



بسم الله الرحمن الرحيم

آشنایی با فرآیندهای ساخت

فصل سوم: مهندسی سطح (۱)

مدرس:

دکتر رضا قنوازی

r_ghanavati@sbu.ac.ir

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

پاییز ۱۴۰۳

□ فهرست مطالب

- (1) مقدمه
- (2) خواص و ساختار سطح
- (3) بافت سطح و زبری
- (4) تریبولوژی
- (5) عملیات سطحی و پوشش دهی

(۱) مقدمه

در طول فرآوری مواد، تغییرات مختلف مکانیکی، فیزیکی، حرارتی و شیمیایی اثرات مهمی روی سطح یک قطعه تولید شده دارند. سطح به طور کلی دارای خواص و رفتاری است که می‌تواند بطور قابل توجهی متفاوت از بخش‌های داخلی قطعه باشد.

اگرچه به طور کلی، حجم ماده خواص مکانیکی کلی ماده را مشخص می‌کند اما سطوح به طور مستقیم بر بسیاری از خواص مهم قطعه تولید شده تاثیر می‌گذارند، از جمله:

- خواص سایشی و اصطکاک قطعه حین قرارگیری تحت عملیات تولید بعدی نظیر در تماس قرار گرفتن با

ابزار و یا قالب‌ها و یا نهایتاً در سرویس

- میزان مؤثر بودن روانسازها (Lubricants) حین عملیات تولید و حین سرویس

- ظاهر قطعه
- تأثیر سطح قطعه روی عملیات بعدی نظیر رنگ کردن، پوشش دهی، جوشکاری، لحیم کاری، برقراری اتصال چسبان (استفاده از چسبها) و همچنین مقاومت به خوردگی.
- شروع ترکها از عیوب سطحی نظیر زبری، خراشها و نواحی متأثر از حرارت که می تواند باعث تضعیف و شکست زود هنگام قطعه توسط مکانیزم خستگی و یا دیگر مکانیزمها شود.
- تأثیر بر رسانایی گرمایی و الکتریکی قطعه؛ برای مثال، یک سطح زبر مقاومت گرمایی و الکتریکی بیشتری در قیاس با یک سطح صاف دارد، چرا که نقاط تماس مستقیم کمتری بین دو سطح زبر برقرار خواهد بود.

تریبولوژی (Tribology): علم مطالعه سطوح است و شامل اصطکاک، سایش و روانکاری و سایر پدیده‌های

سطحی است. بر این اساس در علم تریبولوژی مباحث زیر بیان می‌شوند:

الف) اصطکاک بر نیرو و انرژی مورد نیاز برای حرکت و کیفیت سطح قطعات تولید شده تاثیر می‌گذارد؛

ب) سایش، هندسه سطحی ابزارها و قالبها را تغییر می‌دهد که به نوبه خود بر کیفیت محصولات تولیدی و اقتصاد تولید تاثیر منفی می‌گذارد؛

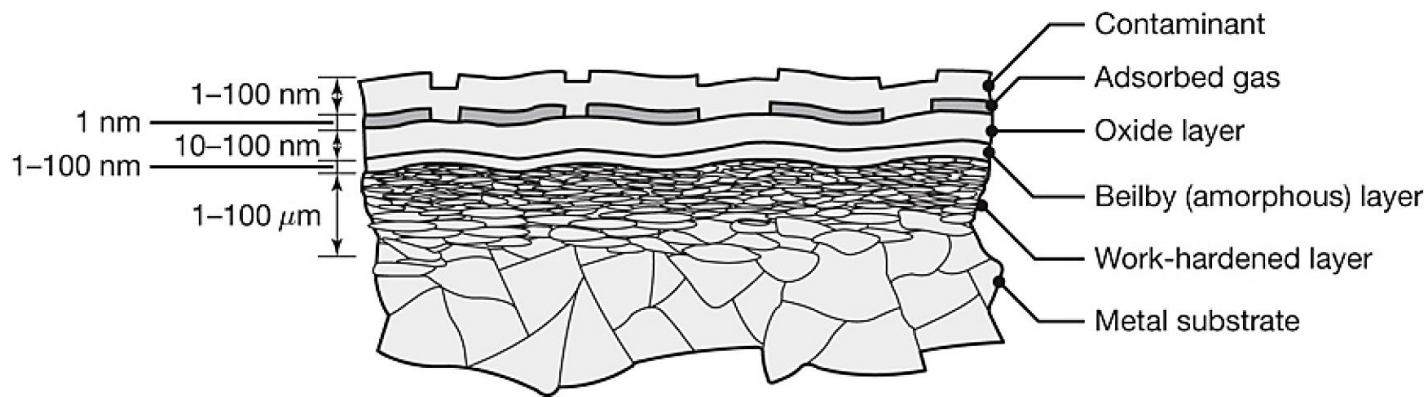
ج) روانکاری یک جنبه جدایی‌ناپذیر از تمام عملیات تولید و همچنین عملکرد مناسب ماشین آلات و تجهیزات است.

این ویژگی‌ها و خواص سطوح از طریق روش‌های متعدد عملیات سطحی (Surface treatments) نظیر روش‌های متنوع مکانیکی، گرمایی، الکتریکی و شیمیایی می‌توانند اصلاح و یا بهبود یابند.

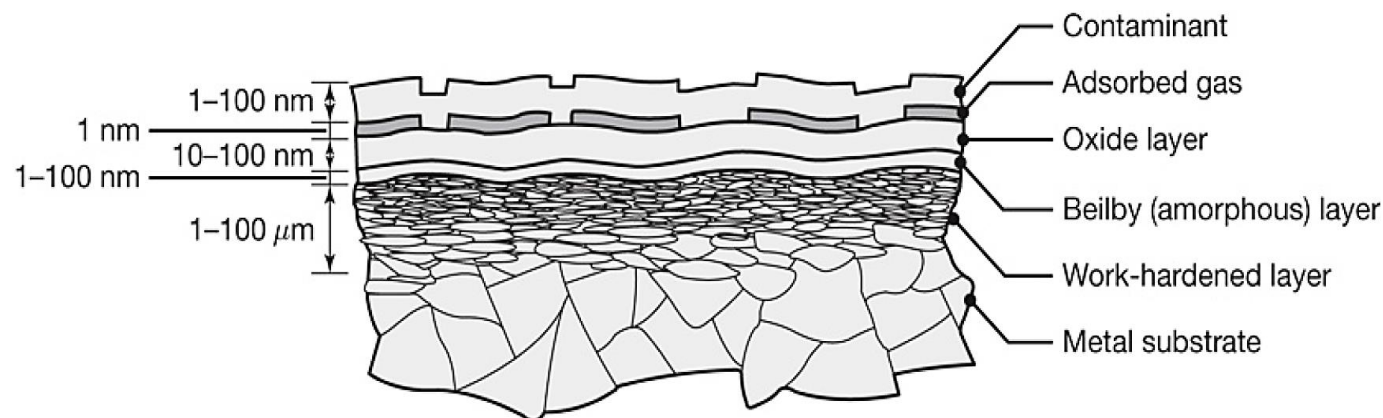
(۲) خواص و ساختار سطح

سطوح پیچیدگی قابل توجهی دارند. باتوجه به شکل، بخشی از فلز که در داخل قرار دارد، **بالک فلزی** (حجم فلز) نامیده می‌شود. ساختار آن بستگی به تاریخچه **ترکیب** و **فرآوری فلز** دارد. بالاتر از حجم فلز، یک لایه است که معمولاً **تغییر شکل پلاستیک** داده و حین فرآوری کار سخت شده است. عمق و خواص لایه کار سخت شده (که به ساختار سطحی نیز شناخته می‌شود) به عواملی مانند تاریخچه **فرآوری** و میزان **اصطکاک** که تحت تأثیر آن قرار گرفته، بستگی دارد. اگر سطح توسط ماشینکاری با یک ابزار کند یا تحت شرایط ضعیف فرآوری تولید شده باشد، این لایه نسبتاً **ضخیم** است. همچنین، در طول فرآوری، **تنش‌های پسماند** در این لایه‌ی کار سخت شده ممکن است به دلیل الف) **تغییر شکل غیریکنواخت سطح** نسبت به بالک؛ یا ب) **گرادیان شدید**

دمایی، ایجاد شود.



علاوه بر این، یک **لایه آمورف** ممکن است در بالای لایه کار سخت شده وجود داشته باشد. این لایه در برخی از عملیات ماشینکاری و یا عملیات تکمیلی سطح که در آنها ذوب و سیلان سطح با سرمایش سریع (Quenching) همراه است، دیده می‌شود. به جز زمانی که فلز در محیط خنثی (بدون اکسیژن) فرآوری و نگهداری شود، یا یک فلز نجیب باشد، یک **لایه اکسیدی** معمولاً در بالای لایه کار سخت شده یا لایه آمورف ایجاد می‌شود. تحت شرایط عادی محیطی، لایه‌های اکسیدی سطح معمولاً با لایه‌های جذب شده از **گاز و رطوبت** پوشیده شده‌اند. لایه‌های خارجی‌تر فلز ممکن است با **آلاینده‌هایی مانند خاک، گرد و غبار، گریس، روانسازها، بقایای ترکیبات تمیز کننده‌ها و آلاینده‌های محیطی** پوشانده شود. بدین ترتیب آشکار است که سطوح به طور کلی دارای خواصی هستند که به طور قابل توجهی **متفاوت** از زیرلایه



است.

یکپارچگی سطح (Surface integrity) ----- یعنی بدون عیب بودن سطح

یکپارچگی سطح نه تنها ویژگی‌های توپولوژیکی (هندسی) سطوح بلکه خواص مکانیکی و متالورژیکی و ویژگی‌های مختلف آن را توصیف می‌کند. یکپارچگی سطح یک مورد مهم است زیرا می‌تواند بر استحکام خستگی قطعه، مقاومت در برابر خوردگی و عمر مفید آن تأثیر بگذارد. **عیوب متعددی که حین فرآیندهای تولید ایجاد می‌شوند، می‌توانند عامل عدم وجود یکپارچگی سطح باشند.** این عیوب معمولاً از ترکیب عواملی مانند الف) نقص در مواد اولیه؛ ب) روشی که سطح توسط آن تولید می‌شود؛ و ج) عدم کنترل مناسب متغیرهای فرآیند تولید ایجاد می‌شوند.

نقص‌های سطحی عمده‌ای که در عمل رخ می‌دهند معمولاً شامل یک یا چند مورد زیر هستند: **ترک‌ها، چاله‌ها (Craters)، درزها، آخال‌ها، حملات بین‌دانه‌ای، مناطق متأثر از حرارت، استحاله‌های متالورژیکی، تغییر شکل**

پلاستیک و تنش‌های پسماند و ...

(۳) بافت سطح و زبری

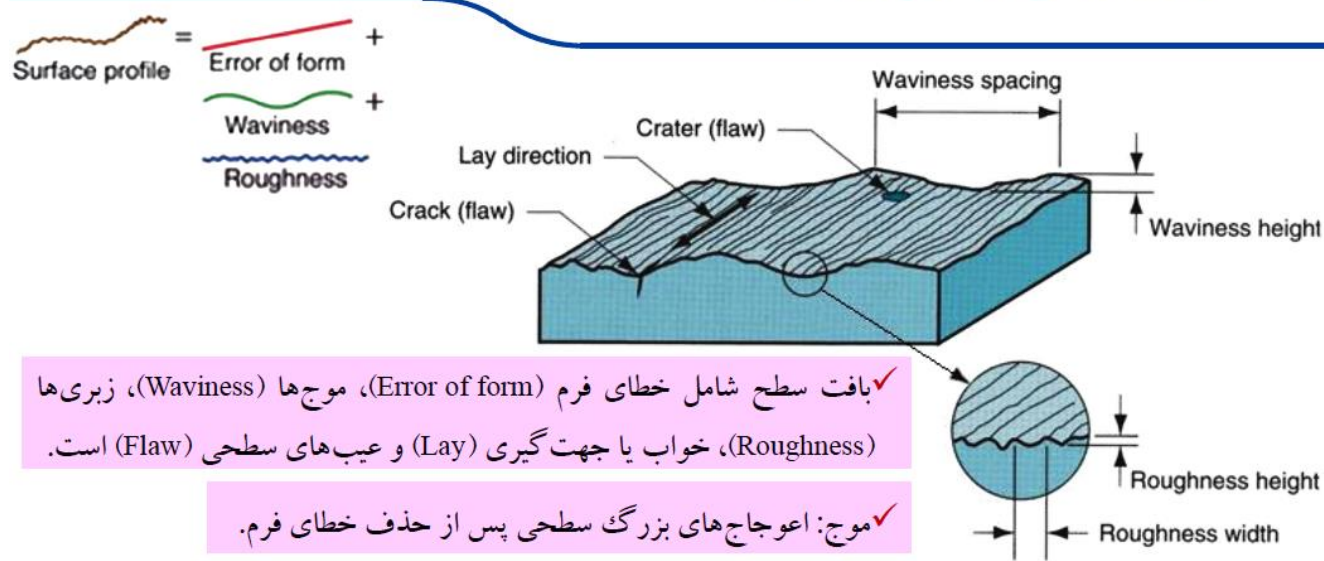
صرف نظر از روش تولید، تمام سطوح دارای خصوصیات خاص خود هستند که معمولاً به عنوان **بافت سطح** شناخته می‌شوند. اگرچه توصیف هندسه سطح می‌تواند پیچیده باشد، برای شناسایی بافت سطح با استفاده از مقادیر مشخص، کمیت‌های شناخته شده و قابل اندازه‌گیری وجود دارند که عبارتند از (شکل اسلاید ۱۱):

- ۱- **عیوب یا نقص‌ها** (Flaws/Defects)، بی‌نظمی‌های تصادفی هستند؛ مانند خراش‌ها، ترک‌ها، حفره‌ها، درزها، پارگی‌ها و آخال‌ها. ۲- **خواب یا جهت‌گیری** (lay)، **جهت الگوی غالب سطح** است که معمولاً برای چشم غیر مسلح قابل مشاهده است.

۳- **موجی بودن** (Waviness) انحراف از یک سطح صاف است، بسیار شبیه امواج روی سطح آب. این کمیت به صورت فاصله بین قله‌های امواج مجاور (عرض موج) و اختلاف ارتفاع بین قله‌ها و دره‌های امواج (ارتفاع موج) توصیف و اندازه‌گیری می‌شود. موجی شدن ممکن است ناشی از الف) انحراف ابزارها، قالبها و قطعه کار؛ ب) انحراف از نیروها یا دمای مناسب؛ ج) روانکاری غیریکنواخت؛ و د) لرزش یا تغییرات مکانیکی یا حرارتی دوره‌ای در سیستم در طول عملیات تولید باشد.

۴- **زبری** (Roughness) شامل انحراف‌های نامنظم در فواصل نزدیک است (یک مقیاس کوچکتر از موجی بودن). زبری، که ممکن است بر حالت موجی بودن سطح نیز قرار گیرد، از نظر ارتفاع، عرض و فاصله روی سطح اندازه‌گیری می‌شود.

بافت سطح و اجزای آن



✓ بافت سطح شامل خطای فرم (Error of form)، موج‌ها (Waviness)، زبری‌ها (Roughness)، خواب یا جهت‌گیری (Lay) و عیب‌های سطحی (Flaw) است.

✓ موج: اعوجاج‌های بزرگ سطحی پس از حذف خطای فرم.

✓ زبری: اعوجاج‌های ریزی که روی موج‌ها سوار می‌شوند.

✓ خواب: راستای حاکم بر الگوی سطح که در اثر ماشین‌کاری ایجاد می‌شود.

✓ عیب سطحی مانند خراش، سوراخ، حفره، کندگی، ترک، ...

۴

طول نمونه‌برداری یا Cutoff

✓ به منظور یافتن زبری باید موج‌ها از پروفیل اندازه گرفته شده حذف شوند.

✓ بدین منظور باید تا یک حد برای طول موج مشخص گردد که به آن Cutoff گفته می‌شود.

✓ Cutoff باید به اندازه کافی کوچک باشد تا موج را حذف کند.

✓ Cutoff باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بافت کافی از سطح را پوشش داده و نتایج معناداری بدهد.

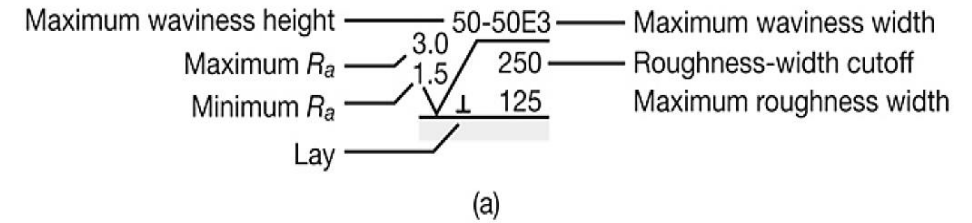


Figure 4.2

(a) Standard terminology and symbols used to describe surface finish. The quantities are given in μm . (b) Common surface-lay symbols.

زبری سطح (Surface roughness)

زبری سطح به طور کلی به دو طریق توصیف می‌شود: ۱- مقدار متوسط محاسبات (R_a). همانطور که در شکل اسلاید بعد نشان داده شده، این روش براساس نقشه‌برداری یک سطح خشن است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_a = \frac{y_a + y_b + y_c + \dots + y_n}{n} \quad (4.1)$$

در رابطه‌ی فوق $y_a, y_b, y_c, \dots, y_n$ مقادیر مطلق هستند. به طور معمول، بسته به ویژگی‌های سطح مورد اندازه‌گیری، ۸۰۰۰ اندازه‌گیری ارتفاع در طول یک میلیمتر انجام می‌شود.

۲- جذر میانگین مربعات (R_q ، سابقاً تحت عنوان RMS نیز شناخته می‌شد) که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_q = \sqrt{\frac{y_a^2 + y_b^2 + y_c^2 \dots + y_n^2}{n}} \quad (4.2)$$

همچنین، واحدهای مورد استفاده برای بیان زبری میکرومتر/میکرون (μm) یا میکرواینچ ($\mu in.$) هستند.

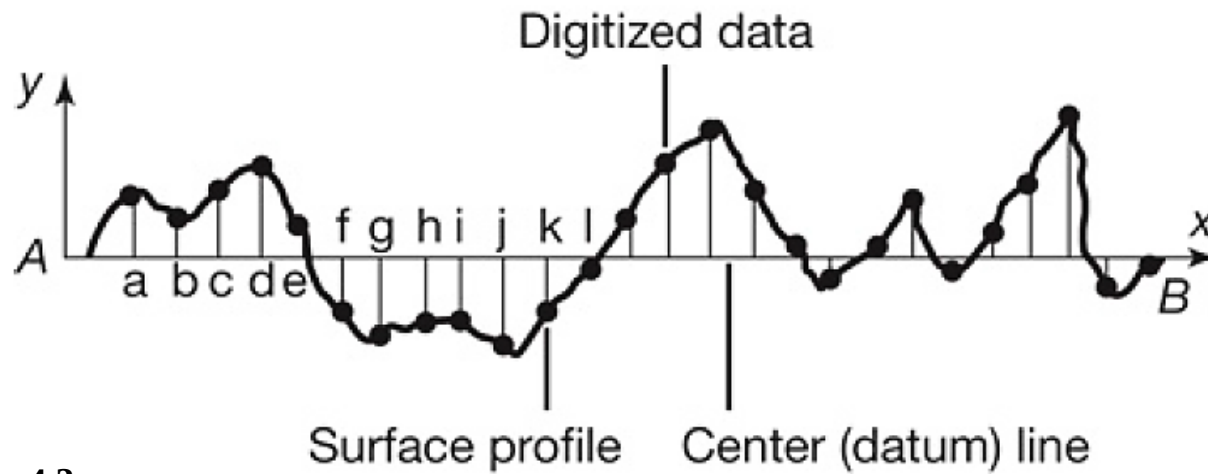


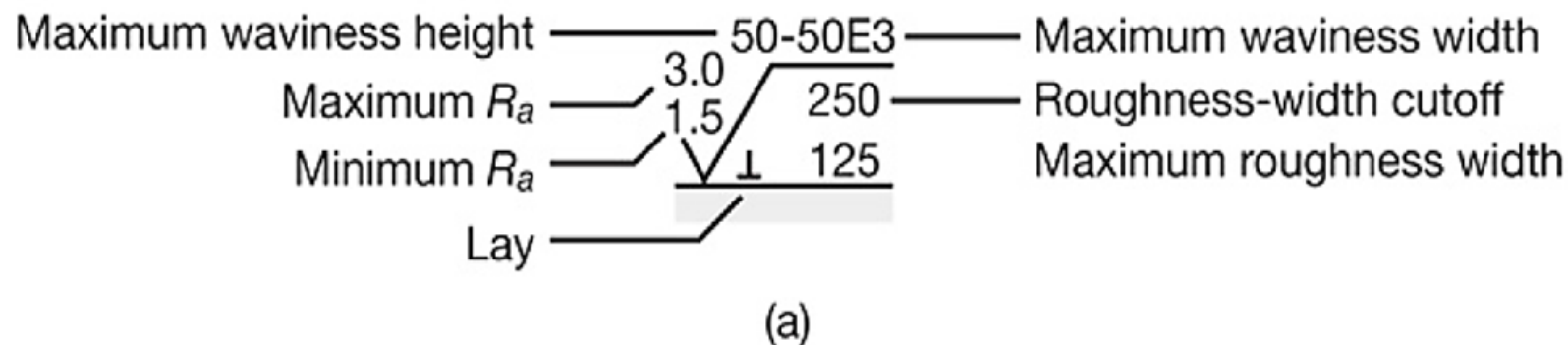
Figure 4.3

Coordinates used for measurement of surface roughness, used in Eqs. (4.1) and (4.2).

با مقایسه معادلات (۴.۱) و (۴.۲) می‌توان دریافت که رابطه‌ای بین R_q و R_a وجود دارد. همچنین می‌توان نشان داد که برای زبری یک سطح در شکل یک منحنی سینوسی، R_q بزرگتر و $1/11$ برابر R_a است. نسبت به بزرگترین قله‌ها و عمیق‌ترین دره‌ها که برای اصطکاک و روانکاری مهم هستند، حساس است. همچنین، حداکثر میزان زبری (R_t) می‌تواند به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری زبری سطح استفاده شود که به عنوان ارتفاع از عمیق‌ترین دره تا بلندترین قله تعریف می‌شود و به دلیل سادگی آن بطور گسترده در مهندسی استفاده می‌شود.

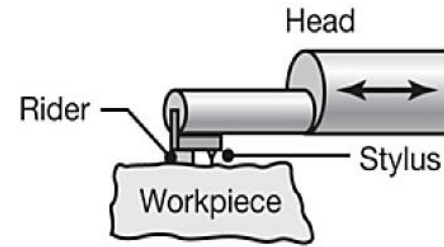
نمادهای زبری سطح

محدودیت‌های قابل قبول برای **زبری سطح** در نقشه‌های فنی توسط نمادهای نشان داده شده در شکل اسلاید ۱۱ مشخص می‌شود؛ مقادیر آنها در سمت چپ علامت قرار می‌گیرد. نمادهای مورد استفاده برای توصیف یک سطح، تنها برای مشخص کردن میزان زبری، موجی بودن و جهت‌گیری است و عیب را شامل نمی‌شود. هر گاه نقص مهم است، یک یادداشت ویژه در نقشه‌های فنی برای توصیف روش مورد استفاده برای بازرسی عیوب سطحی در کنار نمادها نوشته می‌شود.

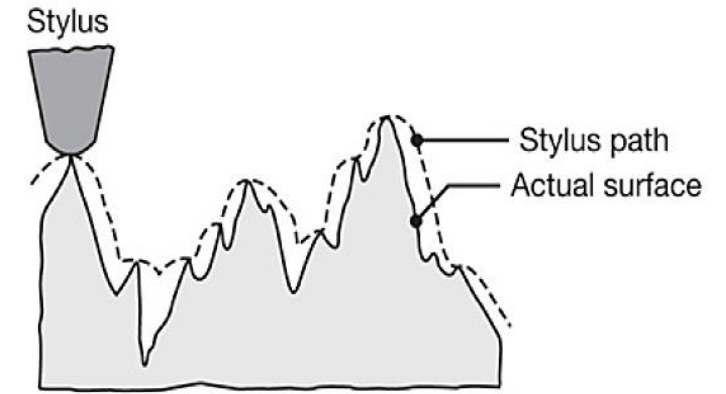


اندازه‌گیری زبری سطح

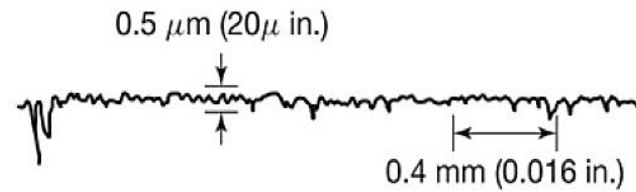
برای اندازه‌گیری زبری سطح از ابزارهای در دسترس تجاری متعددی که پروفیل‌سنج سطح (Surface profilometers) نامیده می‌شوند، استفاده می‌شود. متداول‌ترین روش، استفاده از حرکت یک سوزن الماسی در طول یک خط مستقیم روی سطح قطعه است (شکل ۴-۴ a,b). شکل ۴-۴ c-f، پروفیل سطوح ثبت شده توسط پروفیلومتر در یک مقیاس اغراق‌آمیز نشان می‌دهد. بطور کلی پروفیل‌های بدست آمده از سطوح توسط پروفیل‌سنج به طور قابل توجهی نسبت به حالت واقعی آن انحراف داشته و سطوح را به مراتب صاف‌تر از آن که واقعاً وجود دارد، بیان می‌کند. پروفیل‌سنج فقط زبری (و نه موج‌دار بودن سطح) را نشان می‌دهد (معمولاً در قالب R_a یا R_q). همچنین در صورت تمایل، داده‌های مربوط به پروفیل سطح را می‌توان برای تجزیه و تحلیل بیشتر به یک کامپیوتر منتقل کرد.



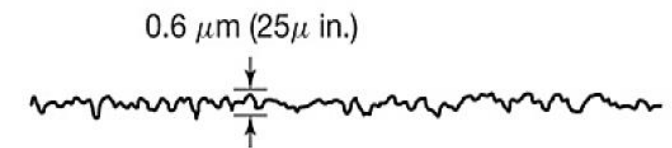
(a)



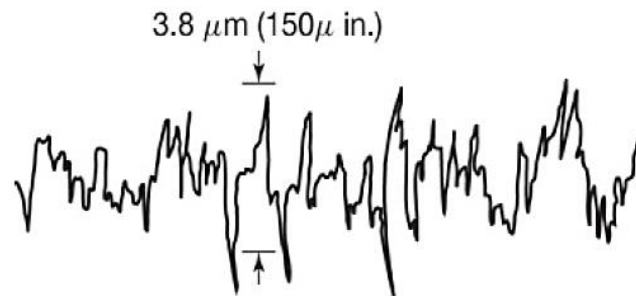
(b)



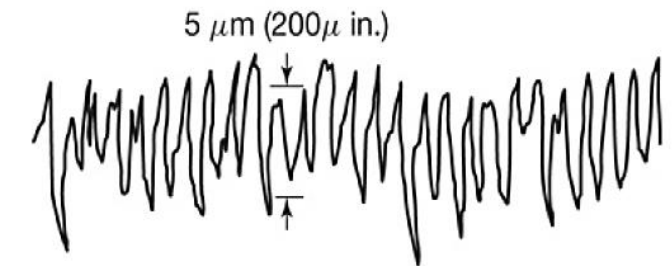
(c) Lapping



(d) Finish grinding



(e) Rough grinding



(f) Turning

Figure 4.4

(a) Measuring surface roughness with a stylus. The rider supports the stylus and guards against damage. (b) Path of the stylus in measurements of surface roughness (broken line) compared with the actual roughness profile. Note that the profile of the stylus' path is smoother than the actual surface profile. Typical surface profiles produced by (c) lapping (POLISHING); (d) finish grinding; (e) rough grinding; and (f) turning processes. Note the difference between the vertical and horizontal scales.

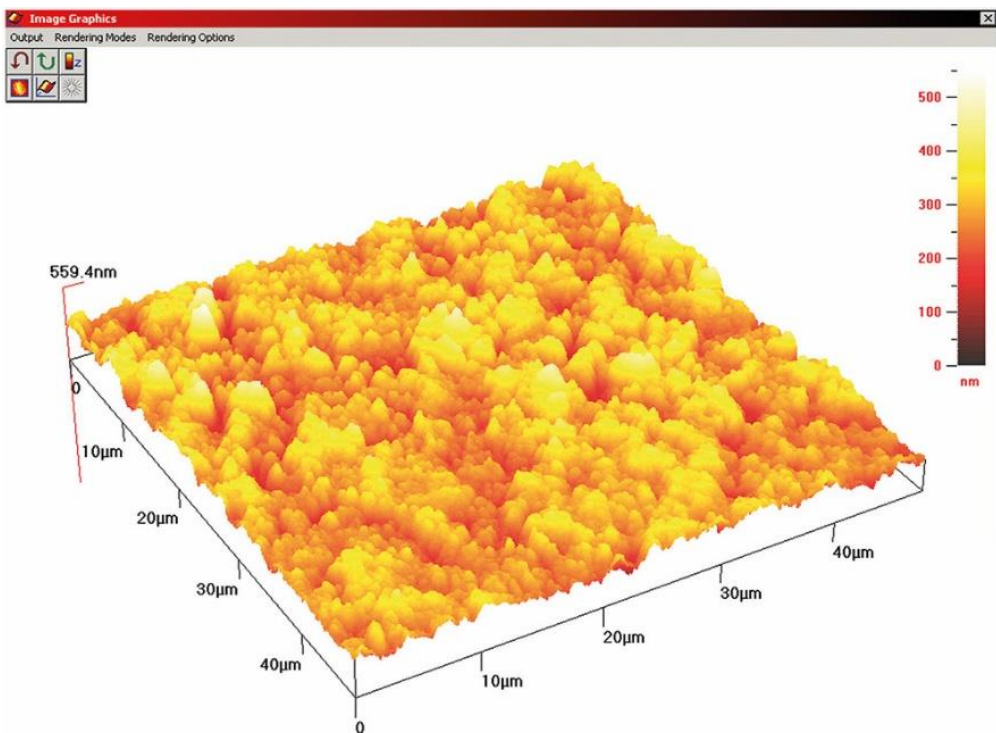
بعلاوه، زبری سطح را می‌توان به طور مستقیم از طریق روش‌های زیر نیز مشاهده کرد:

الف) تداخل‌سنجی (interferometry)؛

ب) میکروسکوپ نوری (OM) یا الکترونی روبشی (SEM)؛

ج) میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM).

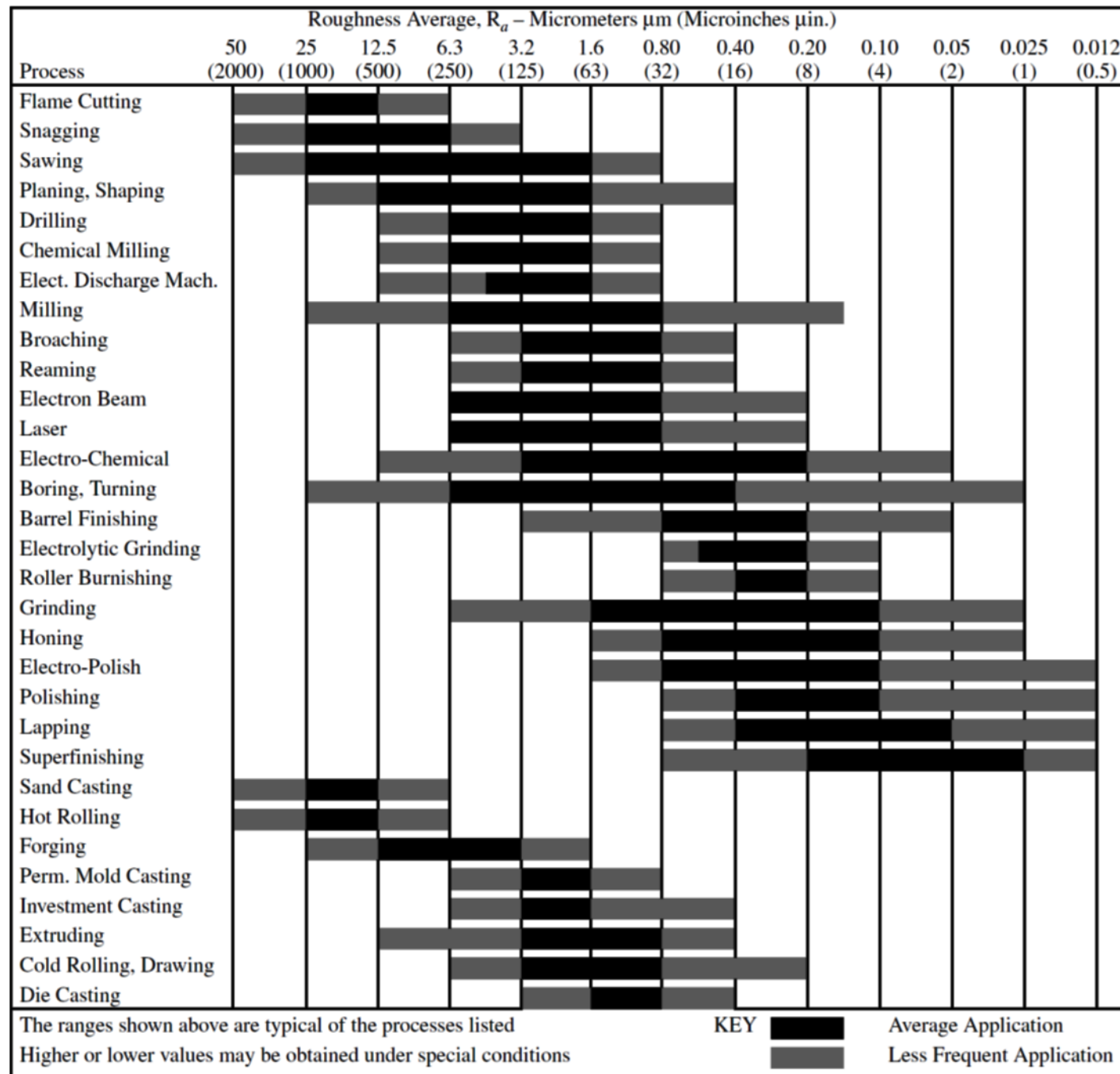
تکنیک‌های میکروسکوپی مخصوصاً برای تصویربرداری از سطوح بسیار صاف مفید است که ویژگی‌های آن‌ها نمی‌تواند توسط دستگاه‌های با حساسیت کمتر درک شود. بویژه روش AFM می‌تواند برای اندازه‌گیری سطوح بشدت صاف استفاده شود، تا جایی که این روش حتی توانایی تشخیص اتم‌ها روی یک سطح صاف از دیدگاه اتمی را داراست.



اهمیت زبری سطح در عمل

الزامات طراحی در خصوص زبری سطح برای کاربردهای مهندسی از طیف گسترده‌ای برخوردار است. دلایل و ملاحظات این طیف وسیع عبارتند از:

- سطوح متحرک در تماس، نیاز به دقتهای متفاوتی دارند. برای مثال در بلبرینگ‌ها، رینگ‌ها و ساچمه‌ها به سطوح بسیار صاف و با دقت بالا نیاز دارند، در حالی که سطوح برای سیستم ترمز بسیار زبرتر است.
- ملاحظات تریبولوژیکی، از جمله اثرات زبری بر اصطکاک، سایش و روانکاری.
- خستگی و حساسیت به فاق (notch)، چرا که سطوح زبر معمولاً عمر خستگی کمتری دارند.
- مقاومت تماسی الکتریکی و حرارتی، به دلیل اینکه سطوح زبرتر، مقاومت تماسی بالاتری دارند.
- مقاومت به خوردگی، چرا که برای سطوح زبرتر، احتمال ورود و گیرافتادن مواد خوردنده بیشتر خواهد بود.
- فرآیندهای بعدی، مانند رنگ کردن و پوشش‌دهی، که در آن درجه خاصی از زبری به طور کلی باعث پیوند بهتر خواهد شد (این پدیده قفل شدن مکانیکی نامیده می‌شود).
- بسته به کاربرد، ممکن است عمدتاً بنا به دلایل زیبایی شناختی، یک سطح زبرتر نسبت به یک سطح صاف‌تر، ترجیح داده شود.
- ملاحظات هزینه، چرا که ایجاد سطح صاف‌تر و دقیق‌تر، هزینه تولید را افزایش خواهد داد.



۴) تریبولوژی: اصطکاک، سایش و روانکاری

اصطکاک: مقاومت در برابر لغزش نسبی بین دو سطح در تماس باهم تحت بار

فرآیندهای ساخت به علت حرکت نسبی و نیروهایی که بین ابزارها، قالبها و قطعات وجود دارند، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر اصطکاک قرار دارند. اصطکاک انرژی را از بین می‌برد و باعث تولید گرما می‌شود. در نتیجه، افزایش دما می‌تواند تأثیرات مهمی بر عملیات ساخت داشته باشد، از قبیل ایجاد گرمای بیش از حد در سنگ‌زنی. علاوه بر این، از آنجا که اصطکاک مانع حرکت آزاد در فصل مشترک ابزار، قالبها و قطعات می‌شود، به طور قابل توجهی بر سیلان و تغییر شکل مواد در فرآیندهای ساخت تأثیرگذار است. البته لازم به ذکر است اصطکاک گاهی اوقات مطلوب است. برای مثال، اصطکاک در نورد فلزات برای ساخت ورق (Sheet) و پلیت (Plate) لازم است. همچنین، در جوشکاری اصطکاکی (Friction welding) و در اجزای ماشین مانند سیستم ترمز و کلاچ، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تئوری چسبندگی در اصطکاک (Adhesion theory of friction)

تئوری چسبندگی یک توضیح رایج و ساده برای اصطکاک است و بر مبنای مشاهدات، دو سطح فلزی تمیز و روانکاری نشده تنها در کسری از ناحیه ظاهری تماسشان با یکدیگر در تماس هستند (شکل زیر). مجموع نواحی در تماس به عنوان منطقه واقعی تماس (A_r)، در نظر گرفته می‌شود.

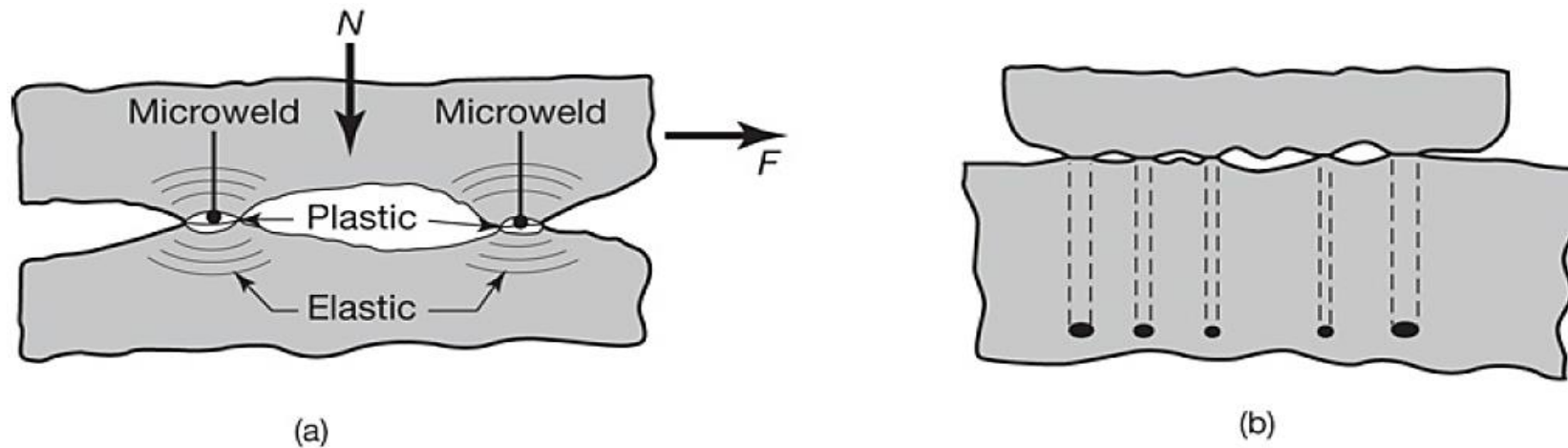


Figure 4.5

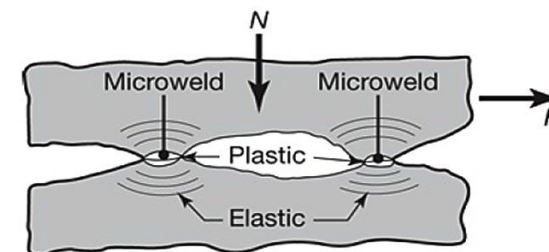
(a) Schematic illustration of the interface of two contacting surfaces, showing highly loaded asperities; and
(b) illustration of the proportion of the apparent area to the real area of contact.

در فلزات، نیروهای بسیار کم برای ایجاد **تغییر شکل پلاستیک** در محل تماس ناهمواری‌های سطحی کافی است. از آنجا که سطح واقعی تماس بسیار کوچک است، ناهمواری‌های سطحی تنش‌های بسیار بزرگی را تجربه می‌کنند و در نتیجه **میکرو جوش‌هایی** (microwelds) در محل‌های تماس واقعی تشکیل می‌شود. لذا تماس نزدیک ناهمواری‌های سطحی باعث ایجاد **پیوند چسبان** (adhesive bond) می‌شود که ماهیت آن شامل برهمکنش اتمی، نفوذ و حل شدن اجزای در تماس در یکدیگر است. قدرت اتصال به خواص فیزیکی و مکانیکی فلزات در تماس، درجه حرارت و تمیزی سطوح (مانند ماهیت و ضخامت هر نوع فیلم اکسیدی و یا آلاینده‌ها) بستگی دارد.

ضریب اصطکاک

حرکت بین دو قطعه تحت یک نیروی عمودی (N)، نیازمند استفاده از یک نیروی مماسی (F) است. بر اساس تئوری چسبندگی، F نیروی مورد نیاز برای برش اتصالات است و نیروی اصطکاک نامیده می‌شود. ضریب اصطکاک، μ ، در فصل مشترک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau A_r}{\sigma A_r} = \frac{\tau}{\sigma} \quad (4.3)$$



در رابطه‌ی فوق τ مقاومت برشی اتصال و σ تنش عمودی است که برای ناهمواری سطحی تغییر شکل پلاستیک یافته، معادل با سختی ماده است. لذا رابطه‌ی ضریب اصطکاک می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\mu = \frac{\tau}{Hardness} \quad (4.4)$$

طبیعت و استحکام فصل مشترک، مهم‌ترین عامل در مقدار نیروی اصطکاک است. یک فصل مشترک مستحکم، نیاز به یک نیروی اصطکاک بالا برای حرکت نسبی دارد. معادله (۴.۴) نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک می‌تواند با کاهش تنش برشی (مانند قرار دادن یک فیلم نازک از مواد با استحکام برشی کم در فصل مشترک) و یا با افزایش سختی مواد درگیر، کاهش یابد. با افزایش نیروی تماس، در صورتی که هیچ سیال آلوده کننده‌ای در محل تماس وجود نداشته باشد، مساحت واقعی تماس در نهایت به مساحت ظاهری تماس می‌رسد. نیروی اصطکاک در این حالت تبدیل به نیروی لازم برای برش تمام فصل مشترک شده و به حداکثر مقدار خود خواهد رسید (شکل ۴.۶).

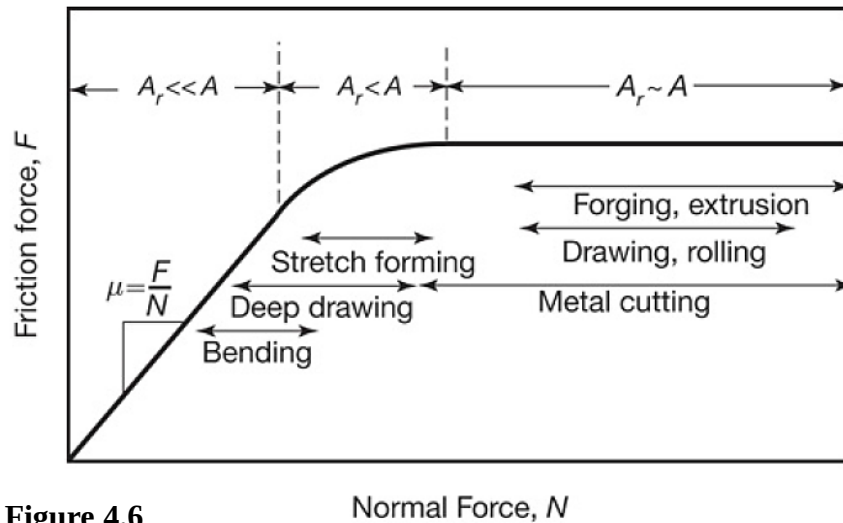


Figure 4.6

Schematic illustration of the relation between friction force, F , and normal force, N . Note that as the real area of contact approaches the apparent area, the friction force reaches a maximum and stabilizes at that level. At low normal forces, the friction force is proportional to normal force; most machine components operate in this region. The friction force is not linearly related to normal force in metalworking operations because of the high forces involved.

$$\mu = \frac{\tau}{\text{Hardness}}$$

هنگامی که سطح واقعی تماس برابر با ناحیه ظاهری تماس است، افزایش بیشتر نیروی عمودی (N)، نیروی اصطکاک (F) را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد (شکل قبل)؛ از این رو، طبق تعریف، $\mu = \frac{F}{N}$ ، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. از آنجا که این وضعیت خلاف واقع است، یک رویکرد مفیدتر، تعریف فاکتور اصطکاک (m) بصورت زیر است:

$$m = \frac{\tau_i}{k} \quad (4.5)$$

در رابطه‌ی فوق τ_i استحکام برشی فصل مشترک است و k استحکام تسلیم برشی ماده نرم‌تر در جفت لغزشی است. مقدار k با توجه به معیار ماکزیمم تنش برشی (معیار ترسکا) $S_y/2$ و با توجه به معیار فون میزز $S_y/\sqrt{3}$ است. باید توجه داشته داشت که وقتی در این تعریف $m = 0$ ، هیچ اصطکاکی وجود ندارد و وقتی $m = 1$ ، چسبندگی کامل یا جوش فصل مشترک رخ می‌دهد.

تئوری خراش در اصطکاک (Abrasion theory of friction)

اگر در مدل نشان داده شده در شکل ۴.۵-ا قطعه بالایی سخت‌تر از قطعه پایینی‌تر و یا سطح آن حاوی ذراتی سخت و برآمده باشد، قطعه نرم‌تر را خراشیده و شیارهایی را در آن ایجاد می‌کند. این پدیده، شناخته شده تحت عنوان شیارخوردگی (Plowing)، جنبه مهمی از اصطکاک **خراشان** است. در حقیقت، این می‌تواند یک مکانیزم غالب برای شرایطی باشد که چسبندگی بین دو قطعه به طور خاص قوی نیست (یعنی میکروجویش تشکیل نمی‌شود) یا سطوح تماس نسبت به هم مهاجم (aggressive) هستند.

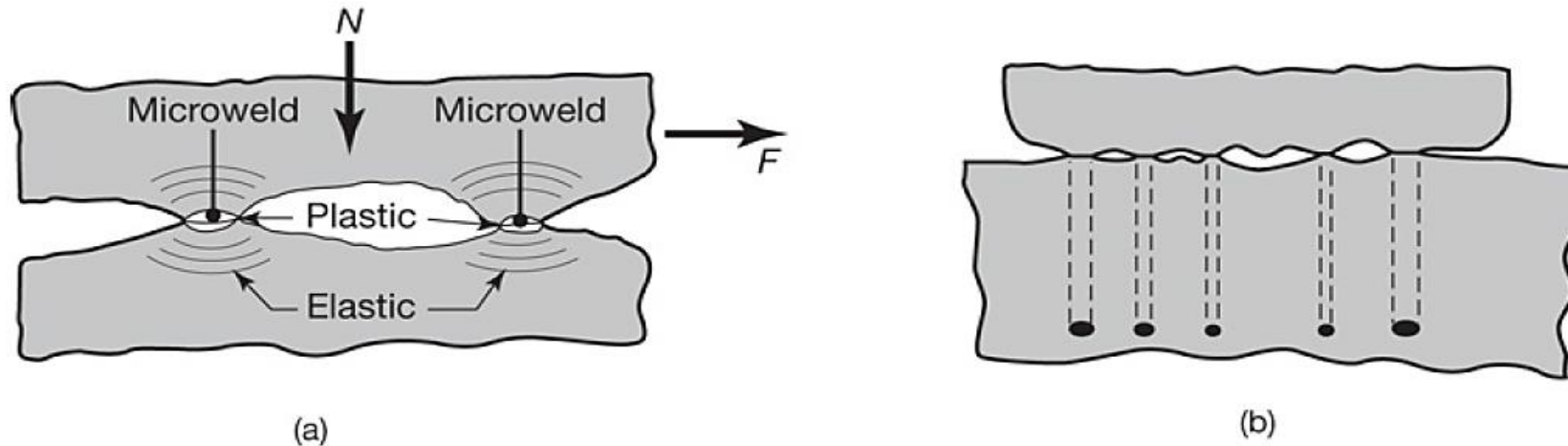


Figure 4.5

(a) Schematic illustration of the interface of two contacting surfaces, showing highly loaded asperities; and
(b) illustration of the proportion of the apparent area to the real area of contact.

اندازه‌گیری اصطکاک

ضریب اصطکاک یا فاکتور اصطکاک معمولاً به صورت آزمایشی توسط آزمون‌های شبیه‌سازی شده یا با استفاده از نمونه‌های متنوع در مقیاس کوچک و یا در مقیاس‌های مربوطه در یک فرآیند تولید، تعیین می‌شود.

تکنیک‌های مورد استفاده معمولاً شامل اندازه‌گیری نیروها یا تغییرات ابعادی در نمونه آزمایشی هستند.

یکی از آزمون‌هایی که بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، به خصوص برای فرآیندهای تغییر شکل بزرگ مانند فورج، **آزمون فشردگی حلقه** (Ring compression test) است. در این آزمون یک حلقه صاف در اثر فشار بین دو صفحه مسطح دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود (شکل زیر). همانطور که ارتفاع حلقه کاهش می‌یابد، به علت ثابت بودن حجم، حلقه به سمت بیرون گسترش می‌یابد. اگر اصطکاک در فصل مشترک نمونه و صفحات صفر باشد، هر دو قطر داخلی و بیرونی حلقه افزایش می‌یابند. اما با افزایش اصطکاک، قطر داخلی کاهش می‌یابد، زیرا انرژی کمتری برای کاهش قطر داخلی حلقه در مقایسه با گسترش قطر خارجی آن صرف می‌شود.

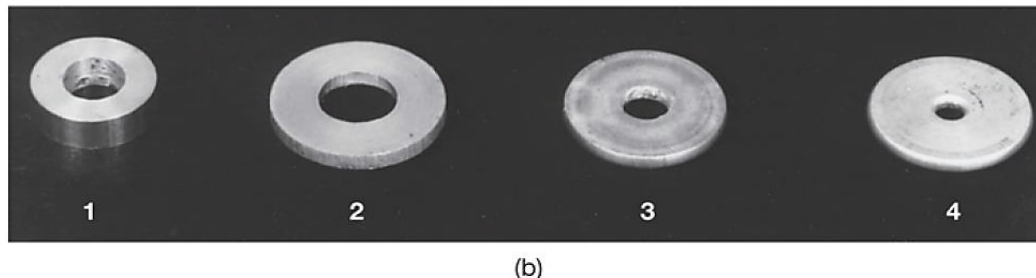
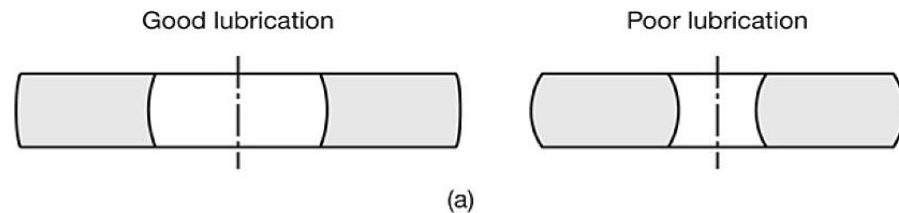


Figure 4.7

(a) The effects of lubrication on barreling in the ring compression test. (a) With good lubrication, both the inner and outer diameters increase as the specimen is compressed; and with poor or no lubrication, friction is high, and the inner diameter decreases. The direction of barreling depends on the relative motion of the cylindrical surfaces with respect to the flat dies. (b) Test results: (1) original specimen, and (2–4) the specimen under increasing friction. Source: After A.T. Male and M.G. Cockcroft.

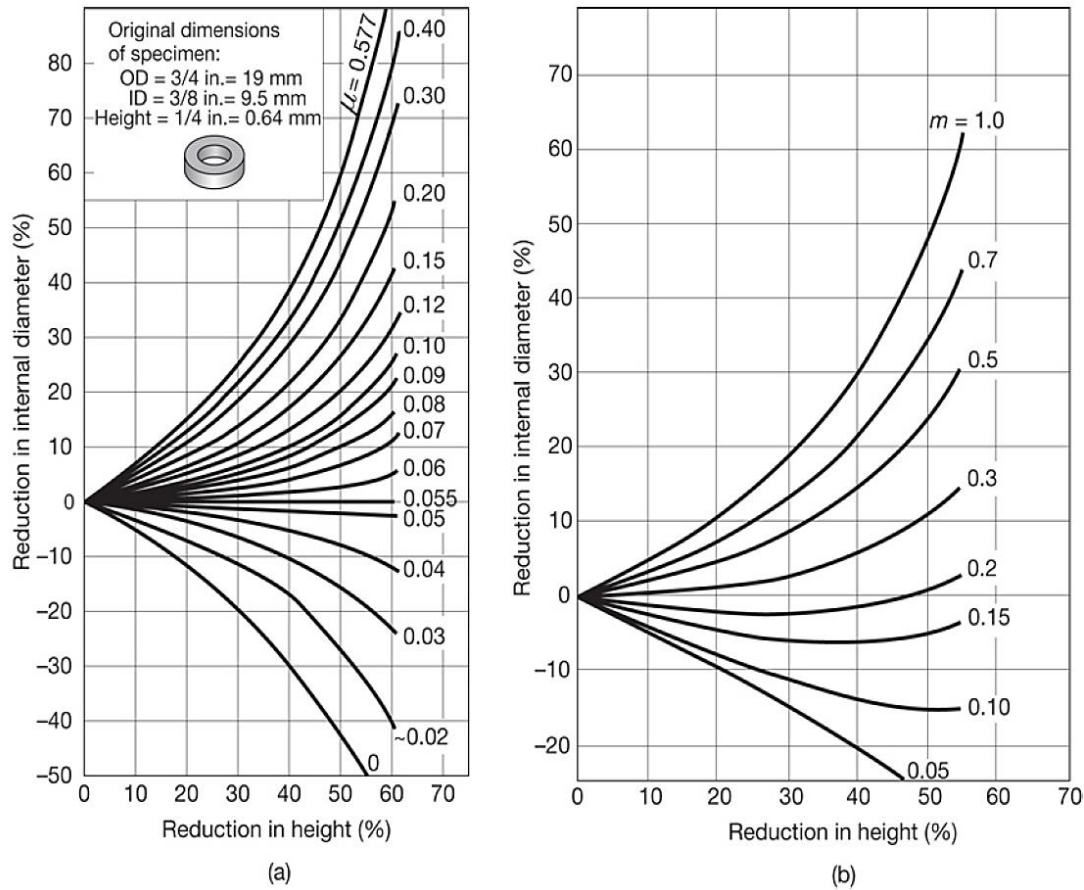


Figure 4.8

Charts to determine friction in ring compression tests: (a) coefficient of friction, μ ; and (b) friction factor, m . Friction is determined from these charts from the percent reduction in height and by measuring the percent change in the internal diameter of the specimen after compression.

در واقع برای یک کاهش ارتفاع معین، اگر μ کم باشد، قطر داخلی نسبت به مقدار اولیه آن افزایش می‌یابد و اگر μ بالا باشد، کاهش قطر داخلی رخ می‌دهد. با اندازه‌گیری تغییر قطر داخلی نمونه و استفاده از منحنی‌های نشان داده شده در شکل رو به رو (که از طریق تحلیل‌های نظری توسعه می‌یابد) می‌توان میانگین ضریب اصطکاک یا فاکتور اصطکاک را تعیین کرد. هر حلقه با هندسه‌ای منحصر بفرد، مجموعه‌ای از منحنی خاص خود را دارد؛ رایج‌ترین نمونه، نمونه‌ای است که دارای نسبت قطر بیرونی به قطر داخلی به ارتفاع ۲:۳:۶ است. بنابراین، هنگامی که درصد کاهش قطر و ارتفاع داخلی مشخص باشد، μ به راحتی می‌تواند تعیین شود. اغلب در این آزمایش‌ها، نمونه با اندازه واقعی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، مگر آنکه تاثیر دمای بالا نیز مورد نظر باشد، زیرا نمونه‌های کوچکتر از طریق انتقال گرما به صفحات سریع‌تر سرد می‌شوند.

مثال) در یک آزمون فشردن سازی حلقه، یک نمونه با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۳۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۵ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از آزمون، ضخامت آن ۵۰٪ کاهش یافته و قطر بیرونی آن ۳۹ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مطلوب است، تعیین ضریب اصطکاک (μ) و فاکتور اصطکاک (m).

Solution:

First, the new ID needs to be determined; this diameter is obtained from volume constancy as follows:

$$Volume = \frac{\pi}{4} (30^2 - 15^2) 10 = \frac{\pi}{4} (39^2 - ID^2) 5$$

From this equation, the new ID is found to be 13 mm. Thus,

$$Change\ in\ ID = \frac{15 - 13}{15} \times 100 = 13\% \text{ (decrease)}$$

For a 50% reduction in height and a 13% reduction in ID , Fig. 4.8 yields $\mu = 0.09$ and $m = 0.4$.

(۴) تریبولوژی: اصطکاک، سایش و روانکاری

سایش (Wear)

سایش به عنوان حذف ناخواسته مواد از یک سطح تعریف شده است. سایش چه به لحاظ فناوری و چه به لحاظ اقتصادی از اهمیت بسیاری برخوردار است، به ویژه به این دلیل که سایش شکل قطعه کار، ابزار و قالبها را تغییر داده و تاثیر منفی بر عملیات تولید، ابعاد و کیفیت قطعات تولید شده خواهد گذاشت. با این وجود، در عین حال سایش می تواند تاثیر مفید و مهمی از طریق کاهش زبری سطح با حذف و تقلیل ناهمواری های سطحی نیز ایفا کند. بنابراین، در شرایط کنترل شده، سایش ممکن است به عنوان یک نوع عملیات پرداخت سطحی در نظر گرفته شود. انواع مکانیسم های سایش عبارتند از:

۱- سایش چسبان (Adhesive wear)

اگر یک نیروی مماسی به مدل نشان داده شده در شکل ۴.۵ (اسلاید ۱۴) اعمال شود، برش اتصالات می‌تواند در فصل مشترک دو قطعه یا در امتداد مسیر پایین یا بالای فصل مشترک (شکل ۴.۹) صورت گیرد (بسته به استحکام دو ماده و فصل مشترک)؛ این پدیده به عنوان سایش چسبان شناخته می‌شود. مسیر شکست بستگی به این دارد که آیا قدرت پیوندهای چسبان بالاتر از استحکام هر کدام از دو قطعه است یا خیر.

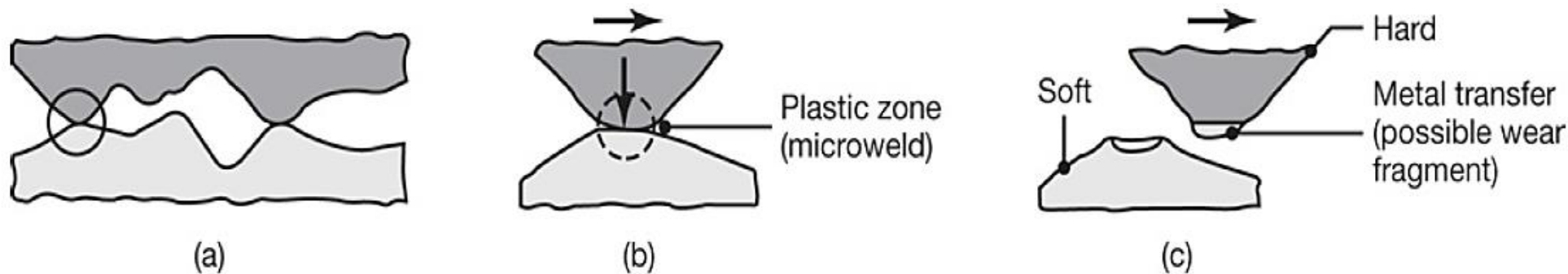


Figure 4.9

Schematic illustration of (a) asperities contacting, (b) adhesion between two asperities, and (c) the formation of a wear particle.

با توجه به احتمال اینکه اتصال بین دو سطح لغزش، منجر به تشکیل ذرات سایش خواهد شد، قانون سایش آرچارد (Archard wear law) برای سایش چسبان بیان می‌کند:

$$V = k \frac{LN}{3p} \quad (4.6)$$

در رابطه‌ی فوق V حجم مواد حذف شده توسط سایش از سطح، k ضریب سایش (بدون بعد)، L مسافت لغزش، N نیروی نرمال و p سختی جسم نرم‌تر است. لازم به ذکر است که در برخی مراجع، عامل ۳ از مخرج حذف شده و در k ضریب سایش گنجانده شده است. جدول ۴.۱ (اسلاید ۳۵) لیست مقادیر k را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که ضریب سایش برای یک جفت مواد مشابه می‌تواند بسته به شرایط آزمون و آماده‌سازی نمونه متفاوت باشد. **حلالیت متقابل قطعات در تماس (که احتمال چسبیدن را زیاد می‌کند)، یک متغیر مهم در چسبندگی است؛ در نتیجه جفت‌های فلزی مشابه، ضریب سایش بیشتری نسبت به جفت‌های غیرهمجنس دارند.**

ضریب سایش چسبان می‌تواند با یک یا چند مورد زیر کاهش یابد:

- (۱) انتخاب جفت موادی که یک پیوند چسبان قوی ایجاد نمی‌کنند، بعنوان مثال یکی از جفت‌ها یک ماده سخت باشد؛
- (۲) استفاده از موادی که یک لایه نازک اکسیدی روی سطح خود تشکیل می‌دهند؛
- (۳) اعمال یک پوشش سخت روی سطوح؛
- (۴) استفاده از روانسازها یا بهبود شرایط روانکاری.

Table 4.1 Approximate order of magnitude for the wear coefficient, k , in air

Unlubricated	k	Lubricated	k
Mild steel on mild steel	10^{-2} to 10^{-3}	52100 steel on 52100 steel	10^{-7} to 10^{-10}
60-40 brass on hardened tool steel	10^{-3}	Aluminum bronze on hardened steel	10^{-8} to 10^{-9}
Hardened tool steel on hardened tool steel	10^{-4}	Hardened steel on hardened steel	10^{-9}
Polytetrafluoroethylene (PTFE) on tool steel	10^{-5}		
Tungsten carbide on mild steel	10^{-6}		

مثال) انتهای یک میله ساخته شده از جنس برنج ۶۰-۴۰ تحت بار ۵۰۰ نیوتن روی سطح روانکاری نشده‌ی یک فولاد ابزار سخت شده در حال لغزش است. سختی برنج 400 MN/m^2 است. مطلوب است تعیین مسافت لغزش برای سایش حجم 1 mm^3 از میله برنجی توسط سایش چسبان.

Solution:

The parameters in Eq. (4.6) for adhesive wear are as follows:

$$V = 1.0 \text{ mm}^3 = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^3; k = 10^{-3} \text{ (from Table 4.1); } N = 500 \text{ N; } p = 400 \times 10^6 \text{ N/m}^2.$$

Therefore, the distance traveled is obtained from Eq. (4.6) as

$$35 \quad L = \frac{3Vp}{kN} = \frac{(3)(1 \times 10^{-9})(400 \times 10^6)}{(10^{-3})(500)} = 2.4 \text{ m.}$$

۲- سایش خراشان (Abrasive wear)

سایش خراشان توسط لغزش یک سطح سخت و خشن و یا حاوی ذرات سخت، روی یک سطح نرمتر ایجاد می‌شود. این نوع سایش باعث ایجاد شیارها یا خراش‌هایی روی سطح جسم نرم‌تر شده و باعث ایجاد میکروچیپ‌ها یا خرده‌هایی از جنس ماده‌ی نرم‌تر خواهد شد (شکل زیر). فرآیندهای ماشینکاری سایشی مانند سنگ‌زنی به این ترتیب عمل می‌کنند، با این تفاوت که در این عملیات، متغیرهای فرایند به نحوی که سطوح مورد نظر تولید شود، کنترل می‌شوند. در حالی که سایش خراشان در حالت عادی امری ناخواسته و نامطلوب است.

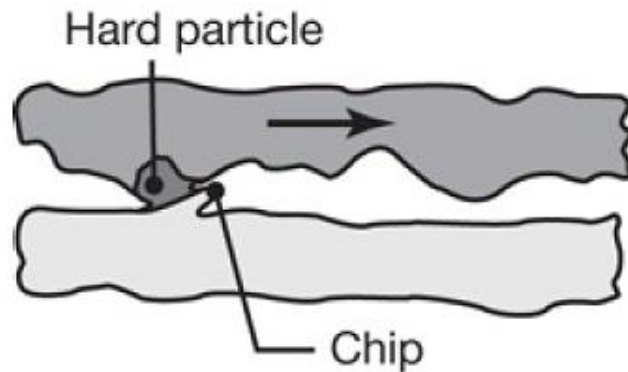


Figure 4.10

Schematic illustration of abrasive wear in sliding. Longitudinal scratches on a surface usually indicate abrasive wear.

مقاومت به سایش خراشان مواد به طور مستقیم با سختی آنها متناسب است، و قانون سایش آرچارد (معادله ۴.۶) در اینجا نیز حاکم است. بنابراین، سایش خراشان می‌تواند با افزایش سختی مواد نرم‌تر یا با تغییر متغیرهای فرآوری مواد نظیر نیرو و سرعت لغزش کاهش یابد.

با این حال، مواد بسیار نرم، مانند الاستومرها و کش‌ها، در برابر سایش خراشان مقاوم هستند؛ این به این دلیل است که آنها بصورت الاستیک تغییر فرم می‌دهند و پس از آن که ذرات ساییده از سطحشان عبور می‌کند، خود را بازیابی می‌کنند. بهترین نمونه، لاستیک‌های خودرو است که طول عمر آنها بسیار بالاست (در حدود ۷۰،۰۰۰ کیلومتر یا ۴۰،۰۰۰ مایل) و حتی فولادهای سخت شده در چنین شرایط سایشی شدید عمر طولانی نخواهند داشت.

۳- سایش خستگی (Fatigue wear) --- سایش ناشی از خستگی

این نوع سایش همچنین به نامهای خستگی سطحی (surface fatigue) یا سایش با شکست سطحی (surface fracture wear) نیز نامیده می‌شود. سایش خستگی در سطوحی که در معرض بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرند، مانند قالب‌های دایکست رخ می‌دهد. ترک‌ها روی سطوح بوسیله تنش‌های مکانیکی یا حرارتی سیکلی ایجاد می‌شوند. سپس این ترک‌ها به هم پیوسته و سطح شروع به بریدن و پوسته پوسته شدن (Spall) می‌کند. سایش خستگی می‌تواند توسط (الف) کاهش تنش‌های تماسی؛ (ب) کاهش سیکل‌های حرارتی؛ و (ج) بهبود کیفیت مواد، از طریق تولید با حداقل ناخالصی، آخال و نقایص مختلف دیگر که ممکن است به عنوان محلی برای شروع ترک عمل کنند، کاهش یابد.

۴- دیگر انواع سایش



دو نوع دیگر سایش مهم هستند. **خوردگی فرسایشی (Fretting corrosion)** در اتصالاتی که تحت حرکات بسیار کوچکی قرار دارند، مانند دستگاه‌های ارتعاشی رخ می‌دهد. در اثر سایش فلز یا اکسید آن از سطح جدا می‌شود که اگر فلز باشد بعداً اکسید می‌شود. این اکسیدها به دلیل سخت بودن باعث سایش بیشتر می‌شوند.

سایش ضربه‌ای (Impact wear)، حذف عمودی مقادیر کوچک مواد از یک سطح توسط ضربه‌زدن ذرات است. سندبلاست کردن سطح نمونه‌ای از این نوع سایش است. فشار هوا مناسب جهت اجرای عملیات سندبلاست ۷ بار و یا ۱۰۵ psi است که به وسیله شلنگ فشارقوی، هوا به دیگ سندبلاست منتقل می‌شود.

