



بررسی شکست خستگی قطعات براده برداری شده با مقطع نازک

محمدرضا وزیری سرشک

استادیار، دانشکده مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران
m.vaziri@ut.ac.ir، ۱۴۳۹۵-۵۱۵، تهران، صندوق پستی

چکیده- مشاهدات آزمایشگاهی از مقاطع شکست، نحوه گسیختگی خستگی قطعات با مقطع نازک را متفاوت از قطعات ضخیم تر نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد با توجه به ابعاد کم مقطع، اثر تمرکز تنش ناشی از زبری و ناهمواری سطح ایجاد شده در مرحله تولید سطح، بسیار قابل توجه است و نسبت به سایر اثرات متالورژیکی سطح که در گسیختگی خستگی قطعات ضخیم تر می‌توانند عامل غالب باشند، برتر عمل می‌کند. در این طرح با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، ضمن ارزیابی عوامل شکست خستگی قطعات با مقاطع نازک، سعی می‌شود روابط پیشنهادی در کتاب‌های مرجع، برای اعمال پارامترهای فرایند تولید سطح در مورد این مقاطع اصلاح شود. به کمک این رابطه طراح کیفیت سطح مورد نیاز را برای سازنده مشخص می‌کند و سازنده باید پارامترهای فرایند تولید سطح را در جهت دستیابی به چنین کیفیتی انتخاب کند. ضرورت انجام این طرح زمانی مشخص می‌شود که خاطر نشان شود با توجه به فناوریهای جدید بکار رفته در ماشین‌های تراش، امکان انجام مرحله پرداخت کاری با هر شرایط برشی فراهم شده است؛ بنابراین باید طراح و سازنده نسبت به انتخاب شرایط برش معیاری را در اختیار داشته باشند.

کلیدواژگان: زبری سطح، استحکام خستگی، قطعات نازک، تولید با ماشین کاری.

The investigation of fatigue failure of machined thin walled structures

M.R. Vaziri Sereshk

Assis. Prof., College of Eng., School of Mech. Eng., Univ. of Tehran, Tehran, Iran,
P. O. B. 14395-515, Tehran, Iran. m.vaziri@ut.ac.ir

Abstract- Thin walled structures are among the main parts for several industrial machines. They usually expose variant stresses; therefore fatigue is their major failure mechanism. However experimental observations of the cross section of failed parts indicate that their fatigue fracture differs from what generally expected as high-cycle fatigue behavior. The mathematical estimations demonstrate that stress concentration due to surface roughness plays greater role compare to other surface metallurgical factors which may be predominant factor in the case of fatigue crack generation for thick walled structures. Generating several experimental data, an attempt is made in this study, to investigate fatigue failure of these particular parts. In addition the practical equation available in machine component design books is modified to implement the effect of manufacturing parameters properly. Application of developed equation makes it possible for designers to communicate with manufactures in a better way by proposing expected surface quality. The manufacturers are supposed to choose suitable fabricating parameters (particularly machining parameters) to achieve required quality. In addition this criterion may be inspected easily by quality control managers even via visual inspection.

Keywords: Surface Roughness, Fatigue Endurance, Thin Walled Structure, Machined Part.

۱- مقدمه

بررسی خستگی در مورد قطعاتی که در معرض تنش های سیکلی قرار می گیرند از اهمیت ویژه ای برخوردار است، خصوصاً در مواردی نظیر قطعات موتور هواپیما که ایمنی از مهمترین ملاحظات طراحی است. همچنین این عامل نقش اساسی در از کار افتادگی و گسیختگی اجزائی مانند قالب ها، چرخنده ها، بلبرینگ ها و شافت ها دارد؛ بنابراین اثر تعیین کننده ای در عمر و دوام و هزینه تولید خواهد داشت. پیشرفت های اخیر در ساخت آلیاژها و روش های عملیات حرارتی منجر به تولید مواد با استحکام ذاتی بالا و نسبت استحکام به وزن کم شده است. این مواد در جاهایی که سبکی اهمیت دارد بکار می روند تا ضخامت و ابعاد اجزا کمتر شده (قطعات نازک) که در نتیجه نسبت سطح به حجم در محصولات اخیر بیشتر شده و اهمیت نقایص سطحی بیشتر خودنمایی می کند. منظور از سطح، ساختار و وضعیت سطح و زیر سطح است. مکانیزم گسیختگی در خستگی، خزش، سایش و خوردگی تنشی به شدت به خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی سطح بستگی دارد که اساساً وابسته به روش ساخت است. اگر اضافه تنش در نظر گرفته نشده و یا عیوب قابل رؤیت (چه در ماده و چه ناشی از ساخت) عامل گسیختگی نباشد، مبدأ گسیختگی معمولاً ترک های کوچک سطح است که در زمان محدودی رشد کرده و به اندازه بحرانی خود همراه با گسیختگی ناگهانی می رسند. بنابراین سطح تولید شده در فرایندهای مختلف ساخت، توزیع اولیه ای از ترک های کوچک یا محل های مناسب برای ایجاد ترک دارد که با قرار گرفتن در محیط هایی با تنش های اتفاقی یا سیکلی (خستگی) یا محیط هایی با شرایط شیمیایی (خوردگی تنشی) و حرارتی (خزش) خاص این ترک گسترش یافته و گسیختگی را در پی خواهد داشت [۱].

کاسترو و فیلد [۲] استحکام خستگی پرچرخه را مهمترین خصوصیت مکانیکی قطعه دانستند که متأثر از ماشین کاری است به گونه ای که دوام واقعی به شرایط خاص برش بکار رفته و شدت فرایند براده برداری بستگی دارد. در مورد اثر تفکیکی پارامترهای ماشین کاری تحقیق جیلانی و موسیال [۳] بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ نشان می دهد که افزایش سرعت برش و زاویه براده ابزار بر عمر خستگی قطعه تراشیده شده می افزاید. جالب این است که افزایش زاویه براده ابزار منحنی تغییرات عمر با سرعت برش را بدون تغییر فقط در جهت افزایش

جایجا می کند. اما گرینفیلد و آلن [۴] متوجه شدند که حد خاصی برای زبری سطح فولاد سخت شده E19 تحت سنگزنی وجود دارد که با کاهش زبری سطح از این مقدار، دیگر بهتر شدن کیفیت سطح تأثیری در استحکام خستگی دور بالای قطعات ندارد.

آزمایش های کاستر [۵] نشان داد که اثر زبری سطح بر استحکام خستگی از ماده ای به ماده دیگر متفاوت است. تیلور و کلانسی [۶] بر مبنای مجموعه ای از آزمایش ها دریافتند که زبری سطح تأثیر قابل توجهی در عمر خستگی قطعات دارد به گونه ای که قطعه با سطح صاف تر، عمر خستگی خیلی بیشتری دارد. تحقیق ایشان نشان داد که زبری سطح نسبتاً کم قطعه کار که از سنگزنی ملایم به جا می ماند عمر خستگی را نسبت به نمونه های به خوبی پرداخت شده کمتر می کند. اما سطوح سنگ زده شده مقاومت به خستگی کمتری را نسبت به سطوح فرز کاری شده در شرایط زبری سطح مشابه نشان می دهند. در توضیح علت این پدیده به علامت های منحنی شکل ناشی از حرکت پیشروی به جا مانده در سطح فرز کاری شده اشاره می شود که نشانی از ترک ها در جهاتی عمود بر محور قطعه است. ایشان توصیه می کنند که پارامتر سطح R_z در توصیف عملکرد خستگی مناسب تر از R_a است زیرا بهتر بازتاب دهنده بدترین نقایص سطح خواهد بود.

ساساهارا [۷] اثر شرایط برش شامل شکل و شعاع نوک ابزار و پیشروی را بر زبری سطح، تنش پسماند و سختی سطح بررسی کرده و در نهایت نموداری برای عمر قطعات تراشیده شده از فولاد Ck45 بر حسب سختی سطح و تنش پسماند ارائه کرده است. در تحقیقی دیگر سمیکری و همکاران [۸] برای بررسی اثر فرایند براق کاری از تحقیقی بر اساس آزمایش استفاده کرده اند این فرایند کیفیت سطح و عمر خستگی قطعات را به کمک ایجاد تنش پسماند فشاری بهبود می دهد. ایشان در نهایت گستره هایی را برای تعیین عمر خستگی قطعات بر اساس سختی و زبری سطح پیشنهاد کرده اند. این فرایند از نظر نحوه تولید سطح با تحقیق حاضر متفاوت است. جاوید و همکاران [۹] تأثیر پیشروی و شعاع نوک ابزار را بر یک پارچگی سطح و عمر خستگی قطعات ماشین شده بررسی کرده اند. هدف این تحقیق مشخص کردن رابطه بین کیفیت سطح، شرایط ماشین کاری و رفتار خستگی در مورد آلیاژ فولاد 34CrNiMo6 بوده است. اما ایشان تأثیر این پارامترها را در

عمر مقایسه نکرده‌اند.

به عنوان یک تحقیق جامع، نوویک و همکاران [۱۰] به مرور پژوهش‌هایی پرداخته‌اند که در مورد محدوده وسیعی از جنس‌ها برای قطعه کار، اثر ماشین‌کاری (روش‌های سنتی و غیر سنتی) و زبری/ یکپارچگی سطح ماشین شده را بر عملکرد خستگی قطعه بررسی می‌کنند. ایشان مدعی هستند که در بررسی نتایج ارائه شده در تاریخچه برخی تناقضات در مورد رابطه زبری سطح قطعه کار با عمر خستگی دیده می‌شود. در بیشتر موارد ذکر شده زبری سطح کوچکتر به معنی عمر خستگی بیشتر است، اما برای محدوده زبری در محدوده $2/5$ تا $5 \mu m$ در مقایسه با زبری، عمر خستگی بیشتر به تنش پسماند و ریز ساختار سطح بستگی دارد. ایشان مدعی شده‌اند در غیاب تنش پسماند، زبری سطح ماشین شده بزرگتر به اندازه $400^\circ C$ تا $1/10$ تأثیر زیادی بر عمر خستگی دارد. دماهای بالاتر از $400^\circ C$ اثرات هر دو عامل تنش پسماند و زبری سطح را بر عمر خستگی کاهش می‌دهد که علت آن آزادسازی تنش و تغییر در وضعیت شروع ایجاد ترک از سطح به عمق ماده است. به طور معمول وجود ناخالصی‌های از نظر اندازه یک مرتبه بزرگتر از زبری سطح ماشین شده اثرات وضعیت هندسی سطح را بی‌تأثیر خواهد کرد.

در تحقیق حاضر به ماشین‌کاری قطعات ظریف (مقطع نازک) توجه شده است. در این گونه قطعات زبری سطح علاوه بر عامل ایجاد ترک، اثر محسوس‌تری را با ایجاد تمرکز تنش در این ابعاد کوچک ایفا می‌کند. در ادامه تمایز گسیختگی در این شرایط با شرایط معمول خستگی مورد توجه قرار می‌گیرد و سعی می‌شود رابطه‌ای ریاضی بین استحکام خستگی و شرایط سطح ارائه شود.

۲- طراحی و ساخت نمونه

با توجه به این که ماشین‌کاری مرحله نهایی تولید یا مرحله تولید سطح بسیاری از قطعات صنعتی است این فرایند به عنوان مبنای بررسی انتخاب شد. اما با توجه به فرم ریاضی رابطه نهایی که برای ضریب سطح ارائه خواهد شد امکان بکارگیری آن برای سایر فرایندها نیز در مورد قطعات ظریف برقرار می‌باشد. برای بررسی عوامل مؤثر در شکست قطعات نازک باید به تعداد کافی نمونه با این خصوصیت ابعادی

مشخص ولی با شرایط برش مختلف تراشیده شود و سپس عمر خستگی آنها به کمک انجام آزمایش استاندارد خستگی تعیین شود.

فولاد AISI 1045 (Ck45) که در ساخت قطعات ماشین آلات صنعتی مانند شافت‌ها کاربرد فراوان دارد در نظر گرفته می‌شود. اعمال شرایط مختلف برش بر روی نمونه استاندارد آزمایش خستگی با توجه به انحنای ویژه بخش میانی آن غیرممکن است و نمونه‌ای هم که تصویر آن در قسمت فوقانی شکل ۱ نشان داده شده است برای این تحقیق مناسب نیست، زیرا این نمونه‌ها در هنگام آزمایش در انتهای نزدیک سر درگیر یعنی محل ماکزیمم ممان خمشی دچار شکست می‌شوند که محل تغییر سطح مقطع و تمرکز تنش نیز می‌باشد. با توجه به عدم امکان اعمال شرایط برش مورد نظر در ایجاد شعاع راکورد، بررسی تأثیر شرایط مختلف برش به کمک این نمونه‌ها ممکن نمی‌باشد. در نتیجه شکل نمونه به صورت نشان داده شده نمونه پائینی در شکل ۱ اصلاح شد.

در این تحقیق سعی شده محدوده وسیعی از شرایط برش برای مرحله پرداخت کاری در تراش نمونه‌ها بکار گرفته شود تا نتایج حاصل از تحقیق عمومیت داشته باشد. قابل ذکر است که اگر چه در چند مرحله از مواد خام اولیه براده برداری می‌شود تا به هندسه مورد نظر دست یافت اما فقط کیفیت سطح به جا مانده از مرحله پرداخت کاری در استحکام خستگی مؤثر خواهد بود.

تعداد ۲۵ نمونه با شرایط برش مختلف در محدوده وسیع دور اسپیندل از $22/4$ تا 250 RPM و پیش‌روی از $0/05$ تا $2/24$ mm/rev تراشیده شد. ابزار بکار رفته در تهیه نمونه‌ها از جنس فولاد تندبر بوده و ماشین تراش بکار رفته TN40A بود. جدول ۱ شرایط مختلف برش و نتایج اندازه‌گیری زبری سطح و آزمایش خستگی را نشان می‌دهد. در این جدول دور اسپیندل به RPM و پیشروی به mm/rev و سرعت برش به m/sec و زبری سطح به μm و عمر خستگی به سیکل تنش است.



شکل ۱ نمونه قدیمی (بالا) و نمونه اصلاح شده (پایین)

۳- اندازه‌گیری زبری سطح

قبل از شکست نمونه‌ها، زبری سطح قسمت باریک نمونه‌ها به کمک زبری سنج مدل مارسورف ps1 ساخت شرکت ماهر اندازه‌گیری شد. برای استقرار مناسب نمونه‌ها برای ارزیابی وضعیت سطح تکیه‌گاه‌های مناسبی طراحی شد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۴- آزمایش تعیین عمر خستگی

با توجه به تغییر در هندسه نمونه، باید تغییری در فک‌های دستگاه تست خستگی که در شکل ۲ نشان داده شده اعمال کرد تا بتوان نمونه جدید را در دستگاه قرار داد. در ابتدا سعی شد با قرار دادن یک بوش برنجی واسط بین سر باریک نمونه و سطح داخلی فک دستگاه این اتصال را برقرار کرد که پس از اندکی چرخش بوش برنجی خورده شد و نمونه به صورت آزاد چرخید و آزمایش را از شرایط استاندارد خارج کرد. در ادامه راهکار استفاده از سه پیچ مستقر به صورت عمود بر محور امتحان شد ولی یکی از پیچ‌ها شکست و دو پیچ دیگر هم بدنه نمونه را سائیدند. در نهایت استفاده از یک بوش فولادی شیاردار (شیار طولی) آزمایش شد. دهانه شیار با سه پیچ پس از استقرار جمع شده و نمونه را محکم در اتصال قرار می‌داد. این راهکار مؤثر واقع شد و نمونه‌ها در شرایط کاملاً کنترل شده تا شکست خستگی دوران داده شد.

شکل ۳ بوش شیاردار بکار رفته را نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۵- تخمین عمر خستگی نمونه‌ها

تنش خمشی خستگی‌زای وارد بر نمونه کاملاً معکوس شونده و به بزرگی 307 MPa است. برای تعیین عملکرد خستگی از روابط مربوط به خستگی پرچرخه در مرجع [۱۱] استفاده می‌شود که رابطه استحکام خستگی و سیکل تنش (عمر) به صورت $S_f = 894N^{-0.0782}$ بدست می‌آید. از میان ضرایب مارین فقط ضریب سطح (در مورد ماشین‌کاری این نوع فولاد $K_a = 0.817$) است که در کاهش استحکام خستگی نمونه‌ها تأثیرگذار است. به این ترتیب عمر خستگی نمونه‌ها مقدار 65643 دور (سیکل تنش) تخمین زده می‌شود. نتایج آزمایش خستگی نشان می‌دهد که عمر نمونه‌ها در محدوده وسیعی متغیر است که نشان از اثر قابل توجه شرایط مختلف ماشین‌کاری در عمر قطعه ماشین شده است و همچنین مقادیر اندازه‌گیری‌شده به مقدار معنی‌داری (میانگین 29000 سیکل تنش) کمتر از مقدار تخمین زده شده با محاسبات مرجع [۱۱] است. علت این تفاوت را هم می‌توان به در نظر گرفته نشدن اثر شرایط مختلف برش در تدوین رابطه موجود دانست.

جدول ۱ شرایط برش و نتایج آزمایش‌ها برای نمونه‌های تراشیده شده

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
دور اسپیندل (RPM)	۲۲/۴	۲۲/۴	۲۲/۴	۲۲/۴	۲۲/۴	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵
پیشروی (mm/rev)	۰/۰۵	۰/۴۸	۱/۱۲	۱/۷۶	۲/۲۴	۰/۰۵	۰/۴۸	۱/۱۲	۱/۷۶	۲/۲۴	۰/۰۵	۰/۴۸	۱/۱۲
سرعت برش (m/sec)	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
$R_z (\mu\text{m})$	۱۳	۱۰۳/۱	۳۰/۸	۲۹/۸	۱۰/۸	۱۵/۲	۳۰/۴	۳۴/۸	۱۸/۸	۲۵/۳	۳۰/۹	۳۱/۷	۱۹/۵
$R_a (\mu\text{m})$	۲/۳	۲۸/۵	۶/۱	۵/۸	۱/۸	۲/۲	۵/۵	۷	۳/۳	۴/۲	۲/۲	۵/۳	۴/۲
عمر خستگی	۱۸۳۸۶	۳۹۱۲۰	۴۳۵۵۴	۵۲۴۳۷	۸۶۲۷۴	۴۳۴۴۶	۲۷۷۵۴	۲۲۰۹۲	۲۹۴۱۵	۳۴۶۰۶	۲۹۰۶۳	۲۳۳۶۸	۴۱۶۹۷
نمونه	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	
دور اسپیندل (RPM)	۱۲۵	۱۲۵	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	
پیشروی (mm/rev)	۱/۷۶	۲/۲۴	۰/۰۵	۰/۴۸	۱/۱۲	۱/۷۶	۲/۲۴	۰/۰۵	۰/۴۸	۱/۱۲	۱/۷۶	۲/۲۴	
سرعت برش (m/sec)	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۷۸۵	۰/۰۷۸۵	۰/۰۷۸۵	۰/۰۷۸۵	۰/۰۷۸۵	
$R_z (\mu\text{m})$	۲۶/۳	۲۶/۳	۱۶/۲	۴۲/۹	۴۲/۷	۳۵/۹	۲۹/۷	۱۹	۱۱۴	۳۶/۴	۳۸/۸	۳۳/۸	
$R_a (\mu\text{m})$	۴	۴/۸	۲/۳	۱۱	۸/۷	۷/۴	۶	۲/۹	۲۶/۱	۷/۱	۷/۷	۶/۶	
عمر خستگی	۲۴۳۳۲	۲۹۹۸۹	۳۲۸۸۹	۱۹۲۹۲	۲۰۹۴۹	۲۴۵۳۴	۱۲۳۱۸	۱۷۳۷۹	۱۹۲۱۰	۱۴۹۰۲	۱۱۰۶۵	۲۶۶۲۰	

ناحیه براق) را نشان می‌دهد. همان طور که از مقایسه عمر خستگی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها با عمر تخمین زده شده نتیجه شد، این شروع و رشد ترک سریع‌تر از آنچه بوده که برای خستگی قطعات ضخیم‌تر تخمین زده می‌شد، بنابراین شکست خستگی در قطعات باریک با قطعات ضخیم متفاوت است.

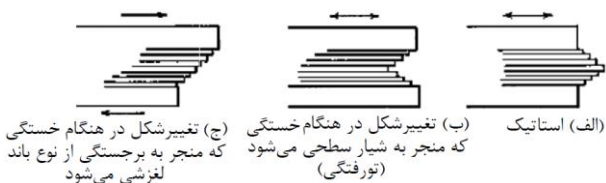
۷- اهمیت عمومی تمرکز تنش

مطابق توصیف وود [۱۲] ریز ترک‌ها در قطعه‌ای با زبری سطح ناچیز (مانند سطح پولیش شده) از باندهای لغزشی موجود (شکل ۵) و یا مرز دانه‌ها آغاز می‌شوند [۱۲-۱۴]؛ اما در مواردی که ریز شیارها به جا مانده از فرایندهای ماشین‌کاری (نظیر سنگزنی، تراشکاری و فرزکاری) قبلاً در سطح بوجود آمده باشد، تمرکز تنش ناشی از اعمال تنش بر قطعه میدان موضعی کرنش پلاستیک را در این محل‌ها ایجاد می‌کند.

اگر این ناحیه پلاستیک در یک دانه منفرد قرار گیرد باندهای لغزشی ایجاد می‌کنند که مسیر ترک‌های برشی خواهند بود [۱۳]. این پدیده اثر عمومی تمرکز تنش است که در مورد کلیه مقاطع با جداره‌های نازک و یا ضخیم صدق می‌کند.

۸- اثر قابل توجه تمرکز تنش در شکست مقاطع نازک

تفاوت اثر تمرکز تنش ناشی از زبری سطح می‌تواند دلیلی بر تفاوت شکست خستگی قطعات نازک با ضخیم باشد. ناهم‌واری زبری سطح در مقایسه با هندسه کوچک مقطع در قطعات باریک تأثیر قابل توجهی در تمرکز تنش دارد که به صورت افزایش تنش عمل کرده و می‌تواند باعث نشأت گرفتن ترک‌های ریز از محل‌های زبری باشد.



شکل ۵ توصیف وود برای ریز تغییرشکلی که منجر به ایجاد ترک خستگی می‌شود [۱۲]

به عنوان مثالی برای تخمین بزرگی اثر تمرکز تنش، زبری



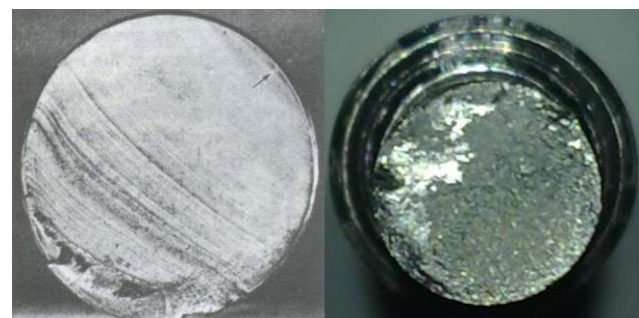
شکل ۲ دستگاه تست خستگی و فک‌های اتصال نمونه



شکل ۳ بوش شیاردار جهت نصب نمونه‌ها در فک‌های دستگاه

۶- بررسی مقطع شکست

برای بررسی تفاوت شکست برای این مقاطع باریک در مقایسه با شکست مقاطع ضخیم در خستگی، شکل مقطع شکست در نمونه‌ها مورد مشاهده قرار گرفت. در تمام موارد اثری از شکل مشابه پوسته صدف که نشان بارز خستگی پرچرخه است دیده نشد. شکل ۴ مقطع شکست یکی از نمونه‌ها را با مقطع استاندارد شکست خستگی مقایسه می‌کند.



شکل ۴ الف- مقطع شکست نمونه ب- مقطع استاندارد شکست خستگی

مشاهده مقطع شکست نمونه آزمایش در شکل ۴- الف به خوبی شروع و گسترش سریع ترک از محلی در سطح (در

سطح به بزرگی $50 \mu m$ در یک میله باریک به قطر $1 mm$ با بکارگیری نمودارهای تمرکز تنش مقدار ضریب تمرکز تنش $K_t \cong 2.2$ به جا خواهد گذاشت در حالی که همین زبری سطح در میله‌ای به قطر $10 mm$ هیچ تمرکز تنشی ($K_t \cong 1$) را در پی نخواهد داشت [۱۱]. همان طور که مشاهده می‌شود تأثیر زبری سطح برای مقاطع باریک بسیار قابل توجه است. همین میزان تأثیر باعث می‌شود که اثرات سایر پارامترهای متالورژیکی لایه سطحی که در یک پارچگی سطح تأثیرگذار هستند در مورد قطعات ظریف در مقابل بزرگی اثر زبری سطح قابل صرف نظر باشد. بنابراین ارائه رابطه‌ای که کاهش استحکام خستگی این گونه از قطعات را فقط به زبری سطح مرتبط می‌کند منطقی خواهد بود. در مورد تأثیر ناچیز پارامترهای متالورژیکی لایه سطحی در مورد قطعات ظریف می‌توان به نتایج آزمایش‌های مارین [۱۱] اشاره کرد که ضریب اندازه و شکل K_b را برای شافت‌های با قطر کمتر از $8 mm$ برابر ۱ در نظر می‌گیرد. این بدین معنی است که فرضیه شروع ترک در اثر تغییرات متالورژیکی ناشی از خستگی در لایه پر تنش سطحی در مورد این دسته از قطعات کاربردی ندارد که علت آن می‌تواند غلبه اثر زبری سطح است.

با توجه به اندازه زبری‌های سطح متداول برای سطوح ماشین شده و در نظر گرفتن نمودارهای تمرکز تنش [۱۱] می‌توان مقاطع ظریف (نازک) را میله‌های با مقطع گرد تا قطر $8 mm$ و سایر مقاطع جدار نازک با شکل دلخواه و تا ضخامت $7 mm$ تعریف کرد.

۹- پارامتر شاخص سطح

هر چند که عوامل مختلف با ماهیت‌های متفاوت می‌توانند بر عمر خستگی قطعات ماشین شده اثرگذار باشند، اما آزمایش‌های کاستر [۵] نشان داد که وقتی زبری سطح R_a بین $2/5$ تا $5 \mu m$ است، تنش پسماند در سطح شاخص بهتری برای عملکرد خستگی نسبت به هندسه سطح می‌باشد که این به این معناست که در محدوده متعارف زبری‌های سطح به جا مانده از ماشین کاری، نقش هندسه سطح بسیار قابل توجه است. اما مشکل این است که برای اینکه بتوان رابطه زبری سطح و استحکام خستگی قطعه ماشین شده را فرموله کرد، لازم است مناسب‌ترین پارامتر سطح از بین 57 پارامتر سطح (دوبعدی) معرفی شده در ایزو و استانداردهای کشور انگلستان [۱۵-۱۷]

و 17 پارامتر سه بعدی سطح [۱۸-۲۰] تعیین شود. در ادامه با هدف پاسخ به این سؤال که کدام پارامتر بهتر می‌تواند بیانگر (شاخص) وضعیت هندسه سطح باشد، تحقیقات انجام شده در این زمینه بررسی می‌شود.

تغییرات نسبتاً زیادی (به طور نمونه 20%) در نتایج تست‌های خستگی در گزارش‌های مختلف برای یک مقدار R_a ارائه شده است که سؤال‌هایی را در مورد مناسب بودن بکارگیری فقط همین پارامتر ایجاد می‌کند. تحقیقات جدیدتر نشان داده که بکار بردن پارامترهای مرتبط با اندازه ماکزیمم ناهمواری سطح بهتر معرف عملکرد خستگی قطعه خواهند بود. تلاش‌هایی در جهت تعیین پارامتر مناسب دیگری جهت توصیف رفتار خستگی صورت گرفته اما از بین این پارامترها R_a همچنان پرکاربردترین پارامتر است [۲۰]. در تحقیق بایومی و عبداللطیف [۲۱] برای تعیین رابطه پارامترهای مختلف سطح با استحکام خستگی در یک آلیاژ آلومینیوم، R_a و R_q نسبت به پارامترهای مرتبط با فاصله، به عنوان پارامترهای کنترل کننده استحکام تشخیص داده شدند.

علاوه بر ماکزیمم ارتفاع ناهمواری سطح R_t ، شکل شیارهای سطحی هم به عنوان عامل بحرانی تلقی می‌شود زیرا منجر به تمرکز تنش می‌شود [۲۲] که در شرایط خستگی منشا شروع ترک است. پارامترهای آماری، خصوصاً درجه اوج، R_{ku} که از ممان چهارم تابع توزیع ارتفاع [۱۵، ۱۹، ۲۳] بدست آمده متعاقباً به عنوان شاخص مناسب برای استحکام خستگی معرفی شده است. در تلاشی دیگر برای نسبت دادن پارامتر آماری مناسب برای زبری سطح ماشین شده متناسب با کاربرد، استوات [۲۴] پیشنهاد داده که R_a و درجه اوج نقش اصلی را کنترل عملکرد خستگی ایفا می‌کند.

در برخی موارد عملکرد سطح ماشین شده بر اساس تجربه و دانش یک شرکت تبیین می‌شود. به طور مثال بکارگیری پارامترهای زبری با روش "مبنای اصلی" که در برخی کمپانی‌ها مانند رنو صورت می‌گیرد. در این روش بیشینه عمق ناهمواری سطح (R_x) به عنوان پارامتر اصلی برای تعریف عملکرد خستگی استفاده می‌شود و میانگین عمق (R) و میانگین فاصله‌گذاری زبری (AR) به عنوان پارامترهای اصلی ثانویه مطابق تعریف ISO 12085:1998 در نظر گرفته شدند [۲۵].

سیبل و گایر [۲۶] دریافتند که بیشینه عمق ناهمواری‌های

۱۰- ارائه رابطه کاهش استحکام خستگی با زبری

سطح

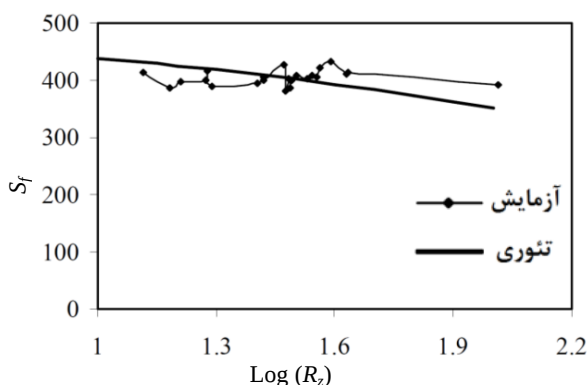
با توجه به اهمیت قابل توجه زبری سطح در عمر خستگی قطعات نازک، تلاش می‌شود رابطه‌ای ریاضی که این ارتباط را توصیف می‌کند، ارائه شود. نوویک و همکاران [۱۰] کاهش استحکام خستگی را متناسب با لگاریتم بزرگی زبری سطح (R_z) دانسته‌اند. بنابراین استحکام خستگی نمونه‌ها (MPa) به کمک رابطه بدست آمده بر مبنای عمر خستگی برای نمونه‌ها تعیین شد. در ادامه سعی شد بهترین نمودار ممکن بر داده‌های آزمایش تطبیق داده شود. شکل ۶ این تطبیق را نشان می‌دهد. رابطه ریاضی توصیف‌کننده منحنی تطبیق داده شده بعد با رابطه (۱) نشان داده خواهد شد.

$$K_R = \left(1 - \frac{(\log R_z)^2}{16.1} \right) \quad (1)$$

اما آزمایش‌های این تحقیق منحصر به فولاد (AISI Ck45 1045) است.

برای عمومیت بخشیدن به نتایج می‌توان اثر جنس را که قبلاً در مرجع [۱۱] با رابطه $K_a = a S_{ut}^b$ لحاظ شده بود با رابطه فوق ترکیب کرده به گونه‌ای که رابطه کلی (۲) برای احتساب اثر جنس و زبری سطح برای سطوح ایجاد شده با ماشین کاری ارائه شود.

$$K_a = 5.44 S_{ut}^{-0.265} \times \left(1 - \frac{(\log R_z)^2}{16.1} \right) \quad (2)$$

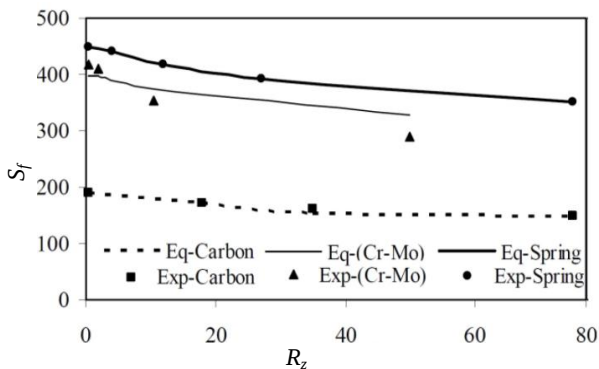


شکل ۶ انطباق منحنی بر داده‌های آزمایش

سطحی به جا مانده از ماشین کاری مهمترین عامل از منظر عملکرد خستگی خواهد بود. ایشان استحکام خستگی در شرایط وجود ماکزیمم عمق برای شیارهای سطحی (R_t) در برخی فولادها نظیر فولاد فنری تمپر شده، فولاد آلیاژی Cr-Mo، فولاد آنیل شده کربن متوسط و برخی فولادهای آلیاژی غیرمغناطیسی را مقایسه کرده‌اند. ایشان دریافتند که در عمق‌های بیشتر از یک عمق بحرانی مشخص برای شیارها (R_0) کاهش استحکام خستگی متناسب با $\log R_t$ خواهد بود. مقدار R_0 در مورد فولاد تمپر شده و برنج $1-2 \mu m$ ، برای فولادهای آنیل شده، آلیاژهای AL-Cu و AL-Mg برابر $4-6 \mu m$ خواهد بود. تیلور و کلانسی [۶] عملکرد خستگی فولاد تنش زدایی شده En19 (معادل با AISI 4140) را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که زبری سطح نسبتاً کم قطعه کار (R_a بین $0.1-1/4 \mu m$ و R_t بین $14-7 \mu m$) که از سنگزنی ملایم به جا می‌ماند استحکام خستگی (بر حسب MPa) را نسبت به نمونه‌های پولیش شده (R_a بین $0.1-0.3 \mu m$ و R_t بین $3-5 \mu m$) کمتر می‌کند (جدول ۲). اما سطوح سنگ زده شده مقاومت به خستگی کمتری را نسبت به سطوح فرزکاری شده در شرایط زبری سطح مشابه (R_a, R_t) نشان می‌دهند. در توضیح علت این پدیده به علامت منحنی شکل ناشی از حرکت پیشروی به جا مانده در سطح فرزکاری شده اشاره می‌شود که منجر به ایجاد سریع‌تر ترک‌ها در جهاتی عمود بر محور قطعه می‌شود. در نهایت ایشان توصیه می‌کنند که پارامترهای سطح R_z و R_t در توصیف عملکرد خستگی مناسب‌تر از R_a هستند، زیرا بهتر بازتاب دهنده بدترین نقایص سطح خواهند بود. با نگاه کلی به مواردی که ذکر شد به نظر پارامتر سطحی که بهتر بیانگر ارتفاع و عمق ناهمواری‌ها است بهترین شاخص خواهد بود. بنابراین R_z به عنوان پارامتر معیار برگزیده شد.

جدول ۲ اثر نوع پروسه و زبری بر استحکام خستگی [۶]

پارامتر سطح	$R_t (\mu m)$	$R_a (\mu m)$	استحکام خستگی
پولیش کاری	$0.1-0.3$	$3-5$	۷۷۵
سنگزنی	$0.5-1/4$	$7-14$	۶۹۰
فرزکاری (ظریف)	$1/0-2/2$	$11-15$	۷۷۵
فرزکاری (خشن)	$1/1-1/8$	$26-34$	۷۳۳
صفحه تراشی (ظریف)	$27-33$	$210-280$	۶۲۰
صفحه تراشی (خشن)	$35-44$	$360-390$	۵۲۰



شکل ۷ زبری سطح پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه گرفته شده

جدول ۳ افت استحکام خستگی با زبری سطح در فولاد Ck45

علامت استاندارد	محدوده R_z	افت استحکام
~	بالاتر از $100 \mu m$	٪۲۵
▽	۱۰۰-۲۵	٪۲۵-٪۱۲
▽▽	۲۵-۶/۳	٪۱۲-٪۴
▽▽▽	۶/۳-۱	کمتر از ٪۴
▽▽▽▽	کوچکتر از $1 \mu m$	بدون افت

۱۳- نتیجه‌گیری

بررسی مقطع شکست نشان می‌دهد که شکست قطعات نازک با توجه به تأثیر قابل توجه زبری سطح به عنوان عامل تمرکز تنش متفاوت از شکست خستگی قطعات ضخیم است. در مورد این دسته از قطعات بزرگی اثر این عامل در قیاس با اثرات تغییرات متالورژیکی در لایه سطحی در حدی است در تخمین استحکام خستگی می‌توان از این اثرات صرف‌نظر کرد. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نشان داد که کاهش زبری سطح و در حالت ایده‌آل پولیش کردن سطح قطعات باریک تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش عمر خستگی این گونه از قطعات دارد. اما کاهش زبری سطح به مقادیر کمتر از $5 \mu m$ تأثیر چندانی در بهبود عملکرد خستگی قطعه تراشیده شده نخواهد داشت. فرایندهای متداول ماشین‌کاری هم با انتخاب صحیح پارامترهای برش و هندسه ابزار در مرحله پرداخت‌کاری، قابل دستیابی است. به کمک رابطه ارائه شده در این تحقیق طراح یک قطعه مکانیکی که تحت بارهای خستگی قرار می‌گیرد می‌تواند میزان افت استحکام در زبری سطح‌های مختلف را محاسبه کند و با توجه به ضریب ایمنی لحاظ شده در طراحی محدوده مجاز زبری سطح را به سازنده توصیه کند. مسئول

۱۱- ارزیابی رابطه ارائه شده

نوویک و همکاران [۱۰] به کمک مجموعه‌ای از آزمایش‌ها کاهش استحکام خستگی نمونه‌هایی مشابه نمونه مورد استفاده در این تحقیق را از جنس‌های فولاد فنی، فولاد آلیاژی کروم-مولیبدن و فولاد کربن متوسط با زبری‌های سطح متفاوت تعیین کردند. برای ارزیابی رابطه ارائه شده استحکام خستگی این نمونه‌ها به کمک رابطه جدید تخمین زده شده و با نتایج آزمایش‌های ایشان مقایسه می‌شود. شکل ۷ نتایج پیش‌بینی شده را با مقادیر اندازه گرفته شده در آزمایش مقایسه می‌کند. در راهنمای شکل ۷ عبارت Eq به معنی "پیش‌بینی شده با رابطه (۲)" و عبارت Exp نمایانگر "مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش" است.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود رابطه ریاضی ارائه شده به خوبی رابطه بین کاهش استحکام خستگی با زبری سطح به جا مانده از ماشین‌کاری را برای فولادهای مختلف توصیف می‌کند.

۱۲- کاربرد رابطه ارائه شده

به کمک رابطه (۲) می‌توان تخمینی از افت استحکام قطعات نازک در محدوده علائم وضعیت سطوح مطابق استانداردهای دین ۳۱۴۱ و ایزو ۱۳۰۲ به مقادیر ارائه شده در جدول ۳ برای فولاد کربنی Ck45 ارائه کرد.

همان‌طور که از مقادیر ارائه شده در جدول ۳ دیده می‌شود بهبود کیفیت سطح می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش استحکام خستگی این دسته از قطعات داشته باشد، اما کاهش زبری سطح به مقادیر کمتر از $5 \mu m$ تأثیر چندانی در بهبود عملکرد خستگی قطعه تراشیده شده نخواهد داشت.

با احتساب اثر جنس که در رابطه جدید K_s لحاظ شده این افت استحکام در مورد فولادهای فنی و آلیاژی بیشتر از مقادیر فوق خواهد بود که این با نتایج آزمایش‌های نوویک و همکاران [۱۱] که در شکل ۷ ارائه شده همخوانی دارد.

طراح با توجه به محدوده مجاز زبری سطح مورد نظرش یکی از علائم استاندارد جدول ۳ را در نقشه ساخت آورده تا راهنمای سازنده باشد و همچنین مبنای ارزیابی کیفیت در کنترل کیفیت محصول توسط بازرس هم همین زبری سطح است که براحتی و حتی در برخی موارد به صورت بصری قابل تشخیص است.

- [11] Shigley J.E., Mischke C.R., Budynas R.G., *Mechanical Engineering Design*, 7th edition, McGraw-Hill, 2004.
- [12] Dieter G.E., *Mechanical Metallurgy*, SI Metric Edition, McGraw-Hill, London, 1988.
- [13] Suhr R.W., *High Cycle Fatigue*, The Institute of Metals, London, 1988, pp. 226-287.
- [14] Suresh S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [15] ISO 4287: *Geometrical Product Specification (GPS), Surface Texture: Profile Method, Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*, 2000.
- [16] BS 1134-1. *Assessment of Surface Texture. Part 1: Methods and Instrumentation*, 1988.
- [17] BS 1134-2. *Assessment of Surface Texture. Part 2: Guidance and General Information*, 1990.
- [18] Stout K.J., Blunt L., *Three Dimensional Surface Topography*, Penton Press, 2000.
- [19] Whitehouse D., *Surfaces and Their Measurement*, Hermes Penton Science, 2002.
- [20] Chiffre L.De., Leonardo P., Trumpold H., Lucca D.A., Brown G., Brown C.A., Raja J., Hansen H.N., "Quantitative Characterization of Surface Texture", *CIRP Annals*, Vol. 49, No. 2, 2000, pp. 635-652.
- [21] Bayomi M.R., Abd El-Latif A.K., "Effect of Surface Finish on Fatigue Strength", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 5, 1995, pp. 861-870.
- [22] Leverant G.R., Langer B.S., Yuen A., Hopkins S.W., "Surface Residual Stresses, Surface Topography and the Fatigue Behaviour of Ti6/4", *Metallurgical and Material Transactions*, Vol. A10, 1979, pp. 251-257.
- [23] *Surface Texture Analysis*, The Handbook, Hommelwerke GmbH, Muhlhausen, 1992.
- [24] Stout K.J., "How smooth is smooth-surface measurements and their relevance in manufacturing", *The Production Engineer*, 1980, pp. 17-22.
- [25] ISO 12085: *Geometrical Product Specification (GPS), Surface Texture: Profile Method, Motif Parameters*, 1996.
- [26] Siebel E., Gaier M., "Influence of Surface Roughness on the Fatigue Strength of Steels and Non-Ferrous Alloys", *Engineers Digest*, Vol. 18, 1957, pp. 109-112.

کنترل قطعه هم به راحتی و حتی در مواردی با بازرسی چشمی می‌تواند از کیفیت قطعه تولیدی اطمینان حاصل کند.

۱۴- مراجع

- [1] Elkhabeery M.M., Bailey A.B., "Surface Integrity in Machining Solution-Treated and Aged 2024-Aluminum Alloy, Using Natural and Controlled Contact Length Tools", *Transactions of the ASME*, Vol. 106, 1984, pp. 152-166.
- [2] Koster W.P., Field M., "Effects of Machining Variables on the Surface and Structural Integrity of Titanium", *Proceedings of the North American Manufacturing Research Conference-SME*, Vol. 2, 1973, pp. 67-87.
- [3] Jeelani S., Musial M., "Effect of Cutting Speed and Tool Rake Angle on the Fatigue Life of 2024-T351 Aluminium Alloy", *International Journal of Fatigue*, Vol. 6, No. 3, 1984, pp. 169-172.
- [4] Greenfield P., Allen D.H., "The Effect of Surface Finish on the High Cycle Fatigue Strength of Materials", *GEC Journal of Research*, Vol. 5, No. 3, 1987, pp. 129-140.
- [5] Koster W., "Effect of Residual Stress on Fatigue of Structural Alloys", *Proceedings of the Third International Conference-ASM International*, Indianapolis, Indiana, USA, 1991, pp. 1-9.
- [6] Taylor D., Clancy O.M., "Fatigue Performance of Machined Surfaces", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 14, No. 2-3, 1991, pp. 329-336.
- [7] Sasahara H., "The Effect on Fatigue Life of Residual Stress and Surface Hardness Resulting from Different Cutting Conditions of 0.45%C Steel", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, 2005, pp. 131-136.
- [8] Seemikeri C.Y., Brahmanekar P.K., Mahagaonkar S.B., "Investigations on Surface Integrity of AISI 1045 Using LPB Tool", *Tribology International*, Vol. 41, 2008, pp. 724-734.
- [9] Javidi A., Rieger U., Eichlseder W., "The Effect of Machining on the Surface Integrity and Fatigue Life", *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, 2008, pp. 2050-2055.
- [10] Novovic D., Dewes R.C., Aspinwall D.K., Voice W., Bowen P., "The Effect of Machined Topography and Integrity on Fatigue Life", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, 2004, pp. 125-134.