



مروری بر تشکیل لبه برجسته در فرآیند ماشینکاری موتورهای پیستونی درون سوز

عطا احمدآبادی^{۱*}، محمد فریدی^۲، امیر فرجی صبا^۳، رسول نوری^۴، محسن عبدی^۵، سیدعبدالرزاق طاهایی^۶

Ataalamdari1997@gmail.com

M.faridi@ikco.ir

A_farajisaba@ip-co.com

R_nouri@ip-co.com

M_abdi@ip-co.com

A_tahaei@ip-co.com

^۱ کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی خودرو دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ رئیس کل اداره طراحی فرآیند و صنعتی سازی مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو

^۳ رئیس اداره طراحی فرآیند ماشینکاری مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو

^۴ مدیر معاونت مهندسی محصول و فرآیند مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو

^۵ کارشناس تضمین کیفیت مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو

^۶ معاونت مهندسی و تضمین کیفیت مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو

چکیده

لبه برجسته به برآمدگی ایجاد شده در لبه سطوح بر اثر تنش های حاصل از فرآیند ماشینکاری گفته می شود. وجود لبه برجسته در سطوح ماشینکاری موتورهای درون سوز باعث ایجاد خروج از تolerانس و عارضه های احتراقی می شود. برای حذف این لبه های برجسته از فرآیند دیورینگ در خطوط ماشینکاری استفاده می شود که یکی از چالش های اصلی در فرایند دیورینگ، پیش بینی اندازه و شکل لبه برجسته ها برای اطمینان از پاک کردگی و درستی انجام فرایند دیورینگ است. این کار، کمک می کند تا بتوانید قبل از طراحی محصول اندازه لبه برجسته را به حداقل برسانید یا کنترل کنید. این مقاله عیوب لبه برجسته که در فرآیند ماشینکاری سیلندر و سرسیلندر خطوط ماشینکاری ایرانخودرو دیده شده است را مورد بررسی قرار داده است. همچنین در ادامه به بررسی برخی از تحقیقات انجام شده در چند سال گذشته در مورد این موضوع مهم می پردازد. این مقاله شامل بحثی در مورد لبه برجسته تشکیل شده در ماشین کاری معمولی (به خصوص در فرآیند سوراخکاری)، برنامه ریزی فرآیند برای به حداقل رساندن لبه برجسته ها و همچنین پیشنهاد راهکارهایی از ماشینکاری برای کاهش این چالش است.

کلیدواژه ها: لبه برجسته، ماشینکاری، سوراخکاری، فرزکاری



A review of the formation of Burr in the machining process of internal combustion piston engines

Ata Ahmadabadi ^{1*}, Mohammad Faridi², Amir Farajisaba³, Rasoul Nouri⁴, Mohsen Abdi⁵, Seyed Abdolrazagh Tahaei⁶

¹MSc, Automotive Engineering Department, Iran University of Science & Technology

⁴Process Engineering General Manager, Irankhodro Powertrain Company

³Machining Process Designer Department, Irankhodro Powertrain Company

⁴Engineering Director, Irankhodro Powertrain Company

⁵Quality Assurance Expert, Irankhodro Powertrain Company

⁶Member Of The Board – Engineering & Quality Deputy, Irankhodro Powertrain Company

Ataalamdari1997@gmail.com

M.faridi@ikco.ir

A_farajisaba@ip-co.com

R_nouri@ip-co.com

M_abdi@ip-co.com

A_tahaei@ip-co.com

Abstract

A burr is an unwanted protrusion on a workpiece edge created by machining-induced stresses. On internal combustion engine components, burrs lead to out-of-tolerance parts and combustion problems, necessitating a deburring process. A significant challenge is predicting burr geometry to ensure deburring accuracy and efficiency, which is crucial for controlling burr size during product design. This article investigates burr defects in the cylinder and cylinder head machining processes at Iran Khodro. It reviews relevant research from recent years, discussing burr formation in conventional machining (especially drilling), process planning for burr minimization, and potential machining solutions to address this issue.

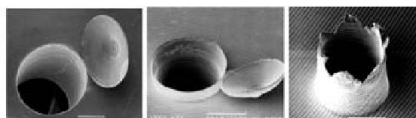
Keywords: "Burr", "Machining", "Drilling", "Milling".



مقدمه

تشکیل لبه برجسته تأثیرات نامطلوب متعددی بر دقت ابعادی و کیفیت قطعات تولیدی دارد. این پدیده منجر به خروج از تolerانس های تعیین شده، ایجاد چالش در فرآیندهای مونتاژ، جابجایی براده ها در مناطق حساس قطعه و آسیب های سطحی ناشی از تغییر شکل می گردد. لبه های برجسته ایجاد شده بر روی قطعات فلزی در نتیجه خروج ابزار از قطعه کار، از نظر شکل و ابعاد دارای تنوع قابل توجهی هستند که از لبه های کوچک و یکنواخت (مانند نوع تیغه ای) تا لبه های بزرگ با اشکال غیریکنواخت در مقیاس میلی متری را شامل می شود. مطالعات اخیر نشان داده که رابطه معناداری بین تشکیل لبه برجسته و آسیب دیدگی قطعات به خصوص در قطعات ماشینکاری سرسپندر و بلوک سندر خودرو وجود دارد. تنوع لبه های برجسته در فرآیندهای مختلف ماشینکاری از سوراخکاری تا سنگ زنی بسیار گسترده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، حتی در یک فرآیند خاص مانند سوراخکاری روی فولاد ضدزنگ نیز انواع مختلفی از لبه های برجسته قابل مشاهده است. هزینه های مرتبط با حذف لبه های برجسته بخش قابل توجهی از هزینه های تولید را تشکیل می دهد. این هزینه در تولید قطعات با دقت بالا مانند موتورهای هواپیما تا ۳۰٪ و در قطعات خودرو بین ۱۵ تا ۲۰٪ از کل هزینه تولید را شامل می شود. این موضوع اهمیت پرداختن به این مسئله در فرآیندهای تولید را نشان می دهد.

Classification



	TYPE I	TYPE II	TYPE III
Burr Shape	Uniform Burr	Uniform Burr	Crown Burr
Burr Height	~0.150 mm	~1.1 mm	(1.1~1.5)(d/2)

شکل ۳: انواع لبه برجسته تشکیل شده در فرایند سوراخکاری فولاد ضد

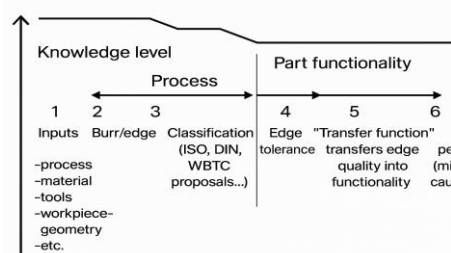
زنگ [2]

بهترین راهکار در فرآیند ماشینکاری، پیشگیری و کاهش تشکیل لبه برجسته است که مزایای متعددی از جمله کاهش آسیب های ناشی از براده ها و حذف هزینه های اضافی عملیات پاک سازی را به دنبال دارد. دستیابی به این هدف نیازمند رویکردی جامع است که کلیه مراحل تولید از طراحی تا برنامه ریزی فرآیند را در بر گیرد و ویژگی های قطعه، محدودیت های مواد، ابزارآلات و پارامترهای فرآیندی را به دقت مورد توجه قرار دهد.

پیش بینی تشکیل لبه برجسته مستلزم بررسی کامل ورودی های فرآیند شامل نوع فرآیند، جنس مواد، ابزار مورد استفاده و هندسه قطعه همراه با ملاحظات عملکردی و مونتاژی می باشد. ایجاد استانداردها و دسته بندی های مناسب امکان تعیین محدوده های مجاز و برقراری روابط بین کیفیت لبه و عملکرد قطعه را فراهم می آورد. راهبردهای جامع کنترل لبه برجسته بر پنج پایه اصلی استوار است:

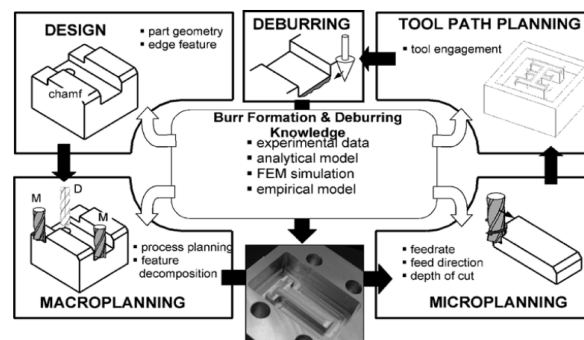
- استفاده از داده های تخصصی
- به کارگیری مدل های شبیه سازی

آسیب های ناشی از براده ها و لبه های برجسته در قطعات تولید شده در خطوط ماشینکاری موتورهای درون سوز، از چالش های پیچیده و پرهزینه ای است که صنعت خودروسازی با آن مواجه است [۱]. این پدیده موجب نیاز به عملیات اضافی ماشینکاری، دشواری در مونتاژ قطعات موتور، افزایش هزینه و زمان تولید، و در نهایت آسیب احتمالی به موتور می شود. در حال حاضر، در کشورهای توسعه یافته با انتخاب دقیق ابزارآلات، پارامترهای ماشینکاری، مسیر حرکت ابزار، جنس مواد و طراحی بهینه قطعات، سعی در پیشگیری یا کاهش تشکیل لبه های برجسته دارند. واقعیت این است که کنترل فرآیند ماشینکاری می تواند از تشکیل این لبه ها جلوگیری کرده یا آن را به حداقل برساند. اگرچه تحقیقات گسترده ای در زمینه مشکلات ناشی از تشکیل لبه های برجسته در فرآیندهای ماشینکاری انجام شده، اما تمرکز اصلی این مطالعات عمدتاً بر روی فرآیند سوراخکاری قطعات موتوری متمرکز بوده است. سطح دانش علمی در مورد مکانیزم تشکیل لبه های برجسته در حال حاضر در مرحله نسبتاً توسعه یافته ای قرار دارد (مراجعه شود به شکل ۱). هم اکنون استانداردها و مشخصات فنی متعددی توسط صنایع خودروسازی و سازندگان قطعات مکانیکی آلمان در حال توسعه است تا به طور ویژه به مسئله تشکیل لبه های برجسته در فرآیندهای ماشینکاری بپردازد [۱].



شکل ۱: سطح دانش کلی در تشکیل لبه برجسته

برای پیشگیری از تشکیل لبه برجسته، کل «زنجیره فرآیند» از طراحی تا ساخت باید در نظر گرفته شود، (شکل ۲). در اینجا ما اهمیت یکپارچه سازی تمام عناصر مؤثر بر لبه برجسته، از طراحی قطعه، از جمله جنس قطعات تا فرآیند ماشینکاری را مورد بررسی قرار دادیم.



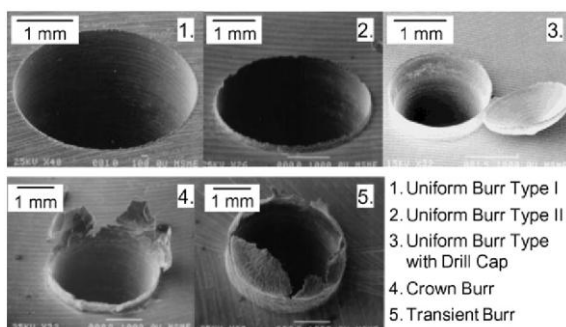
شکل ۲: ادغام پنج مرحله مورد نیاز برای به حداقل رساندن لبه برجسته

[2]



- اجرای راهبردهای کاهش لبه برجسته در سیستم‌های طراحی
- استفاده از روش‌های بازرسی و حسگرهای تشخیص
- توسعه استانداردهای اندازه‌گیری و توصیف لبه برجسته

می‌تواند به کاهش قابل توجه لبه برجسته منجر شود. بر اساس تحقیقات کیم [۵]، لبه برجسته‌های ناشی از سوراخکاری به انواع مختلفی از جمله لبه برجسته یکنواخت (کوچک و بزرگ)، تاجی شکل و گلبرگی دسته‌بندی می‌شوند. مطالعه موردی انجام شده در شرکت ایران خودرو (ایپکو) وجود این عیوب را در خط تولید ماشینکاری تأیید می‌کند (شکل ۶ و ۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود لبه برجسته در قطعاتی مانند سوراخ تغذیه روغن منجر به افزایش هزینه‌های تولید و نیاز به عملیات اضافی ماشینکاری شده است. این موضوع اهمیت کنترل و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند سوراخکاری را در صنعت خودروسازی نشان می‌دهد.



شکل ۵: انواع لبه برجسته‌های ایجاد شده در فرآیند سوراخکاری طبق [5]
CODEF



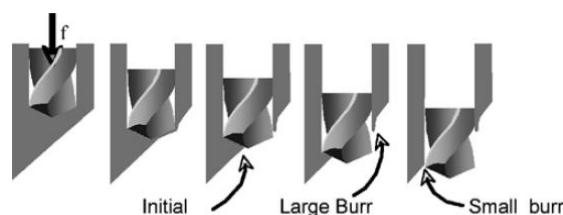
شکل ۶: نمونه لبه برجسته در خط تولید ماشینکاری سرسیلندر موتورسازی ایران خودرو (آنالیز توسط شرکت ایپکو)

مکانیزم تشکیل لبه برجسته در فرآیندهای مختلف متفاوت است. در سوراخکاری، سرعت پیشروی و هندسه مته عوامل تعیین‌کننده محسوب می‌شوند. مدل‌های عددی قادر به پیش‌بینی اثرات پارامترهای فرآیندی و هندسی بر ویژگی‌های لبه برجسته هستند. این روش‌ها به ویژه در مورد سوراخ‌های متقاطع و فرآیند فرزکاری کاربرد داشته، هرچند پیچیدگی ذاتی فرآیند فرزکاری چالش‌های خاصی ایجاد می‌کند. در سنگ‌زنی نیز هندسه سنگ و جنس ساینده از عوامل کلیدی در تشکیل لبه برجسته به شمار می‌روند.

فرزکاری

با توجه به نقش حیاتی فرآیند فرزکاری به ویژه فرز سطحی در تولید قطعات مهمی مانند موتورهای خودرو و اجزای گیربکس، تمرکز پژوهشی گسترده‌ای در طول سال‌های اخیر بر روی روش‌های پیشگیری و کاهش لبه برجسته صورت گرفته است. در این فرآیند، خروج ابزار از قطعه کار به عنوان عامل اصلی تشکیل لبه برجسته شناسایی شده و مطالعات نشان داده که بهینه‌سازی مسیر حرکت ابزار می‌تواند تا حد قابل توجهی از تشکیل لبه برجسته بکاهد (شکل ۴). مهم‌ترین معیارهای تنظیم مسیر ابزار برای دستیابی به این هدف عبارتند از:

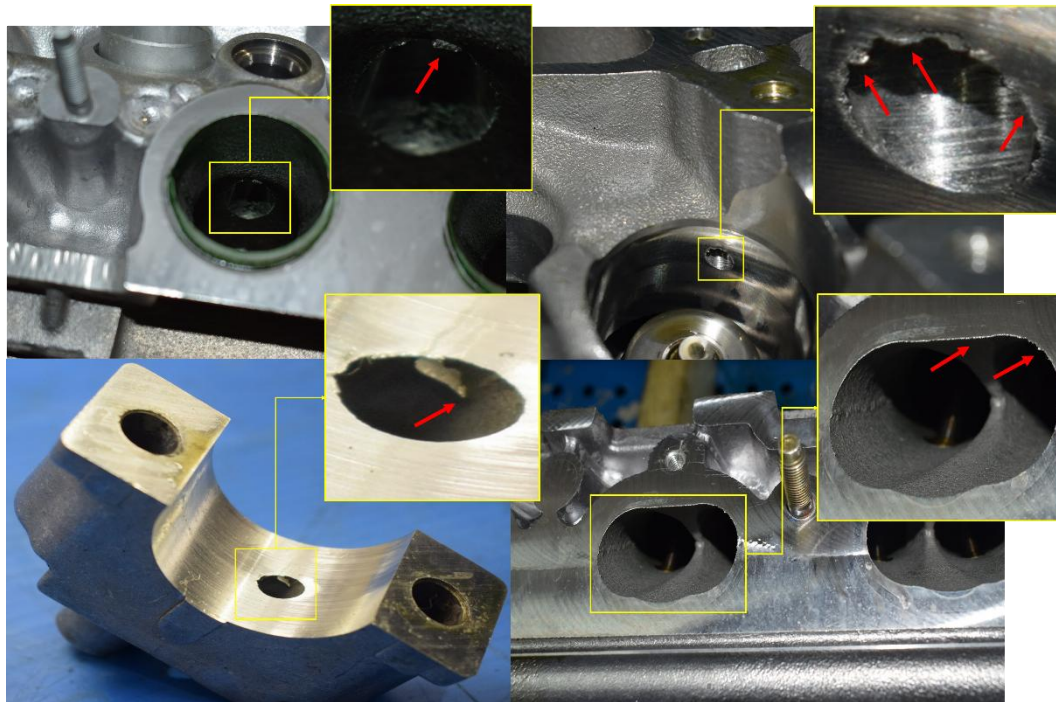
- پرهیز از خروج ابزار از لبه‌های قطعه کار
- کنترل ترتیب خروج ابزار (EOS) از طریق هندسه ابزار و اصلاح مسیر حرکت
- حفظ یکنواختی براده‌های تولیدی در طول فرآیند
- اجتناب از مسیرهای برش طولانی و تماس ابزار با قطعه کار



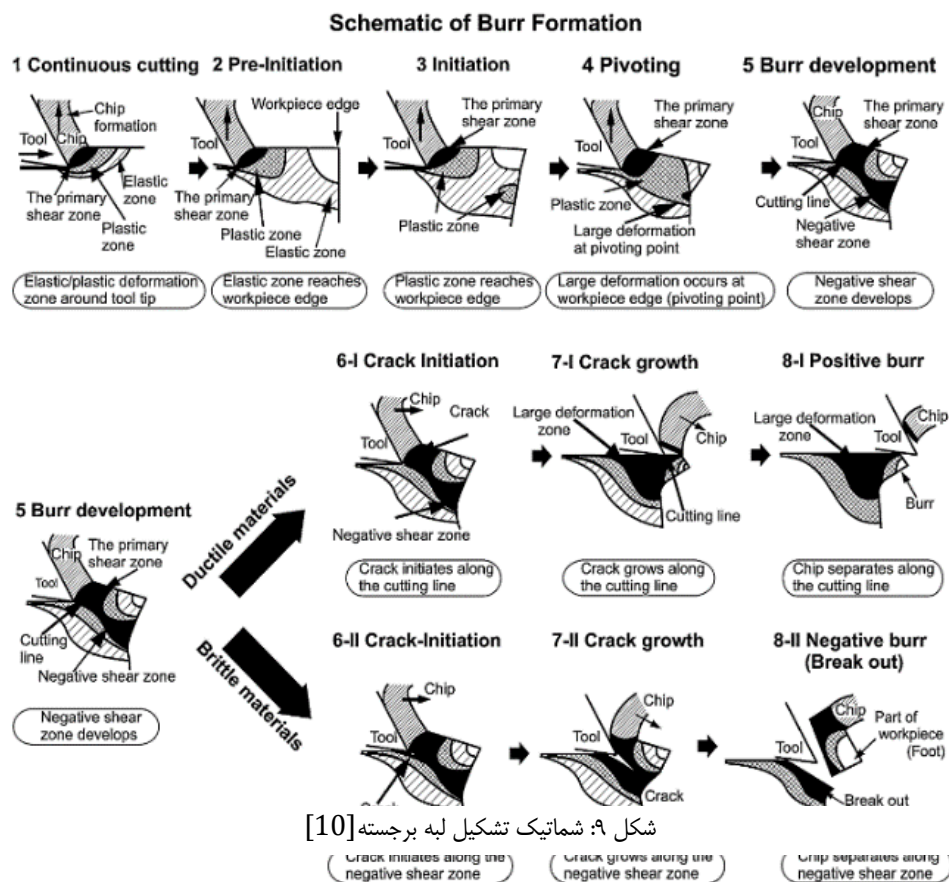
شکل ۴: شماتیک تشکیل لبه برجسته در سوراخ‌های متقاطع [۳]

سوراخکاری

تشکیل لبه برجسته در فرآیند سوراخکاری عمدتاً تحت تأثیر هندسه ابزار و جهت گیری آن نسبت به سطح قطعه کار قرار دارد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این پدیده زمانی رخ می‌دهد که مته برای اولین بار با سطح خروجی تماس پیدا می‌کند. در سوراخ‌های متقاطع، زاویه تقاطع تأثیر قابل توجهی بر محل و اندازه لبه برجسته دارد. مطالعات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هندسه ابزار و شرایط فرآیند



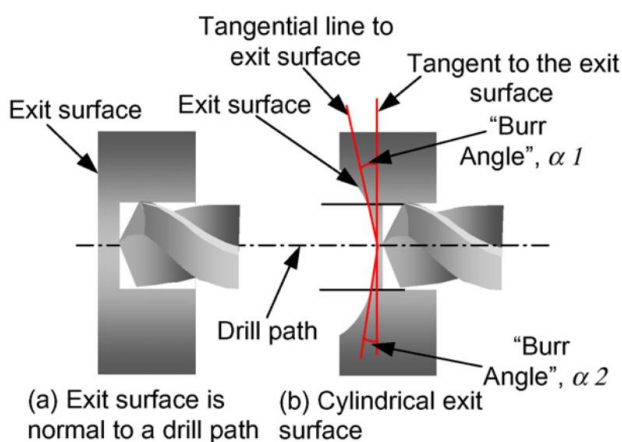
شکل ۷: مشاهده لبه برجسته در خط تولید ماشینکاری موتور شرکت ایران خودرو (آنالیز توسط شرکت اپیکو)





طبقه‌بندی هشت مرحله‌ای ارائه شده توسط ایشان نشان می‌دهد که فرآیند تشکیل لبه برجسته برای مواد شکل‌پذیر و شکننده باید به صورت جداگانه در نظر گرفته شود. در فرآیند سوراخکاری، تحقیقات استین [۱۱] نشان می‌دهد که نسبت بین ارتفاع لبه برجسته و ضخامت براده تغییر شکل نیافته می‌تواند تحت تأثیر ویژگی‌های هندسی ابزار قرار گیرد. بر اساس این مدل، لبه برجسته در مناطقی تشکیل می‌شود که ابزار به جای عملیات خشن کاری، عمل برش را انجام می‌دهد. یک زاویه تعامل به عنوان پارامتر کلیدی پیشنهاد شده که برهمکنش بین لبه برش و سطح خروجی را تعریف می‌کند. این زاویه با در نظر گرفتن حرکت دینامیکی لبه برش ناشی از پارامترهای فرآیندی مانند نرخ پیشروی و سرعت محاسبه می‌شود. وقتی زاویه تعامل مثبت باشد، لبه برش از قطعه کار خارج می‌شود و بالعکس. این مدل قادر به پیش‌بینی ناحیه احتمالی تشکیل لبه برجسته بر اساس مقادیر مثبت زاویه تعامل است. با افزایش نرخ پیشروی و کاهش سرعت، زاویه سطح خروجی کاهش یافته و مساحت ناحیه تشکیل لبه برجسته افزایش می‌یابد. از آنجا که تغییر شکل پلاستیک در پایان فرآیند برش، هندسه سطح خروجی را تغییر می‌دهد، زاویه موثر سطح خروجی نیز بسته به موقعیت زاویه‌ای تغییر می‌کند. یک زاویه سطح خروجی منفی باعث شروع زود هنگام مکانیسم خمشی مواد و تشکیل لبه برجسته بزرگتر می‌شود. بنابراین قطعات کار نازک‌تر تمایل به تشکیل لبه‌های برجسته بزرگتری دارند. زاویه تعامل ناحیه احتمالی تشکیل لبه برجسته را پیش‌بینی می‌کند، در حالی که زاویه موثر سطح خروجی اندازه نهایی آن را تعیین می‌کند.

لایتز [۱۲] نیز با توسعه مدل‌های سینماتیکی، شرایط خروج و ورود ابزار و همچنین محاسبه براده باقیمانده در حین تشکیل لبه‌های برجسته متقاطع در سوراخکاری را توصیف کرده است. ترکیب این مدل‌های تئوری با نتایج تجربی، بینش دقیقی از موقعیت و هندسه لبه برجسته با توجه به پارامترهای هندسی فراهم می‌آورد.

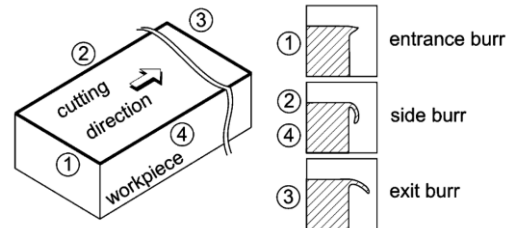


شکل ۹: تشکیل لبه برجسته هنگام فرآیند سوراخکاری سوراخ‌های متقاطع طبق Min [13]

تجزیه و تحلیل FEM و شبیه‌سازی تشکیل لبه برجسته

لبه برجسته‌های تولید شده توسط سنگ زنی سطحی در لبه‌های قطعه کار قرار دارند و می‌توانند به لبه‌برجسته‌های ورودی، لبه برجسته‌های جانبی و لبه‌برجسته‌های خروجی طبقه‌بندی شوند (شکل ۷ مشاهده شود). این لبه‌برجسته‌ها می‌توانند تا حد زیادی از نظر اندازه و شکل متفاوت باشند و از طریق مکانیسم‌های شکل‌گیری مختلف ایجاد شوند. در سنگ زنی سطح مسطح، لبه برجسته خروجی غالب‌ترین نوع لبه برجسته است و بنابراین به دقت مورد بررسی قرار گرفته است.

burr shapes on the workpiece in surface grinding



شکل ۸: شکل‌های لبه‌برجسته بر روی قطعه کار در فرآیند سنگ زنی سطحی [6]

مکانیسم تشکیل لبه برجسته

پژوهش‌های متعددی به مدلسازی تشکیل لبه برجسته در فرآیندهای ماشینکاری پرداخته‌اند. مطالعات پایه‌ای پکله‌ارینگ و گیلسپی توسط محققانی نظیر اشافر [۷]، بیبر [۸] و تیلو [۹] توسعه یافته است. یافته‌های این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در صورت خروج ماده از فرآیند برش، به ویژه در لحظات ورود و خروج ابزار، تشکیل لبه برجسته اجتناب‌ناپذیر است. دو نتیجه کلیدی از این مطالعات حاصل شده است: اولاً مواد با انعطاف‌پذیری بیشتر تمایل به تشکیل لبه‌های برجسته بزرگتر و بیشتر دارند و ثانیاً محدودیت تغییر شکل ماده در جهت اعمال نیرو به دلیل هندسه قطعه کار یا شرایط ماشینکاری، تشکیل لبه برجسته را کاهش می‌دهد. مدل بیبر [۸] تشریح می‌کند که چگونه نفوذ یک جسم برنده به قطعه کار منجر به تشکیل یک مخروط فشاری سه‌بعدی می‌شود. در صورت تجاوز از حد تغییر شکل الاستیک، تغییر شکل‌های پلاستیکی پایدار در تمام جهات و حتی در ناحیه لبه برش رخ می‌دهد. این تغییر شکل‌ها در جهت کمترین مقاومت ماده صورت گرفته و در نهایت به تشکیل ماده‌ای پایدار در سطح قطعه کار منجر می‌شود که خارج از ناحیه تماس ابزار قرار دارد. گیلسپی و همکارانش [۴] شش مکانیسم فیزیکی متمایز برای تشکیل لبه برجسته شناسایی کرده‌اند: (۱) جریان براده (۲) خمش براده (۳) جدایش براده (۴) رسوب مجدد براده (۵) عدم براده‌برداری کامل (۶) تشکیل در نواحی ترک‌دار. سه مکانیسم اول مرتبط با تغییر شکل پلاستیک ماده هستند، در حالی که مکانیسم‌های دیگر به فرآیندهای ثانویه مربوط می‌شوند. هاشیمورا [۱۰] با توسعه این مطالعات نشان داد که مکانیسم تشکیل لبه برجسته نه تنها تحت تأثیر شرایط برش و هندسه ابزار، بلکه توسط خواص مکانیکی قطعه کار نیز تعیین می‌شود.



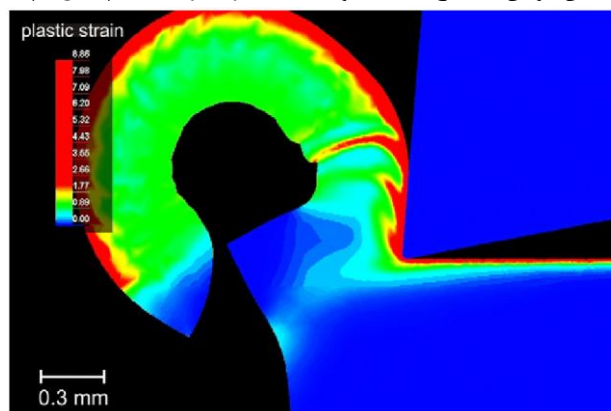
(شکل ۱۱). این مدل نیروهای برشی در فرآیند سوراخکاری و همچنین رابطه بین نیروی ماشینکاری وارد شده و اندازه لبه برجسته را توضیح می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وضعیت برشی در نزدیک لبه سوراخ و تشکیل ترک، مکانیسم‌های اولیه در تشکیل لبه برجسته در فرآیند سوراخکاری هستند.

Burr formation mechanism	Proposed burr formation mechanism	FEM simulation	High-speed camera image
(a) Steady-state			
(b) Initiation			
(c) Development			
(d) Initial fracture			
(e) Final burr			

شکل ۱۱: شبیه‌سازی FEM تشکیل لبه برجسته در سوراخکاری. [20,21]

مطابق یافته‌های مرکز تحقیقات که در شکل ۱۳، ۱۲، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، در شرایطی که سرعت برش معادل ۴۱ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ پیشروی ۰۶۶ میلی‌متر بر دور باشد، لبه برجسته‌ای به ارتفاع ۰۲۳ میلی‌متر تشکیل می‌شود که با نتایج تجربی ارائه شده در شکل ۶ مطابقت دارد. بر اساس بررسی‌های انجام شده، این میزان ارتفاع لبه برجسته مطلوب تشخیص داده نشده است. گزارش مرکز تحقیقات حاکی از آن است که شباهت بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی بیش از ۹۵ درصد بوده است (گزارش شماره ۱۴۰۳۱۷۶۸۱۱۲). در ادامه تحقیقات شرکت اپیکو با همان سرعت برش، نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که کاهش نرخ پیشروی از ۰۲۳ به ۰۱۵ میلی‌متر بر دور منجر به کاهش محسوس لبه برجسته شده است. این کاهش همچنین باعث کاهش نیروهای ماشینکاری گردیده که به نوبه خود موجب کاهش بیشتر لبه برجسته در این فرآیند شده است (گزارش شماره ۱۴۰۳۱۷۶۸۱۱۲). بر اساس مطالعات بیشتر که در شکل ۱۵ نمایش داده شده، مشخص گردید که با کاهش نیروهای ماشینکاری می‌توان لبه برجسته را کاهش داد. شرایط بهینه برای دستیابی به کمترین میزان لبه

تحلیل به کمک روش اجزای محدود، به‌عنوان راهکاری کارآمد برای درک و پیش‌بینی مکانیزم تشکیل لبه برجسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. وضعیت کنونی پژوهش و روندهای آینده در زمینه شبیه‌سازی و مدل‌سازی تشکیل لبه برجسته در منبع [14] به طور مفصل بررسی شده است. هاشیمورا [10] یک مدل پایه‌ای از تشکیل لبه برجسته ارائه کرده که تأثیر ویژگی‌های ماده در برش مستقیم را در نظر می‌گیرد. صحنه‌گذاری شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های تجربی و به کارگیری یک مدل کشسان-پلاستیک تحت شرایط کرنش ساده انجام شده است. پنج مرحله اول تشکیل لبه برجسته که توسط هاشیمورا معرفی شده، با این روش تأیید گردیده است. همچنین تفاوت رفتار مواد ترد در مقایسه با مواد شکل‌پذیر به‌ویژه از نظر رشد ترک قابل مشاهده است. پارک [15] و لئوپولد [16] موفق شده‌اند پدیده تشکیل لبه برجسته در برش مستقیم را به خوبی مدل‌سازی کنند. این مدل به بررسی فرآیند تشکیل لبه برجسته و همچنین پارگی لبه در فولاد ضدزنگ AISI304L می‌پردازد. بر پایه این مدل تحلیلی، پارک [17] تأثیر زوایای خروجی قطعه کار و زوایای تیغه ابزار را بر فرآیندهای تشکیل لبه برجسته در برش مستقیم بررسی کرده است. کلارک و همکاران [18] به بررسی تشکیل لبه برجسته در برش مستقیم فولاد کربنی AISI1045 با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی پرداخته‌اند. این مدل که بر پایه روش ضمنی-لاگرانژی توسعه یافته، نشان می‌دهد که تحلیل به روش اجزای محدود می‌تواند به نتایج مطلوب و اطلاعات دقیقی از چگونگی توزیع تنش، کرنش، نرخ کرنش و دما دست یابد. با این حال، برخی از نتایج شبیه‌سازی با یافته‌های تجربی مطابقت کامل ندارد که این امر ناشی از تفاوت در شکل براده تولیدشده در مدل و شرایط واقعی است. در نهایت، تشکیل لبه برجسته در جهت پیشروی در حین دوران در منبع [19] مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱۰).

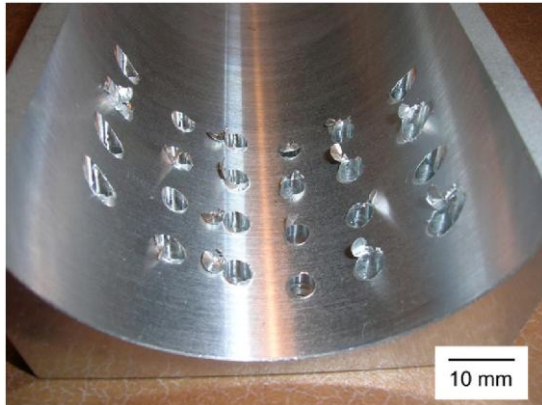


شکل ۱۰: شبیه‌سازی FEM تشکیل لبه برجسته در برش متعامد [19]

در ادامه تحقیقات، تحقیقات متعددی به منظور شبیه‌سازی لبه برجسته‌های ایجاد شده در فرآیند سوراخکاری انجام شده است. یک مدل المان محدود سه بعدی توسط گئو [20,21] برای بررسی مکانیسم‌های تشکیل لبه برجسته در فرآیند سوراخکاری توسعه داده شده است

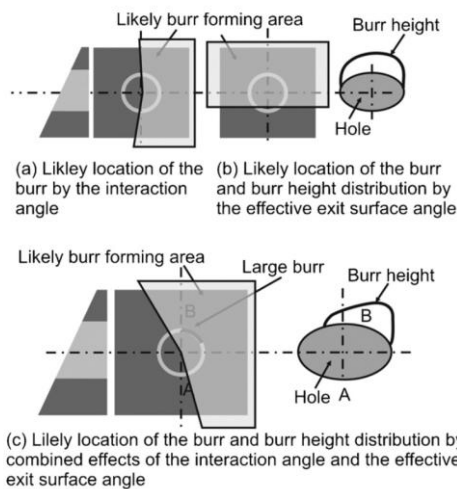


مطالعات نشان می‌دهد که در سوراخ‌های متقاطع، تشکیل لبه برجسته به شدت به موقعیت زاویه‌ای وابسته است. زوایای خروجی بزرگ‌تر معمولاً منجر به تشکیل لبه‌های برجسته کوچک‌تر می‌شوند. همچنین، زاویه سطح خروجی (انحراف از حالت عمود) تأثیر قابل توجهی دارد [۲۲]. بر اساس تحقیقات، عمود بودن سطح خروجی نسبت به سطح قطعه کار موجب کاهش چشمگیر تشکیل لبه برجسته می‌شود [۲۳].



شکل ۱۶: اشکال مختلف لبه برجسته در فرایند سوراخکاری بر روی سطوح منحنی [22]

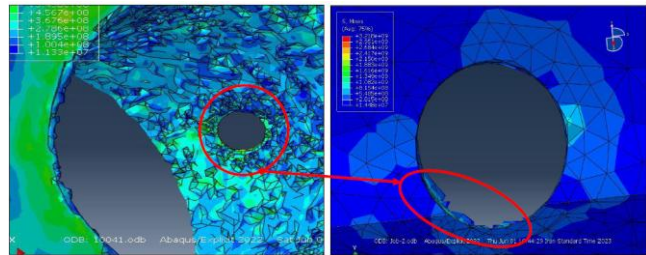
زاویه تعامل محل تشکیل لبه برجسته را مشخص می‌کند اما زاویه تغییر شکل سطح خروجی را در نظر نمی‌گیرد. با در نظر گرفتن هر دو، منطقه احتمالی تشکیل لبه برجسته تقریباً در نیمه راست سوراخ با تغییر جزئی توسط تغذیه و زاویه سطح خروجی است (شکل a ۱۷). زاویه سطح خروجی موثر میزان تغییر شکل پلاستیک و بنابراین توزیع اندازه سوراخ را توصیف می‌کند (شکل b ۱۷). با ترکیب این دو عامل، منطقه احتمالی تشکیل لبه برجسته را می‌توان مانند شکل C ۳۸ نشان داد. با استفاده از این ایده، ممکن است بتوان حرکت تغذیه مته را تغییر داد تا ناحیه احتمالی تشکیل لبه برجسته را کاهش داد. [24]



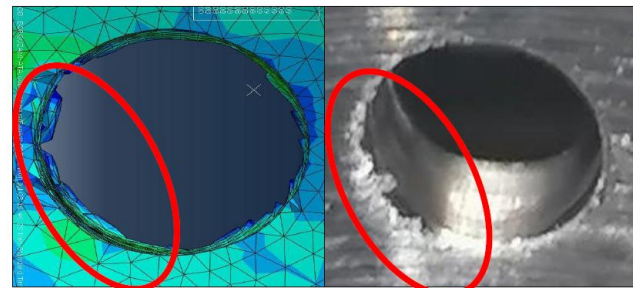
شکل ۱۷: منطقه احتمالی ایجاد لبه برجسته [24]

جمع بندی و نتیجه گیری

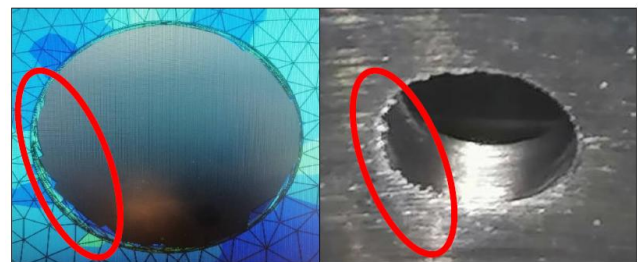
برجسته در سرعت برش ۱۳.۹ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ پیشروی ۰.۱۵ میلی‌متر بر دور حاصل می‌شود.



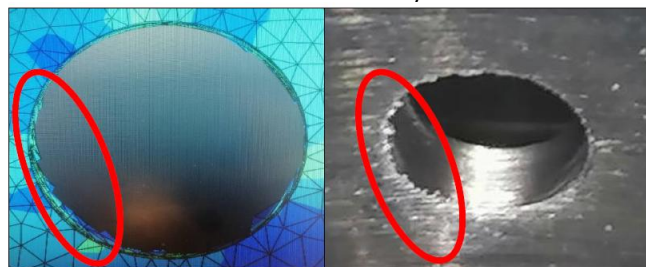
شکل ۱۲: شبیه سازی نمونه لبه برجسته در خط تولید ماشینکاری توسط مرکز تحقیقات شرکت ایپکو



شکل ۱۳: شبیه سازی FEM تشکیل لبه برجسته در سوراخکاری استکانی
Feed = 0.23mm/rev



شکل ۱۴: شبیه سازی FEM تشکیل لبه برجسته در سوراخکاری استکانی
Feed = 0.15mm/rev



شکل ۱۵: نمونه لبه برجسته دیده شده در خط تولید ماشینکاری توسط مرکز تحقیقات شرکت ایپکو

به حداقل رساندن لبه برجسته در فرایند سوراخکاری

تشکیل لبه برجسته در فرایند سوراخکاری عمدتاً به هندسه ابزار و جهت آن نسبت به سطح کار بستگی دارد (شکل ۱۶). با توجه به تغییر زاویه خروجی مته در طول محیط سوراخ، میزان تشکیل لبه برجسته نیز متغیر خواهد بود. بهینه‌سازی هندسه تقاطع و طراحی ابزار می‌تواند به طور مؤثری شرایط تشکیل لبه برجسته را به حداقل برساند.



این زمینه‌های تحقیقاتی می‌توانند تأثیر سریع و قابل توجهی در بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌های تولید در صنایع مختلف داشته باشند.

مراجع و منابع

- [1] Berger, K., "An overview of status and trends in the automotive industry," Proc. 7th Int'l Conference on Burr Formation and Surface Finishing, University of California, Berkeley, June, 2004.
- [2] Dornfeld, D., and Lee, D., Precision Manufacturing, 2008, Springer, New York, p. 649.
- [3] Dornfeld, D., & Min, S. (2010). A Review of Burr Formation in Machining. *UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability*. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/412734>
- [4] Gillespie LK (1999) Deburring and Edge Finishing Handbook. Society of Manufacturing Engineers
- [5] Kim J, Min S, Dornfeld D (2001) Optimization and Control of Drilling Burr Formation of AISI 304L and AISI 4118 Based on Drilling Burr Control Charts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41(7):923-936.
- [6] Barth C, Dollmeier R, Warnecke G (2001) Burr Formation in Grinding of Hardened Steel with Conventional and Superabrasive Wheels. *Technical Papers of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, MR01- 270, 1-6.
- [7] Schafer F (1975) Entgraten, Krausskopfverlag, Mainz.
- [8] Beier HM (1999) Handbuch Entgratetechnik: Wegweiser zur Gratminimierung und Gratbeseitigung für Konstruktion und Fertigung. Hanser Verlag
- [9] Thilow A, Berger K, Pru Iler H, Maier R, Przyklenk K, Schafer F, Pießlinger- Schweiger S (2005) Entgrat-Technik. Entwicklungsstand und Problemlösungen expert Verlag.
- [10] Hashimura M, Hassamontr J, Dornfeld DA (1999) Effect of In-plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation. *Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 121(1):13-19.
- [11] Stein J, Dornfeld DA (1997) Burr Formation in Drilling Miniature Holes. *CIRP Annals* 46:63-66.
- [12] Leitz L, Franke V, Aurich J (2009) Burr Formation in Drilling Intersecting Holes. *Proceedings of the CIRP Sponsored International Conference on Burrs: Analysis, Control & Removal*, Kaiserslautern, Germany, 99-105.
- [13] Min S (2001) Modeling of Drilling Burr Formation and Development of Expert System, PhD Thesis, University of California, Berkeley
- [14] Leopold J, Schmidt G, Hoyer K, Freitag A (2005) Modeling and Simulation of Burr Formation—State-of-the-Art and Future Trends. *Proceedings of the 8th International Workshop on Modeling of Machining Operations* 73-83.

با افزایش روزافزون استانداردهای کیفیت و عملکرد در صنایع تولیدی، به ویژه صنعت خودروسازی، وضعیت لبه برجسته قطعات پس از ماشینکاری به موضوعی حیاتی تبدیل شده است. حتی کوچکترین لبه‌های برجسته اغلب غیرقابل قبول هستند و این مسئله منجر به انجام عملیات پرهزینه تمیزکاری و پرداخت می‌شود که سهم قابل توجهی در هزینه‌های تولید دارد. در این پژوهش، پدیده تشکیل لبه برجسته در فرآیندهای ماشینکاری قطعات موتورهای احتراق داخلی بررسی شد. نتایج نشان داد لبه برجسته یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت سطح، افزایش هزینه‌های تولید و بروز مشکلات عملکردی در قطعات موتوری است. بررسی خطوط تولید شرکت ایپکو نیز تأیید کرد که این پدیده موجب افزایش عملیات اصلاحی و کاهش بهره‌وری می‌شود.

تحلیل‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی (FEM) نشان دادند که پارامترهای فرآیند مانند سرعت برش، نرخ پیشروی و هندسه ابزار بیشترین تأثیر را بر اندازه و شکل لبه برجسته دارند. کاهش نرخ پیشروی و انتخاب مناسب زاویه ابزار می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تشکیل لبه برجسته را کاهش دهد. مدل‌های عددی نیز توانستند این پدیده را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند.

در نهایت، کنترل و کاهش لبه برجسته تنها با رویکردی یکپارچه از مرحله طراحی تا اجرای فرآیند ممکن است. استفاده از مدل‌سازی عددی، داده‌های تجربی و استانداردهای کیفی می‌تواند به بهینه‌سازی شرایط ماشینکاری و تولید قطعات باکیفیت‌تر کمک کند. رویکردهای فعلی بر استفاده از سیستم‌های طراحی به کمک رایانه (CAD)، برنامه‌ریزی فرآیند به کمک رایانه (CAPP) و توسعه ابزارهای تخصصی متمرکز شده‌اند. یافته کلیدی تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که کنترل فعال فرآیند تشکیل لبه برجسته در حین ماشینکاری، بسیار کارآمدتر از حذف آن پس از تشکیل است.

جهت‌های تحقیقاتی آینده

- توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای تشکیل لبه برجسته
- بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشینکاری
- طراحی ابزارهای ویژه با قابلیت کاهش ذاتی لبه برجسته
- توسعه روش‌های خودکار برای بازرسی و کنترل کیفیت
- مطالعه تأثیر خواص مواد مختلف بر تشکیل لبه برجسته

ایده‌های نوآورانه

- استفاده از سنسورهای هوشمند برای نظارت عملیات ماشینکاری
- به کارگیری پوشش‌های نوین ابزار برای کاهش اصطکاک
- توسعه روش‌های ترکیبی ماشینکاری
- استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی پارامترها
- ایجاد پایگاه‌داده جامع از رفتار مواد مختلف



International Journal of Machine Tools and Manufacture 46(15):1913– 1920.

[20] Guo Y, Dornfeld D (2000) Finite Element Modeling of Burr Formation Process in Drilling 304 Stainless Steel. Journal of Manufacturing Science and Engineering 122(4):612–620.

[21] Guo Y, Dornfeld D (1998) Finite Element Analysis of Drilling Burr Minimization with a Backup Material. Transactions of NAMRI/SME 207(26):207–211.a

[22] Min S, Dornfeld DA, Nakao Y (2003) Influence of Exit Surface Angle on Drilling Burr Formation. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 125(4):637–644.

[23] Park I (1996) Modeling of Burr Formation Process in Metal Cutting, PhD Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA.

[24] Valente CMO, Min S (2002) Drilling Burr Minimization Based on the Analysis of the Interaction Angle, LMA Research Report, LMA. University of California, Berkeley CA.a

[15] Park IW, Dornfeld DA (2000) A Study of Burr Formation Processes Using the Finite Elements Method. Part I. Journal of Engineering Materials and Technology 122(2):221–229.

[16] Leopold J, Neugebauer R, Löffler M, Schwenck M, Hañle P (2006) Influence of Coating-Substrate Systems on Chip and Burr Formation in Precision Manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture 220(4):499–506.

[17] Park IW, Dornfeld DA (2000) A Study of Burr Formation Processes Using the Finite Elements Method. Part II. The Influences of Exit Angle, Rake Angle, and Backup Material on Burr Formation Processes. Journal of Engineering Materials and Technology 122(2):229–238.

[18] Klocke F, Frank P, Risse K, Hoppe S (2005) FE-Analysis of Burr Formation and Edge Break out in Cutting. Proceedings of the 8th International Workshop on Modeling of Machining Operation, 621–631.

[19] Toropov A, Ko SL (2006) A Model of Burr Formation in the Feed Direction in Turning.