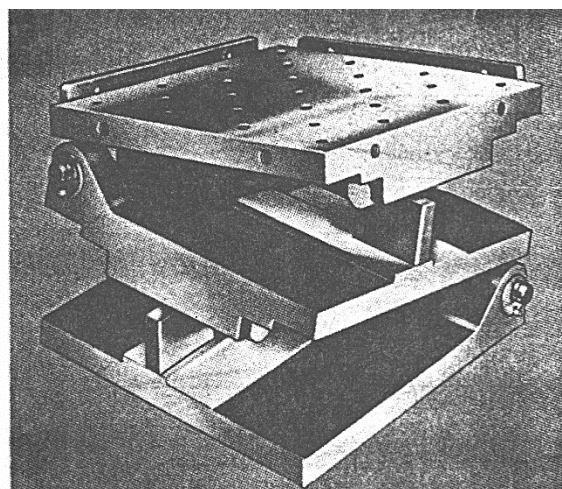
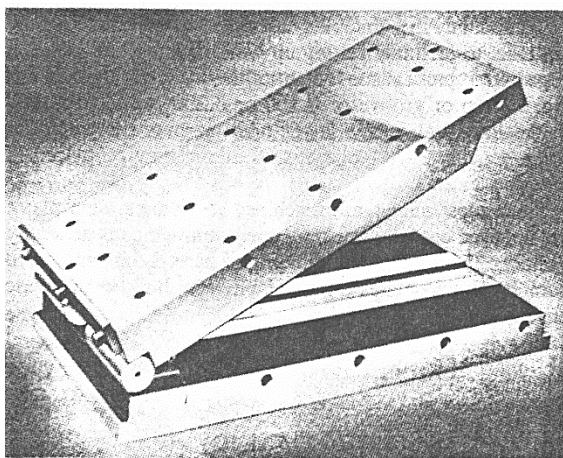
شکل (۴-۲۰) نقاله جامع



شکل (۴-۱۹) نقاله مورب (مخروطی)



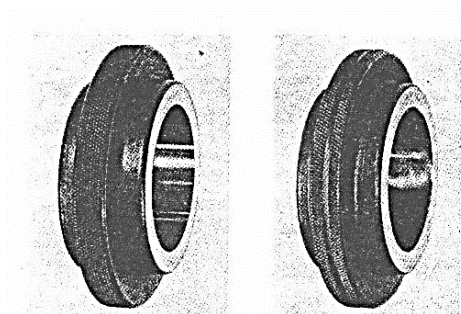
شکل (۴-۲۱) میله سینوسی برای اندازه‌گیری زاویه



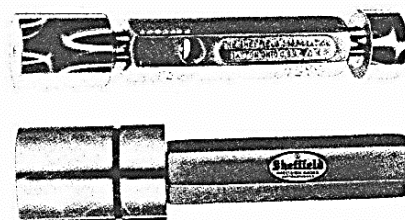
شکل (۴-۲۱) صفحه سینوسی

سنجه‌های برو-نرو:

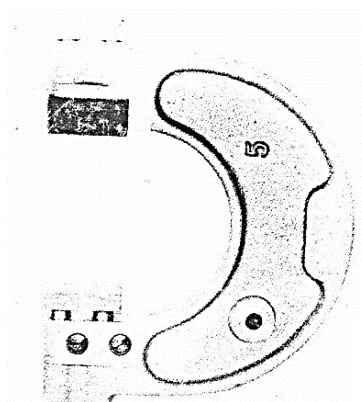
سنجه برو-نرو در صنعت و خطوط کنترل کیفیت کاربرد فراوانی دارند. این سنجه‌ها به فرم‌های گوناگون بسته به هندسه قطعه تحت آزمایش ساخته می‌شوند. شکل (۴-۲۳) نمونه‌هایی از این نوع سنجه‌ها را نشان می‌دهد. برای کنترل ابعاد سوراخ از سنجه‌های توپی، ابعاد میله از سنجه‌های حلقوی، ابعاد رزوه از سنجه‌های توپی و حلقوی رزوه، برای ارتفاع پله از سنجه میخی و برای هندسه‌های دیگر از سنجه برو-نرو تعلی استفاده می‌شود. همچنین سنجه‌های فرم، گام پیچ و مدول دندانه نیز موجودند.



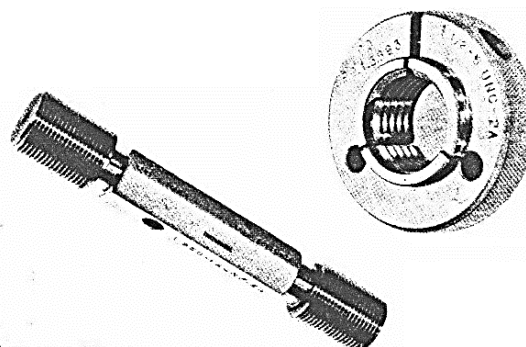
سنجه‌های برو، "نرو" حلقوی.



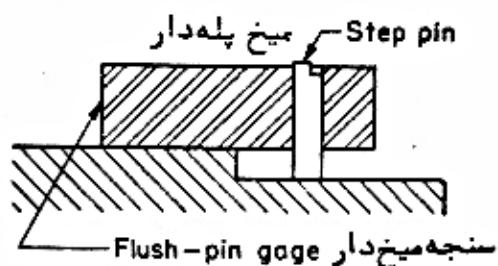
"بالا" سنجه توپی ساده با قسمت "برو" در یک انتهای دسته و قسمت "نرو" در انتهای دیگر. "پائین" سنجه توپی "برو"، "نرو" پله‌ای.



سنجه تعلی "برو"، "نرو" قابل تنظیم.



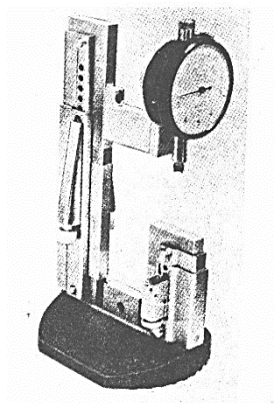
سنجه‌های توپی و حلقوی پیچ.



شکل (۴-۲۳) سنجه‌های برو-نرو

اندیکاتورهای عقربه‌ای:

در اندیکاتورهای عقربه‌ای جابجایی پیرو را با سیستم‌های مکانیکی تقویت می‌کنند تا جابجایی با دقت 0.001 in اندازه‌گیری شود. ساختمان این نوع اندیکاتورها متشکل از یک چرخ‌دنده‌ی شآن‌های است که به محور سنجش جابجایی (پیرو) متصل است. این دنده‌ی شآن‌های با یک پیستون درگیر است که آن نیز به نوبه‌ی خود در تقویت حرکت مؤثر است. مقدار خروجی دستگاه بر روی یک صفحه‌ی مدرج دایره‌ای شکل خوانده می‌شود. یکی از کاربردهای اندیکاتورهای عقربه‌ای در اندازه‌گیری میزان لنگی محورها و شافت‌ها و یا میزان شکم دادگی محورها می‌باشد. شکل (۴-۲۴) اندیکاتور عقربه‌ای یا ساعت اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۴) اندیکاتور عقربه‌ای

روش‌های مقایسه‌ای

در روش‌های مقایسه‌ای اندازه ابعاد مستقیماً حاصل نمی‌شود. بلکه کنترل ابعاد با مقایسه با نمونه‌های مرجع انجام می‌شود. وسیله اندازه‌گیری برای اندازه‌ای خاص توسط قطعه مرجع کالیبره و تنظیم می‌شود. انواع مکانیزم‌های نوری، پنوماتیک و الکتریکی در این سنج‌ها استفاده می‌شود.

شکل (۴-۲۵) نمونه‌هایی از سنج‌های مقایسه‌ای پنوماتیک را نشان می‌دهد. این سنج از یک پمپ کوچک هوا، مدار پنوماتیک، فشار سنج و پروب اندازه‌گیری تشکیل شده است. پروب در قطعه استاندارد که داخل تیرانس مجاز ساخته شده است قرار می‌گیرد و فشارسنج برای تیرانس کوچکتر و تیرانس بزرگتر تنظیم می‌شود. سپس برای قطعه جدید که باید کنترل کیفیت شود، پروب اندازه‌گیری داخل آن قرار می‌گیرد و فشار مدار پنوماتیک با فشار تنظیم شده با قطعه مرجع مقایسه می‌شود. فشارهای پایین‌تر و بالاتر از فشار مرجع نشانگر داخل تیرانس نبودن قطعه ساخته شده است. اندازه‌گیری با این روش بسیار سریع است.

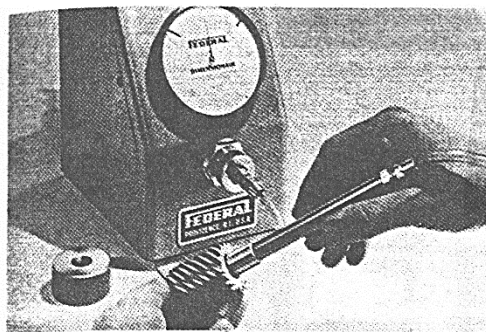


Fig. 15-16 Gaging a hole using a pressure-type air gage.

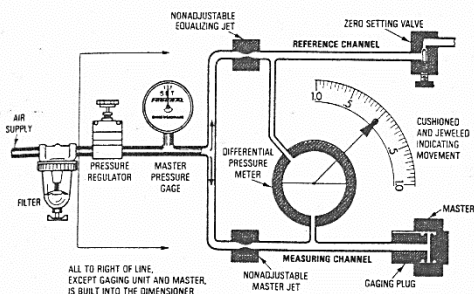


Fig. 15-17 Operation of the pressure-type air gaging system.

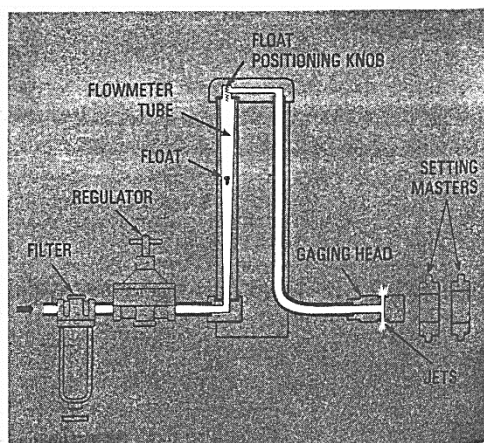
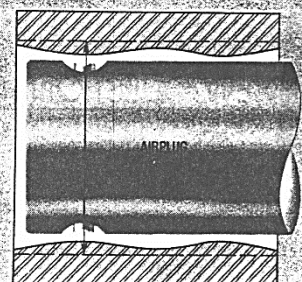
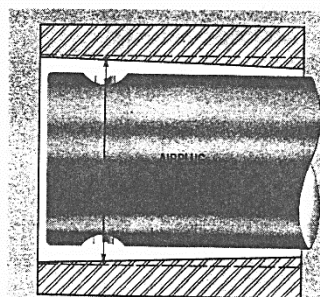
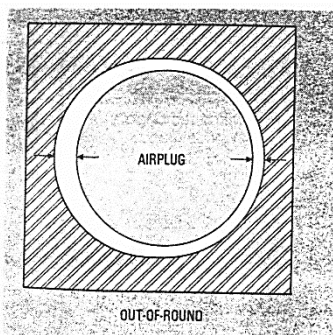


Fig. 15-15 Principle of the column-type air gage.



CONCENTRICITY

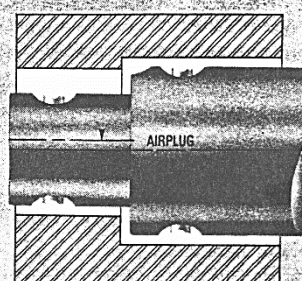
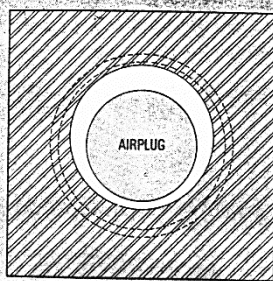
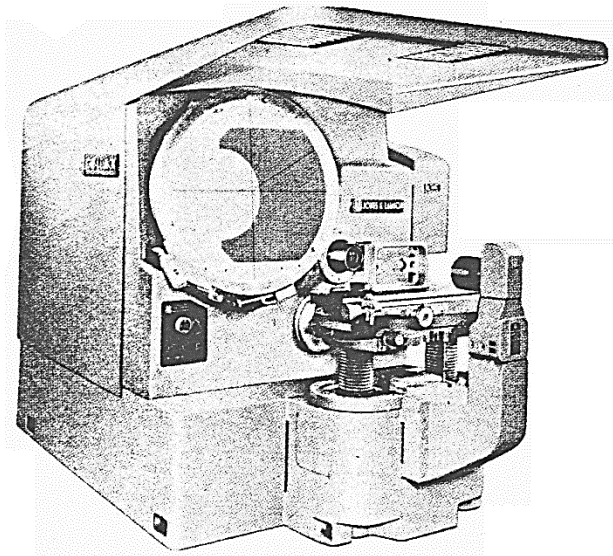


Fig. 15-18 Irregular-shaped holes may be easily checked with an air gage. (Courtesy Federal Products Corporation.)

شکل (۴-۲۵) سنج‌های مقایسه‌ای پنوماتیک

شکل (۴-۲۶) یک مقایسه‌گر نوری را نشان می‌دهد. با نور پردازی به قطعه و تصویر سایه آن بر روی نمایشگر و مقایسه شکل و ابعاد قطعه با مشخصات نقشه طراحی می‌توان به صحت فرایند ساخت پی برد.



شکل (۴-۲۶) مقایسه گر محیطی نوری

تداخل نوری:

یکی از روش‌های اندازه‌گیری بسیار دقیق ابعاد بر مبنای تداخل نوری استوار است و وسیله‌ای که بر این اساس کار می‌کند تداخل‌سنج نامیده می‌شود. برای درک مطلب دو پرتو نوری که در شکل (۴-۲۷) نشان داده شده‌اند را در نظر بگیرید. در شکل (۴-۲۷-الف) دو پرتو با هم هم‌فازند، به طوری که در اثر ترکیب آن‌ها روشنایی در نقطه‌ی P تقویت می‌شود. در شکل (۴-۲۷-ب) پرتوها به اندازه‌ی نیم طول موج با هم اختلاف فاز دارند، به طوری که همدیگر را حذف می‌کنند و گفته می‌شود که امواج نور با هم تداخل می‌کنند. تداخل نوری هنگامی به وقوع می‌پیوندد که دو موج از یک منبع واحد مسیرهای با طول‌های متفاوت را طی کنند. هرگاه اختلاف فاصله مضرب صحیحی از طول موج باشد، امواج تقویت می‌شوند و اگر اختلاف فاصله مضرب فردی از نصف طول موج باشد، حذف امواج اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی استفاده از اصل تداخل نوری در اندازه‌گیری ابعاد شکل (۷-۵) را در نظر بگیرید. در این شکل دو صفحه با فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند. یکی از این صفحات شیئی شفاف بدون کرنش است که تا چند میکرواینچ صیقل داده شده است. صفحه‌ی دیگر دارای یک سطح منعکس کننده‌ی فلزی است و فاصله بین صفحات (d) بسیار کوچک فرض می‌شود. پرتوهای نوری موازی A و B از یک منبع مناسب به صفحات برخورد می‌کنند که پرتو منعکس شده‌ی A در نقطه‌ی P با پرتو ورودی B برخورد می‌کند. مسافت طی شده توسط پرتو A از مسافت طی شده توسط پرتو B بیشتر می‌باشد لذا در صورتی که این فاصله مضرب فردی از $\lambda/2$ باشد، در نقطه‌ی P عمل تداخل نوری اتفاق می‌افتد. بنابراین اگر $2d$ برابر با $\lambda/2$ یا $3\lambda/2$ یا... باشد، آنگاه روی پرده S هیچ نوری ثبت نمی‌شود.

حال اگر همین دو صفحه کمی نسبت به هم کج شوند، در روی پرده ناحیه‌های یک در میان روشن و تاریکی به چشم می‌خورند که متغیر بودن فاصله‌ی بین دو صفحه را نشان می‌دهند.

تداخل سنج به راحتی نقایص سطحی کوچک را اندازه‌گیری می‌کند و در درجه‌بندی تکه‌های اندازه‌گیری هم به کار می‌رود. برای مقاصد عملی، تداخل سنج همانند شکل شماتیک (۴-۵) به کار گرفته می‌شود. ابتدا نور منبع توسط عدسی L موازی شده و به صفحه‌ی تقسیم S₂ (آینه‌ی نیمه نقره‌ای) برخورد می‌کند که نیمی از نور به طرف آینه‌ی تخت و نیمی دیگر به قطعه کار برخورد می‌کند. در بازگشت هر دو پرتو در صفحه‌ی تقسیم S₂ ترکیب می‌شوند و سپس به طرف پرده S₃ انتقال می‌یابند. ممکن است به خاطر اختلاف طول‌هایی که نور می‌پیماید تداخل‌های ناخواسته‌ای روی پرده مشاهده شود که با ساخت صحیح دستگاه از بین می‌روند و تنها تداخل ناشی از تغییر در ابعاد قطعه کار باقی می‌ماند.

ماشین اندازه‌گیری مختصات:

در ماشین اندازه‌گیری مختصات یا CMM (Coordinate Measuring Machine) می‌باشد. یعنی سیستم‌های اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات. با استفاده از این دستگاه‌ها امکان اندازه‌برداری از روی سطوح قطعات پیچیده با دقت بسیار بالا در حد ۲۵ میکرو متر امکان‌پذیر است. همچنین این دستگاه به ترمو کوپل‌های که در هر لحظه دما را به سیستم برای جبران سازی اعلام می‌کند مجهز است که خود باعث افزایش دقت و ضریب اطمینان سیستم می‌شود. از آنجایی که در سیستم‌های مختصات، هر نقطه مشخص فقط یک مختصات دارد و هر مختصات مشخص فقط مربوط به یک نقطه می‌باشد، می‌توان از این هویت مشخص برای هر نقطه، استفاده کرد و با دقت بالا، به آن دسترسی پیدا کرد. این دستگاه امکان حرکت در راستای سه محور مختصات کارتزین را دارد. سه موتور الکتریکی سر دستگاه را در راستای این محورها حرکت می‌دهند و همچنین حسگرهایی در سر دستگاه برای اینکه هنگام تماس آن با سطح قطعه کار سیگنالی برای موتورها فرستاده و آنها را از حرکت باز دارد و سیگنالی برای خط‌کش نوری فرستاده و توسط آنها مختصات نقطه تماس را بدست آورد وجود دارد. حسگرهای دستگاه CMM روی پروب‌ها نصب می‌شوند. علاوه بر پروب‌ها می‌توان ابزار آلات و تجهیزات صنعتی دیگر مانند سوزن‌های خط‌کشی، Drilling Head و ساعت‌های اندازه‌گیری را روی دستگاه نصب نمود.

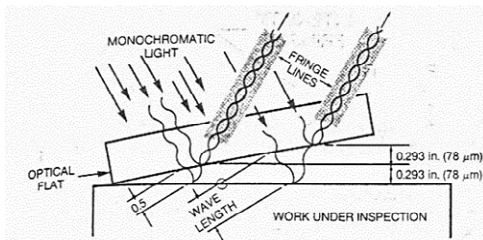


Fig. 17-2 The principle of the optical flat.

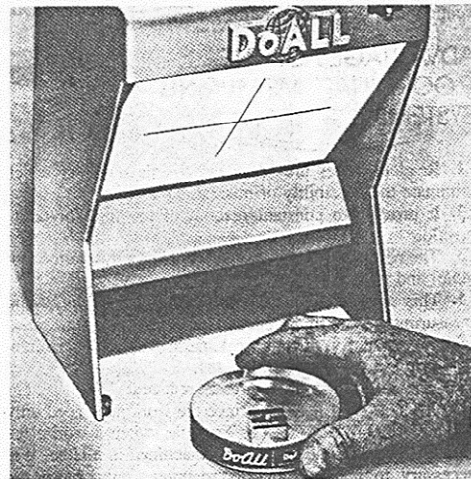


Fig. 17-1. Checking gage block using an optical flat and a helium light source.

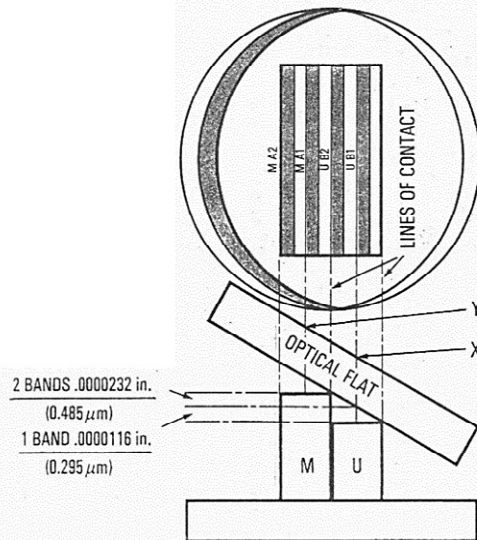


Fig. 17-3 Checking the height of a block with a master block.



Fig. 17-4 Checking fitness with an optical flat.

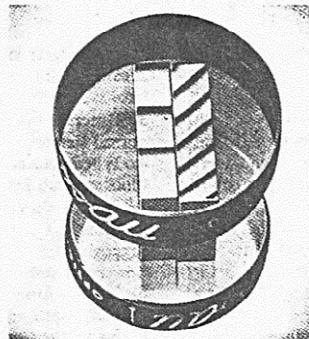


Fig. 17-5 Checking parallelism with an optical flat.

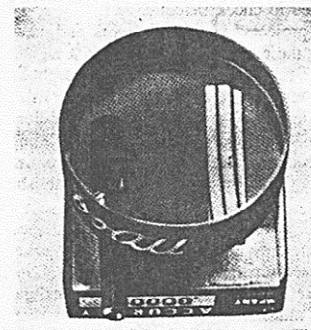


Fig. 17-6 Checking size with an optical flat.

شکل (۴-۲۷) تداخل نوری



شکل (۴-۳۱) ماشین اندازه گیری مختصات

وسایل اندازه گیری زبری سطح (پرداخت سطح) ۱

علاوه بر اندازه گیری های مقادیر بزرگ در کاربردهای صنعتی، در بعضی مواقع در مطالعه خواص سطح مجبور به اندازه گیری در مقیاس های میکروسکوپی می باشیم. مثال هایی از این موارد مطالعه سایش، اصطکاک، مقاومت در مقابل سایش، آب بندی در اورینگها و بسیاری موارد دیگر می باشد. مطالعه خواص سطح به علم تریبولوژی بر می گردد که در آن اصطکاک و سایش و روانکاری بررسی می شود.

مقدار انحراف سطح حقیقی از سطح ایده آل با سه ترم خطای فرم^۲ و موج^۳ و زبری^۴ مشخص می شود. شکل (۴-۱). خطای فرم همان تغییرات جزئی در جهات سطوح ماشینکاری است که معمولاً در عملیات تولید ایجاد شده و یا نقایص جزئی در سطح می باشد. موج و زبری سطح با هم تشکیل پروفیل سطح را می دهند و همان شکل ارتعاشی مقطع عمودی سطح نسبت به یک خط مرجع می باشند. در واقع می توان موج را به ارتعاشات با پریود زیاد و زبری سطح را به ارتعاشات با پریود کم تشبیه کرد.

^۱ - Surface finish measurements

^۲ - error of the form

^۳ - waviness

^۴ - Roughness

در بیشتر موارد زبری سطح برای ما جالب است و دستگاههایی هستند که تنها درجه زبری سطح را اندازه می گیرند. اما بیشتر وسایل اندازه گیری توانایی اندازه گیری هر دو خاصیت زبری و تموج را دارند. این دو خاصیت روی هم پروفیل سطح را تشکیل می دهند و همچنین می توان بین اندازه گیری تموج و زبری، یکی را انتخاب کرد. بیشتر وسایل اندازه گیری سطح از نوع سوزنی می باشند. اما در مواردی که لازم است که تماس با سطح انجام نشود می توان از تکنیک های نوری استفاده کرد (که البته گرانتر هستند).

روش های تماسی اندازه گیری صافی سطح

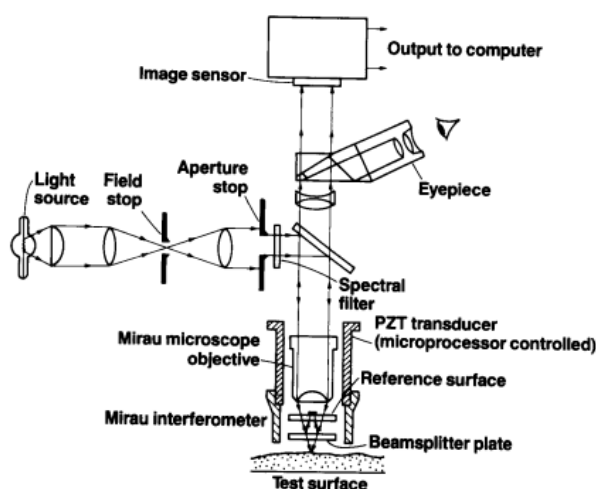
شعاع نوک سوزن استایلوس ۵ در حدود 0.001in تا 0.0001in می باشد که نیروی 0.001lbf تا 0.0001lbf بر آن اعمال می شود و دارای پهنای 0.0002in می باشد. اندازه نوک سوزن این وسایل از این مقدار نمی تواند کمتر باشد، زیرا که باعث شده فشار روی سطح از تنش مجاز ماده مورد آزمایش بیشتر شده و سبب تغییر شکل پلاستیک در سطح مورد اندازه گیری شود. برای اندازه گیری زبری (صافی) سوزن را در طول یک خط مشخص روی سطح جسم با سرعت ثابتی حدود 0.1 in/s تا 0.0001 in/s حرکت می دهیم. انتخاب سرعت مناسب و نیروی کافی روی سر سوزن برای تشخیص صحیح زبری مهم می باشد.

ممکن است که سوزن اندازه گیری درون یک کفشک به صورت قائم راهنمایی شود. حال اگر این کفشک حرکت کند و موج سطح را دنبال کند، کمیت اندازه گرفته شده توسط سوزن زبری سطح خواهد بود ولی اگر خط مرجع ثابت باشد و کفشک از آن تبعیت کند، کمیت فوق پروفیل سطح را نشان خواهد داد. در مواقعی که بخواهیم زبری را در سطح یک منحنی مانند ساچمه های یاتاقانها و دندانه چرخنده ها و غیره بررسی کنیم از یک منحنی مرجع خارجی مناسب حول سطح جسم استفاده می شود.

وسایل کمی هستند که از یک سیم پیچ متحرک برای اندازه گیری حرکت سر سوزن استفاده می کنند این وسایل تا زمانی که بر روی سطح جسم حرکت نکنند سیگنالی نمی فرستند و در حالت استاتیکی هم نمی توان آنها را درجه بندی کرد. برای بهبود وضع می توان از یک ترانسدیوسر LVDT یا یک ترانسدیوسر جابجایی که خیلی حساس، باشند استفاده کرد.

در مورد وسایلی که قابلیت نمایش تصویری سطح را دارند حساسیت دستگاه به صورت ضریب بزرگنمایی بین حرکت سر سوزن و تصویر نشان داده شده روی صفحه تعریف می‌شود. نکته قابل توجه در این مورد آن است که مقدار بزرگنمایی در جهت عمودی (محور Z) می‌تواند تا ۱ میلیون برابر باشد. حال آنکه در جهت افقی فقط تا ۵۰۰ برابر می‌رسد و بنابراین مقدار بزرگنمایی در دو جهت عمودی و افقی معمولاً باهم فرق می‌کند. شکل (۴-۲) نمونه‌ای از این تصاویر را نشان می‌دهد. بزرگنمایی در جهت Z برابر ۵۰۰ و در جهت Y و X برابر ۲۰۰ بوده است. قابل توجه است که حرکت سوزن بر روی سطح با یک سرعت ثابت باعث می‌شود که پروفیل سطح به صورت تابعی از زمان نمایش داده شود.

همان‌طوری که در قبل هم اشاره شد سر سوزن استایلووس دارای شعاعی است که اگر چه این شعاع بسیار کوچک است اما در مقایسه با زبری سطح قابل ملاحظه است. این مسئله باعث شده که نتوانیم شکل صحیح برآمدگیها و فرورفتگیها روی سطح جسم را دست آوریم شکل (۴-۳).



شکل (۴-۳) اندازه گیری اپتیکی پرداخت سطح

روش‌های غیر تماسی اندازه‌گیری صافی سطح

۱- اندازه‌گیری صافی سطح با تکنیک نوری (استفاده از لیزر): در این روش از تداخل نوری به منظور اندازه‌گیری صافی سطح منطقه‌ای خاص استفاده می‌کنند. نور بازتابیده از جسم تحت آزمایش با نور بازتابیده از سطح مرجع، که درون دستگاه قرار دارد، تداخل می‌کنند. سطح مرجع دارای صافی سطح ۴ تا 8^0A می‌باشد. در مواردی که دقت بالا

مورد نظر باشد صافی سطح مرجع تا $1/5^\circ A$ هم می‌رسد. تداخل به وجود آمده را می‌توان از طریق میکروسکوپ مشاهده کرد. همچنین تداخل به وجود آمده بر روی یک آشکار کننده نوری^۶ متمرکز می‌شود. (شکل (۴-۳)).

از آنجا که در عمل تداخل نوری فاصله بین تداخل سنج و سطح جسم مورد بررسی مهم است، لذا این فاصله توسط یک پیزوالکتریک موقعیت دهنده و از طریق کنترل با کامپیوتر تنظیم می‌شود. تغییرات پی‌درپی کوچک در سطح باعث یک انتقال فاز کوچک^۷ در تداخل سنج شده و این عمل باعث تغییر در الگوی مرجع می‌شود که می‌تواند در نهایت توسط کامپیوتر به پروفیل سطح جسم تبدیل گردد.

۲- میکروسکوپ الکترونیکی: این روش‌ها نسبت به روشهای نوری دارای کیفیت بهتر در عمق میدان بیشتری می‌باشند. تفاوت عمده آن به خاطر طول موج کوتاه پرتوهای استفاده شده در میکروسکوپ الکترونیکی نسبت به نور عادی است. دو نوع اصلی میکروسکوپ الکترونی موجود می‌باشد.

الف - TEM (transmission electron microscopy) که در آن الکترونها تابیده شده بر صفحه‌ای باریک به ضخامت کمتر از ۱mm هنگامی که از آن صفحه عبور می‌کنند، بازتاب یا پخش می‌شوند. برای اندازه‌گیری صافی سطح به روش TEM بایستی یک کپی از سطح جسم مورد نظر تهیه شود.

ب - REM (reflection electron microscopy) در این روش الکترونها بازتابیده از سطح توسط یک کلکتور جمع می‌شوند و تولید یک سیگنال الکتریکی می‌کنند. این سیگنالها برای نمایش سطح جسم بر روی صفحه نمایش بکار می‌روند.

۳- اندازه‌گیری پنوماتیکی: این وسایل براساس نشت هوا کار می‌کنند. این وسایل دارای یک سر اندازه‌گیری می‌باشند که دارای پرداخت سطح عالی است و هم در انتهای خود دارای یک اریفیس هستند. سر این نوع از وسایل اندازه‌گیری بر روی سطح مورد آزمایش قرار گرفته و براساس نشتی هوا، پرداخت سطح اندازه‌گیری می‌شود وسایل پنوماتیکی ساده، کم هزینه و قابل حمل و نقل می‌باشند.

⁶ -photo detector

⁷ -Small phase shift

روشهای دیگری هم موجودند که در اینجا مجال بحث آنها نیست. جدول (۴-۱) خصوصیات روش های مختلف را با هم مقایسه می کند.

در ادامه بحث به بررسی بیشتر روش استایلوس پرداخته می شود و به همین منظور به معرفی پارامترهایی که در محاسبات استایلوس به کار می روند می پردازیم.

خط مرجع^۸

در تجزیه و تحلیل پارامترهای مربوط به تشخیص پروفیل سطح، تمام اندازه گیریها نسبت به یک خط مرجع قراردادی انجام می شود. برای انتخاب خط مرجع از روشهای مختلفی می توان استفاده کرد که در زیر به آنها اشاره شده است.

۱- روش میانگین یا سیستم M: اساس سیستم M این است که خط مرجع به عنوان مرکز پروفیل انتخاب شود. در واقع در این روش خط مرجع به نحوی انتخاب می شود که مساحت سطح بین پروفیل و خط مرجع در بالا و پایین خط با هم برابر شوند. (شکل (۴-۵)). این روش همواره یک خط افقی را به ما می دهد که خطای فرم را هم در بر نمی گیرد (به منظور دانستن خطای فرم به شکل ۴-۶ مراجعه شود).

۲- روش میانگین ده نقطه: در این روش ۵ نقطه از بالاترین نقاط پروفیل سطح و ۵ نقطه از پایین ترین نقاط پروفیل را در نظر گرفته و میانگین این ۱۰ نقطه را رسم می کنیم. این خط همان خط مرجع می باشد.

۳- روش حداقل مجذورات: در این روش یک خط شیبدار به جای خط افقی به عنوان خط مرجع قرار می گیرد. مزیت این روش این است که می توان خطای فرم را به وسیله آن تصحیح کرد. معادله خط مرجع $z = mx + b$ می باشد که در آن :

m: شیب خط

b: محل تقاطع خط با محور Z ها می باشد.

یک مجموعه نقاط $P_1(x_1, z_1), P_2(x_2, z_2), \dots, P_n(x_n, z_n)$ را در نظر بگیرید. به ازای هر نقطه X می توان به دو طریق Z را به دست آورد.

⁸- reference line

۱- اندازه گیری Z از طریق استایلوس

۲- محاسبه Z از فرمول $mx+b$

مقدار اختلاف را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$d_1 = [Z_1 - (mx_1 + b)], \dots, d_n = [Z_n - (mx_n + b)]$$

برای اینکه بهترین خط از تمام نقاط بگذرد بایستی در معادله زیر صدق کند.

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = 0$$

نام حداقل مجذورات نیز از همین شرط گرفته شده است. علاوه بر انتخاب خطی به عنوان مرجع لازم است طولی از سطح که به عنوان نمونه هم انتخاب می شود، به اندازه کافی از نظر پروفیل سطح و زبری متنوع باشد. با تعریف تابع f به صورت زیر:

$$f(m, b) = \sum_{i=1}^n d_i^2 = 0$$

یا به صورت ساده تر:

$$f(m, b) = [Z_1 - (mx_1 + b)]^2 + [Z_2 - (mx_2 + b)]^2 + \dots + [Z_n - (mx_n + b)]^2$$

مقادیری از m و b که به ازای آنها $f(m, b)$ کمترین مقدار می شوند، از رابطه زیر به دست می آیند.

(۱-۴)

$$\frac{\partial f}{\partial m} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial b} = 0$$

محاسبه پارامترهای سطح (با اندازه گیری توسط استایلوس)

خط مرجع را می توان از سیستم M و یا از روش حداقل مجذورات به دست آورد، به نحوی که مقدار متوسط Z_i ها صفر گردد. نقاط اندازه گیری شده را در یک محدوده فاصله کوچک D انتخاب می کنیم. در زیر به تعریف سه پارامتر سطح می پردازیم:

۱- میانگین جبری (خط متوسط مرکزی) که با R_a نشان داده می شود و به صورت زیر به دست می آید:

(۲-۴)

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i|$$

از معادله $\frac{\partial f}{\partial b}$ نتیجه می شود که $\sum di = 0$ بنابراین $\sum_{i=1}^N (Z_i - mx_i + b)$ دارای مقدار متوسط صفر می باشد.

۲- جذر میانگین توانها که با R_q نشان داده می شود و به صورت زیر تعریف می شود :

(3-۴)

$$R_q = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

اگر توزیع گاؤوسی برای ارتفاع Z فرض شود مقدار R_q معرف انحراف استاندارد پروفیل سطح خواهد بود.

۳- ارتفاع بیشینه بلندی و پستی که با R_t نشان داده می شود و به صورت زیر تعریف می شود:

(4-۴)

$$R_t = \max(z) - \min(z)$$

و معمولاً $R_a \leq R_q \leq R_t$ خواهد بود.

برای یک پروفیل سینوسی ساده نسبت R_q به R_a برابر مقدار زیر است :

$$\frac{R_q}{R_a} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$$

در پایان بایستی توضیح داد که تشخیص عواملی چون صافی سطح، پرداخت سطح، هموار بودن سطح و ... را نباید از

توپوگرافی انتظار داشت بلکه این معانی به نوع کاربرد هم بر می گردند.

جدول (۲-۴) مقادیر متوسط R_a را برای پروسه های مختلف ماشینکاری نشان می دهد. همچنین شکل (۴-۷) ۶ پروفیل

سطح مختلف را که دارای R_a یکسانی هستند نشان می دهد. از آنجا که مقدار R_a دقیقاً مشخص نمی کند که آیا

انحراف از مقدار متوسط در نظر است یا اینکه انحراف از بیشترین مقادیر، دست اندر کاران علم تریبولوژی پارامترهای

سطح بیشتری را برای جهت یافتن به اطلاعات کاملتر بکار می برند.

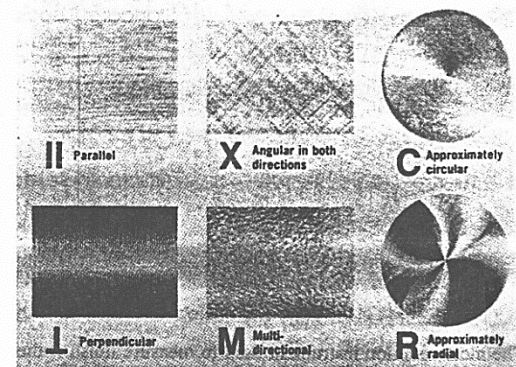
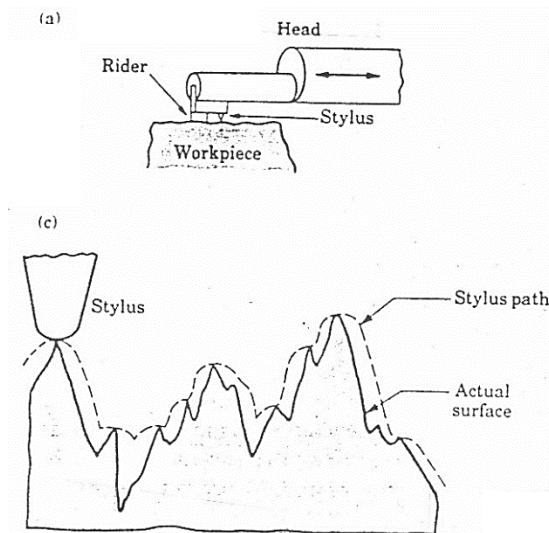
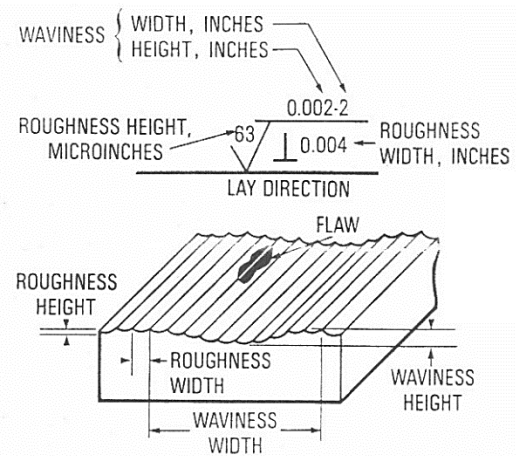
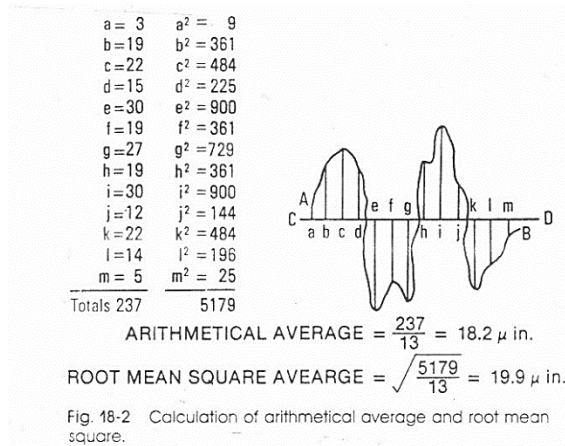
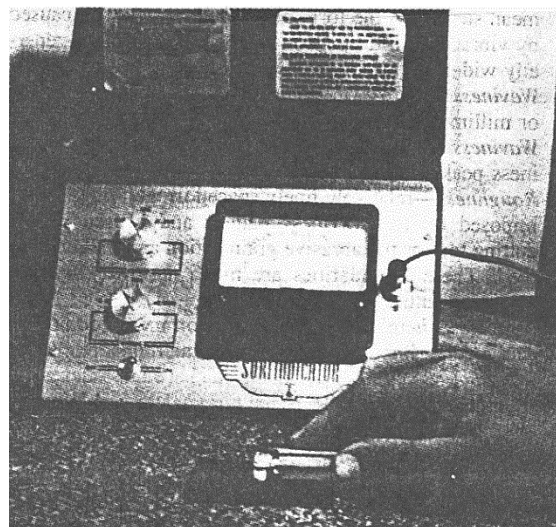
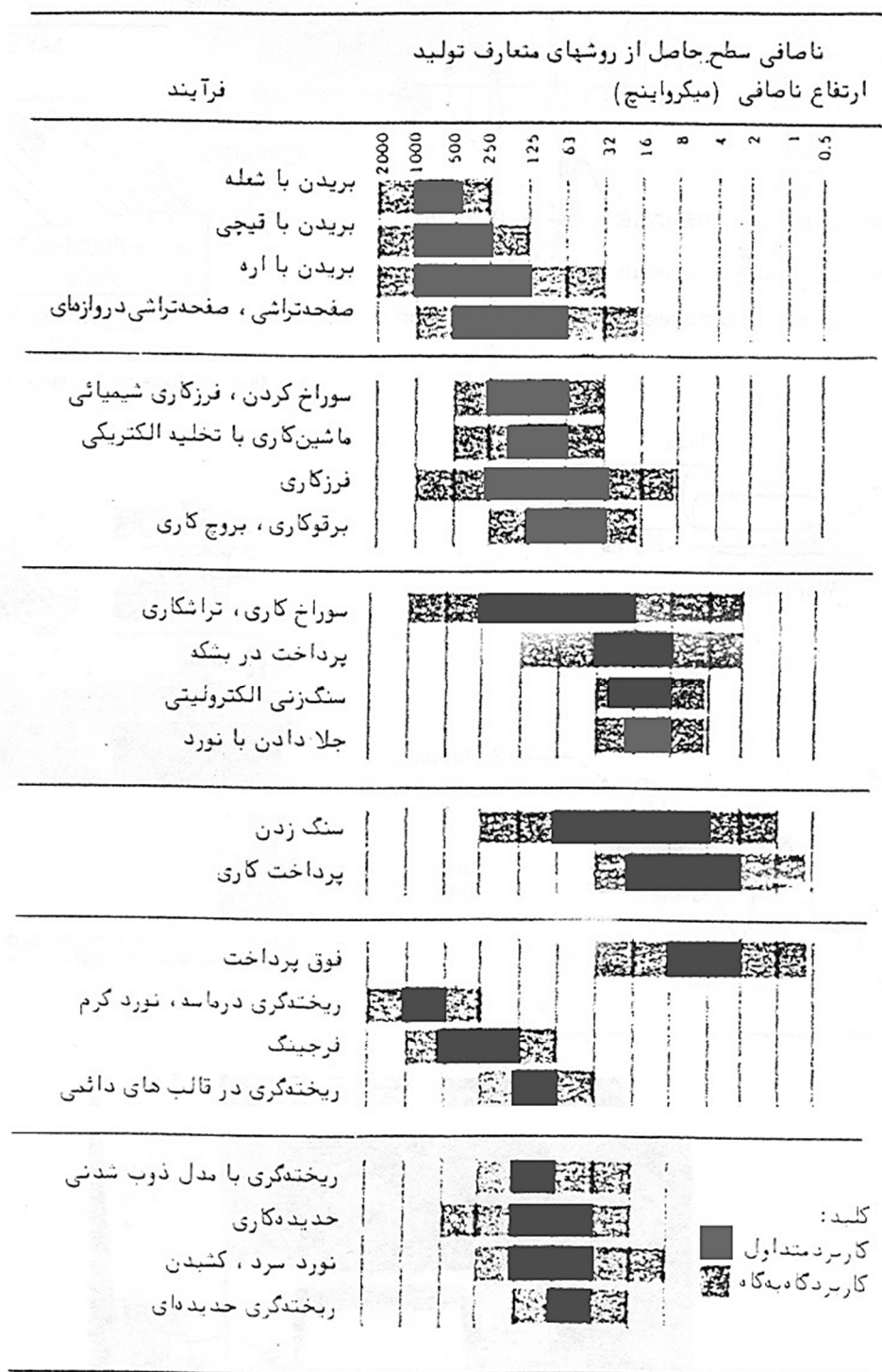


Fig. 18-4 Surface symbols used to designate the direction of the lay. (Courtesy GAR Electroforming Limited.)

شکل (۴-۳۵) اندازه گیری زبری سطح



شکل (۴-۳۶) اندازه گیری زبری سطح



شکل (۴-۳۹) محدوده زبری های حصول شده در فرایندهای ساخت و پرداخت

تداخل نوری (Optical Interferometry)

تداخل نوری بطور کلی با تداخل ایجاد شده بواسطه تقسیم دامنه نور سروکار دارد. هنگامی که پرتو نور بر روی یک لایه نازک می‌افتد، قسمتی از دامنه آن از سطح اولیه بازتاب شده و قسمتی دیگر حرکت خود را به طرف سطح تحتانی ادامه می‌دهد تا در آنجا نیز مستقیماً متساوی دیگری بازتاب شود. بدلیل اینکه هر دو امپه بازتاب شده هم فاز می‌باشند ولی یکی از آن‌ها فاصله بیشتری را پیموده، شرایط تداخل با هم را دارا می‌باشند. تداخل نوری تحت قانون کوسینوس انجام می‌شود که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

یک لایه نازک با ضخامت t و ضریب شکست نور μ را همانند شکل زیر در نظر بگیرید. فرض کنید که دو امپه موازی نور A و A_1 به سطح فوقانی لایه در نقاط B و B_1 برخورد می‌کنند. امپه A_1B_1 به نقطه C_1 منعکس شده که در آنجا به نقطه B بازتاب شود تا با امپه AB تداخل کند. اگر خط‌های B_1D و BD_1 را به ترتیب عمودهایی از B_1 و B باشند، تفاوت مسافت پیموده شده در هوا بین این دو پرتو BD خواهد بود. در لایه نازک تفاوت مسافت پیموده شده B_1C_1 بعلاوه C_1B می‌باشد. بواسطه اینکه زمانی که برای B_1 طول می‌کشد تا در لایه نازک به D_1 برسد برابر با زمانیست که برای D طول می‌کشد که در هوا به B برسد، تفاوت مسافت پیموده شده

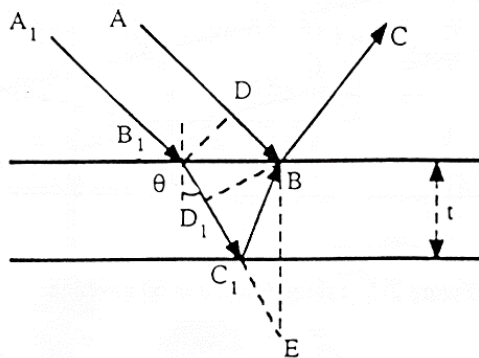


Figure 2-1: Interference of two reflecting beams

بین دو اسف (۱) می توان نشان داد که $B_1C_1 + C_1B - B_1D_1$ برابر با B_1E خواهد بود. از هندسه نشان داده شده در شکل (۱) می توان نشان داد که B_1E برابر با $2t \cos \theta$ می باشد. از آنجا که $B_1E = 2t \cos \theta$ است، پس $\delta = 2t \cos \theta$ که در اینجا θ زاویه شکست نور در لایه نازک است. در هوائ تفاوت مسافت برابر با $\delta = 2\mu t \cos \theta$ می باشد. بواسطه تغییر فاز 180° که در بازتاب نقطه B داریم، داسست، تفاوت طول موج اسف ها برابر $\lambda/2$ می باشد که در نتیجه برای $\delta = 2\mu t \cos \theta$ و پرتوهای بازتاب شده از نقطه B به طرف نقطه C باهم تداخل کامل را خواهند داشت و هیچ نوری به نقطه C نخواهد رسید. در واقع نور پرتوها در تعداد n موج می توانند تداخل کنند که بنابراین برای $n\lambda = 2\mu t \cos \theta$ نوارهای تاریک ایجاد خواهد شد. اما برای $(n + \frac{1}{2})\lambda = 2\mu t \cos \theta$ نوارهای روشن بدست خواهد آمد. آنچه آورده شد قانون کوسینوس ایستیک است. برای حالتی که t ثابت نیاسد، همانند یک لایه گویای شکل تداخل هنوز رخ خواهد داد. برای چنین هندسه ای نوارهای بصورتی که در شکل (۲) نشان داده شده در مکانهای A، B، C، ... بر روی سطح فوقانی ایجاد خواهد شد. تفاوت ضخامت گویه بین دو نوار مجاور برابر $\lambda/2$ است.

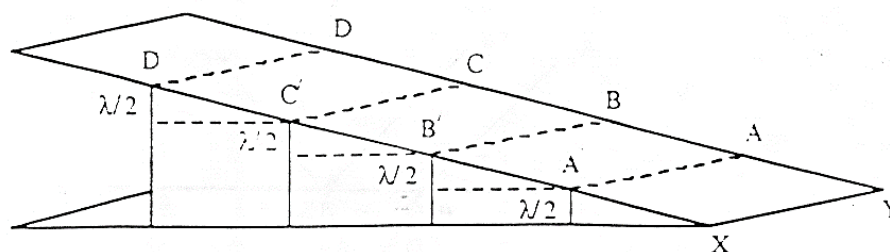


Figure 2-2: Fringe formation on a wedge