

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



سزدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ايران  
بيست و يكمين سمينار سالانه انجمن علمي ريخته گري ايران  
با همكاري : دانشگاه شهيد باهنر کرمان

# مجموعه چکیده مقالات

سومین همایش ملی

مهندسی مواد، متالورژی و ریخته‌گری ایران

کرمان - ۲۶ و ۲۷ آبان ماه ۱۳۸۸





## تأثیر خواص مکانیکی و ریزساختار بر قابلیت ماشینکاری فولادهای AISI 1045

حمید سازگار<sup>۱</sup>، احد ضابط<sup>۲</sup>، بهنام معتکف ایمانی<sup>۳</sup>

### چکیده

ماشینکاری یکی از فرآیندهای مهم و پرکاربرد در تولید قطعات مخصوصاً در صنایع خودروسازی می‌باشد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی تأثیر فراوانی بر قابلیت ماشینکاری دارند. در مطالعه حاضر، قابلیت ماشینکاری براساس معیارهای نیروی برشی در تراشکاری و زبری سطح بعد از تراشکاری فولادهای تجاری AISI 1045 مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات خواص مکانیکی شامل سختی سنجی و آزمون کشش می‌باشد و تأثیرات سختی، تنش تسلیم، درصد تغییر طول و انرژی بر حسب مساحت زیر منحنی تنش-کرنش بر قابلیت ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های ریزساختاری و تحلیل تصاویر به دست آمده انجام شده است و تأثیرات درصد پرلیت و میزان کشیدگی ساختار بررسی شده است. مطابق با نتایج به دست آمده، افزایش سختی، کاهش تنش تسلیم و افزایش درصد تغییر طول سبب افزایش نیروی برش در تراشکاری می‌شود. افزایش میزان کشیدگی ساختار و افزایش درصد پرلیت نیروی برشی را کاهش و زبری سطح را افزایش می‌دهد.

**واژه های کلیدی:** قابلیت ماشینکاری، خواص مکانیکی، ریزساختار، نیروی برشی، زبری سطح، ابزارهای HSS، ابزارت‌های HZ15.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

## تأثير خواص مکانیکی و ریزساختار بر قابلیت ماشینکاری فولادهای AISI 1045

### چکیده

ماشینکاری یکی از فرآیندهای مهم و پرکاربرد در تولید قطعات مخصوصاً در صنایع خودروسازی می‌باشد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی تأثیر فراوانی بر قابلیت ماشینکاری دارند. در مطالعه حاضر، قابلیت ماشینکاری براساس معیارهای نیروی برشی در تراشکاری و زبری سطح بعد از تراشکاری فولادهای تجاری AISI 1045 مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات خواص مکانیکی شامل سختی سنجی و آزمون کشش می‌باشد و تأثیرات سختی، تنش تسلیم، درصد تغییر طول و انرژی برحسب مساحت زیر منحنی تنش-کرنش بر قابلیت ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های ریزساختاری و تحلیل تصاویر به دست آمده انجام شده است و تأثیرات درصد پرلیت و میزان کشیدگی ساختار بررسی شده است. مطابق با نتایج به دست آمده، افزایش سختی، کاهش تنش تسلیم و افزایش درصد تغییر طول سبب افزایش نیروی برش در تراشکاری می‌شود. افزایش میزان کشیدگی ساختار و افزایش درصد پرلیت نیروی برشی را کاهش و زبری سطح را افزایش می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** قابلیت ماشینکاری، خواص مکانیکی، ریزساختار، نیروی برشی، زبری سطح، ابزارهای HSS، اینزرت‌های HZ15.

## ۱- مقدمه

قابلیت ماشینکاری خاصیتی از ماده است که سهولت و سختی ماشینکاری را تحت یک شرایط خاص تعیین می‌کند [۱]. جهت توصیف دقیق‌تر این خاصیت بایستی از آزمون‌ها و معیارهایی جهت بررسی آن استفاده کرد. مطالعه قابلیت ماشینکاری توسط آزمون‌ها و معیارهای قابلیت ماشینکاری صورت می‌گیرد که مهمترین آنها شامل معیارهای عمر ابزار، نیروی برشی و کیفیت سطح قطعه کار (زبری سطح) می‌باشد. عوامل زیادی می‌تواند بر عمر ابزار، نیروهای برشی و کیفیت سطح ماشینکاری شده تأثیر گذارند [۲]. در این مقاله قابلیت ماشینکاری توسط معیارهای نیروی برشی و زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. متأسفانه مراجعی که تأثیر ریزساختار بر قابلیت ماشینکاری را بررسی کرده‌اند، بسیار اندک می‌باشند.

ترکیب شیمیایی [۴۳و۴]، خواص مکانیکی، خصوصیات آخال‌ها [۵،۶،۷،۸و۹] و ریزساختار فولادها [۱۰و۱۱] مهمترین عوامل موثر بر قابلیت ماشینکاری می‌باشند. افزایش سختی در فولادهای سبب افزایش نیروی برشی و مصرف ابزار می‌گردد [۱۲]. سرعت برشی مورد استفاده در ماشینکاری را می‌توان به ریزساختار فلز ارتباط داد. وجود ترکیبات سخت در ساختار قطعه کار، سرعت برشی پایین را ضروری می‌سازد و دانه‌های بزرگتر سرعت برشی بالاتر را ممکن می‌سازد. فولادهایی که دقیقاً ترکیب شیمیایی و سختی یکسانی دارند و در یک کارخانه و در شیفتهای متفاوت تولید می‌شوند، بسته به تفاوتی که در ریزساختار دارند، می‌توانند قابلیت ماشینکاری متفاوتی داشته باشند [۲].

فریت فاز نرمی است که دارای چقرمگی و شکل‌پذیری بالایی می‌باشد که در نتیجه توانایی زیادی جهت چسبیدن به ابزار برش در حین ماشینکاری دارد. خصوصیت چسبندگی فریت به ابزار برش سبب کاهش قابلیت ماشینکاری این فاز نسبت به فاز پرلیت با حدود ۰/۲۵ درصد کربن می‌شود [۱]. مقدار زیاد فریت باعث جوش خوردن آن به لبه ابزار و تشکیل لبه انباشته می‌گردد. نرمی فریت در ماشینکاری باعث افزایش عمر ابزار و کاهش مصرف ابزار می‌گردد [۱ و ۲].

تأثیر ساختار پرلیت بر روی قابلیت ماشین کاری فولادهای ساختمانی توسط برانزل<sup>۱</sup> و همکارانش به وسیله آزمایشات سوراخ کاری بررسی شده است. قابلیت ماشینکاری رضایتبخش قطعاتی که بارهای سبک را تحمل می‌کنند، می‌تواند توسط ایجاد مورفولوژی بهینه پرلیت در فولاد و افزایش مقدار سولفور، بدون افزودن سرب فراهم شود. در فولادهای پرلیتی با غلظت متوسط کربن، قابلیت ماشینکاری رضایتبخش قطعات در تولید مقیاس بالا می‌تواند توسط مورفولوژی پرلیت لایه‌ای در یک ساختار هایپوپرلیتیک قابل دست یافتن باشد [۱۰].

بهبود قابلیت ماشینکاری در فولادهای دارای ریزساختار فریت-پرلیت به دو مکانیزم ارتباط پیدا می‌کند که عبارتند از؛ (۱) ریزساختار فریت-پرلیت سبب می‌شود که تغییر شکل در ناحیه برش به داخل ناحیه موضعی کوچکی متمرکز شود و (۲) ریزساختار فریت-پرلیت سبب شروع آسان‌تر ریزترک‌ها می‌شود. هر دو مکانیزم سبب سهولت در تشکیل براده شده و در نتیجه ماشینکاری راحت‌تر انجام می‌گیرد و قابلیت ماشینکاری بهبود می‌یابد [۱۱].

<sup>۱</sup> Brunzel

## ۲- مواد و روش تحقيق

سه نمونه‌ی فولاد AISI 1045 تهیه شده و آزمایشات تعیین ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و معیارهای قابلیت ماشینکاری شامل نیروی برشی و زبری سطح روی آنها انجام گرفته است. این سه فولاد دارای قطر ۱۷/۷ میلیمتر بوده که به صورت CH، FY و YA نام‌گذاری شده‌اند. فولادهای FY و YA فولادهای داخلی و فولاد CH فولاد وارداتی می‌باشد. ترکیب شیمیایی فولادهای تهیه شده در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. آزمایشات خواص مکانیکی انجام شده شامل سختی سنجی توسط دستگاه سختی سنج ویکرز VICKERS-ARMSTAONGS ساخت انگلستان با بارگذاری ۲۰ کیلوگرم و آزمایش کشش توسط دستگاه Zwick مدل Z250 با ظرفیت ۲۵۰KN و براساس استاندارد ASTM E 8M انجام شده‌اند. شرایط آزمایش کشش به این صورت است که بار اولیه ۵MPa و سرعت ثابت حرکت فک دستگاه ۱۵mm/min می‌باشد. تغییر طول نمونه توسط اکستنسیومتر MAKRO با دقت ۰/۹ میکرومتر اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده از آزمون کشش شامل مقادیر حدنهایی استحکام، حد تسلیم، انرژی جذب شده برحسب مساحت زیر نمودار تنش- کرنش و درصد تغییر طول می‌باشد. نتایج ارائه شده خواص مکانیکی به صورت میانگین سه اندازه‌گیری می‌باشد.

تصاویر ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری تهیه شده‌اند. نمونه‌های مانع شده، پولیش و سپس توسط محلول نایتال ۲ درصد اچ می‌شوند. ۲۵ تصویر نوری از سطوح اچ شده تهیه می‌شود. تصاویر به دست آمده توسط نرم‌افزار CLEMEX مورد تحلیل قرار می‌گیرند. تحلیل‌های نرم‌افزاری شامل کمیته و بیشینه اندازه دانه براساس استاندارد ASTM E112-96، میانگین درصد سطحی فاز فریت و ساختار پرلیت و میانگین کشیدگی ساختار می‌باشد.

جهت تعیین قابلیت ماشینکاری دو آزمایش یعنی نیروی برشی در تراشکاری و زبری سطح بعد از تراشکاری انجام شده‌اند. نیروی برشی توسط دستگاه تراش TN50BR ساخت تبریز اندازه‌گیری شده است که بر روی این دستگاه تراش یک Load Cell جهت تعیین نیروی برشی در راستای قائم بر محور تراشکاری نصب شده است. جهت تراشکاری از ابزارهای فولاد تندبر (HSS) با زاویه براده ۸ درجه و زاویه ابزار ۱۰ درجه و اینزرت‌های HZ15 استفاده شده است. سپس روی نمونه‌های تراشکاری شده، سه آزمون زبری سطح توسط دستگاه Surfscan 200 انجام شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولادهای مورد آزمایش.

Cu	Al	Mo	Cr	Ni	Mn	P	S	Si	C	نمونه
۰/۲۸۴	۰/۰۴۳	۰/۰۴۰	۰/۱۲۵	۰/۱۱۰	۰/۵۳۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۲۳۲	۰/۴۴۳	YA
۰/۳۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۰/۲۰۶	۰/۱۰۱	۰/۷۴۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۸	۰/۲۰۴	۰/۴۸۶	FY
۰/۱۸۳	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	۰/۰۴۷	۰/۰۷۸	۰/۷۹۲	۰/۰۰۷	۰/۰۳۰	۰/۲۸۲	۰/۴۲۴	CH

## ۳- نتایج و بحث

نتایج آزمون کشش شامل استحکام نهایی، تنش تسلیم، انرژی شکست و درصد تغییر طول کل می‌باشد. جدول ۲ خواص مکانیکی فولادهای مورد آزمایش را نمایش می‌دهد. براساس این نتایج، فولاد CH کمترین سختی، استحکام نهایی و تنش

تسلیم و بیشترین درصد تغییر طول را دارد. بالا بودن درصد تغییر طول کاهش در قابلیت ماشینکاری را به ارمغان می‌آورد [۱ و ۲]. فولاد YA کمترین درصد تغییر طول و بیشترین استحکام نهایی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. خواص مکانیکی فولادهای مورد آزمایش.

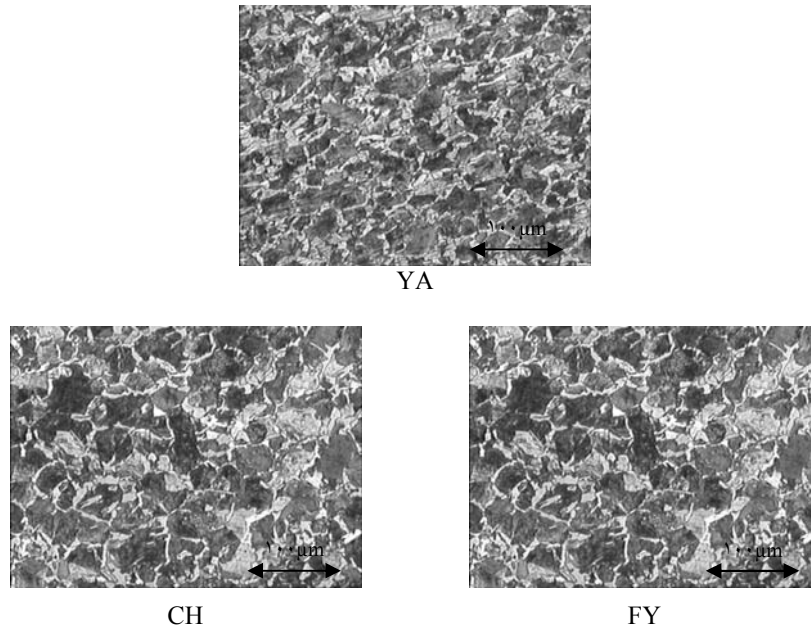
نمونه	سختی (VH)	استحکام نهایی (N/mm <sup>2</sup> )	تنش تسلیم (N/mm <sup>2</sup> )	چقرمگی شکست (Nmm)	درصد تغییر طول کل
YA	۲۷۱	۹۱۷/۷۳	۷۵۹/۶۳	۴۱۱۰۱۵/۹۳	۳/۷۷
FY	۲۷۷	۹۱۳/۶۲	۸۲۷/۰۰	۳۹۵۶۳۲/۶۵	۸/۳۲
CH	۲۵۶	۷۹۰/۰۱	۶۱۹/۶۶	۶۷۳۳۰۳/۷۳	۱۱/۸۳

تصاویر ریزساختاری تهیه شده از میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر توسط نرم‌افزار CLEMEX تحلیل شده‌اند. شکل ۱ نمونه‌ای از این تصاویر را در مورد فولادهای این قطر نمایش می‌دهد. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های نرم‌افزاری شامل کمینه و بیشینه اندازه دانه براساس استاندارد ASTM E112-96، میانگین درصد سطحی فاز فریت و ساختار پرلیت و میانگین کشیدگی ساختار در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج ریزساختاری به دست آمده از نرم‌افزار CLEMEX.

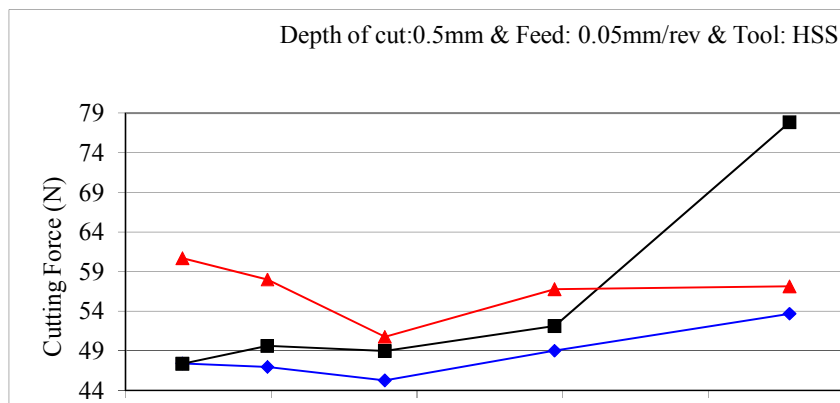
نمونه	اندازه دانه فریت		اندازه دانه پرلیت		میزان کشیدگی	
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	فریت	پرلیت
YA	۱۰/۵۲	۱۱/۰۲	۱۰/۳۵	۱۰/۸۸	۱/۰۵	۱/۰۶
FY	۹/۹۴	۱۱/۱۱	۹/۵۴	۱۰/۴۹	۱/۱۱	۱/۱۳
CH	۱۰/۱۱	۱۱/۳۱	۱۰/۱۵	۱۱/۲۴	۱/۰۴	۱/۰۶

مطابق با بررسی‌های ریزساختاری، فولاد FY بیشترین درصد پرلیت و فولاد YA کمترین درصد پرلیت را دارند. میزان کشیدگی ساختار در فولاد FY کمترین مقدار و سایر فولادهای مقادیر مشابهی دارند. افزایش کشیدگی ساختار که از فرآیند نورد فولادها ناشی می‌شود، منجر به کاهش نیروی برشی می‌گردد. علت آن این است که فواصل بین لایه‌های فریت و پرلیت کاهش یافته و در نتیجه ناحیه تغییر شکل پلاستیک نوک ابزار برش کاهش می‌یابد و جوانه‌زنی و رشد ترک‌ها از مرزهای فریت و پرلیت نیز افزایش می‌یابد. هر دو عامل ذکر شده کوچک‌تر شدن براده‌ها را نتیجه می‌دهند و با کوچک شدن براده‌ها نیروی برشی کاهش می‌یابد [۶]. بیشینه اندازه دانه‌های فریت و پرلیت اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهد، اما فولاد FY کمترین مقدار کمینه اندازه دانه‌های فریت و پرلیت را دارد.



شکل ۱. تصاویر ریزساختاری فولادهای مورد بررسی.

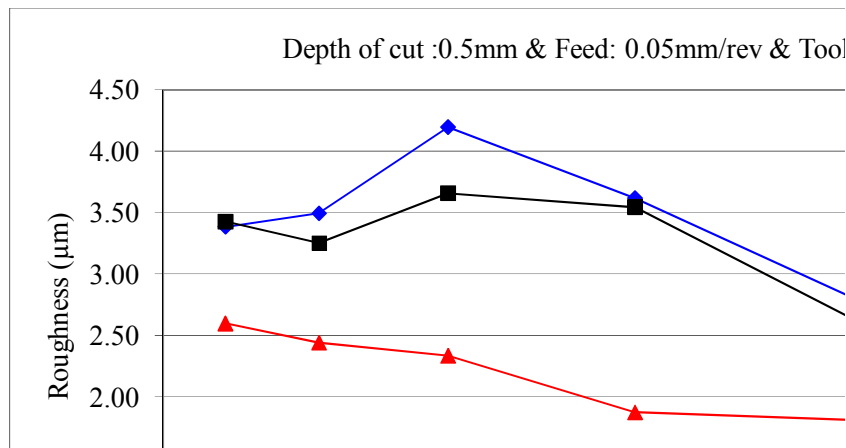
قابلیت ماشینکاری توسط دو معیار نیروی برشی و زبری سطح تعیین شده است. نیروهای برشی توسط تراشکاری با ابزارهای HSS و اینزرت های HZ15 تعیین شده اند. آزمایشات نیروی برشی در حین تراشکاری در سرعت های برش متفاوت توسط ابزارهای HSS در شرایط تراشکاری خشک بر روی فولادهای YA، FY، CH انجام شده است. در انجام این آزمایشات، سرعت های برشی برابر ۱۳/۸۹، ۱۹/۷۳، ۲۷/۷۹، ۳۹/۴۶ و ۵۵/۵۸ m/min می باشد. در این آزمایشات عمق برش ۰/۵ mm و نرخ پیشروی ابزار برش ۰/۰۵ mm/rev می باشد. شکل ۲ نتایج نیروی برشی بر حسب سرعت برشی در مورد این فولادها را نمایش می دهد.



شکل ۲. نتایج نیروی برشی بر حسب سرعت برش در شرایط عمق برش و نرخ پیشروی ثابت و تراشکاری در شرایط خشک توسط ابزارهای HSS.

همان طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، فولاد CH به جز در سرعت برش  $55/58\text{m/min}$  دارای بیشترین نیروی برشی می‌باشد و فولاد YA دارای کمترین نیروی برشی در تمامی سرعت‌های برشی می‌باشد. در سرعت برش  $13/89\text{m/min}$  فولادهای YA و FY نیروی برشی مشابهی دارند و در سرعت برش  $55/58\text{m/min}$  فولاد FY بیشترین نیروی برشی را دارا می‌باشد. نیروهای برشی در همه فولادها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند.

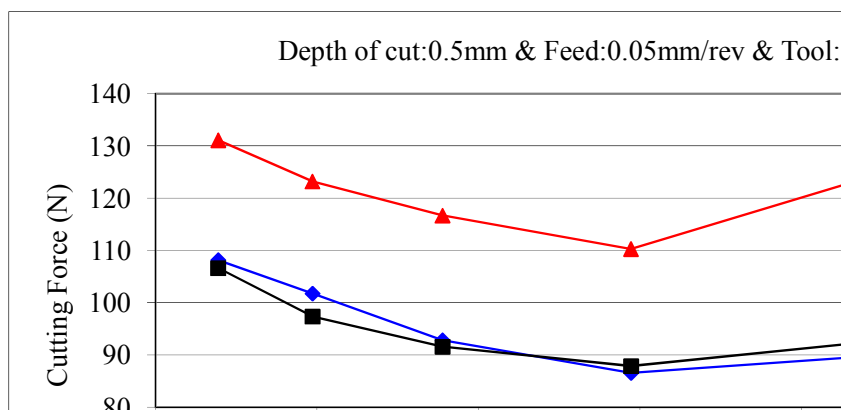
نتایج به دست آمده از آزمایشات زبری سطح برحسب سرعت برش در شرایط عمق برش و نرخ پیشروی ثابت در مورد فولادهای قطر  $17/7$  میلیمتر در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که فولاد YA بیشترین زبری سطح را در تمامی سرعت‌های برشی دارد و فولاد CH دارای کمترین مقادیر زبری سطح در تمامی سرعت‌های برشی مورد آزمایش می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برش، زبری سطح ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳. نتایج زبری سطح برحسب سرعت برش در شرایط نرخ پیشروی ابزار و عمق برش ثابت و تراشکاری در شرایط خشک توسط ابزارهای HSS

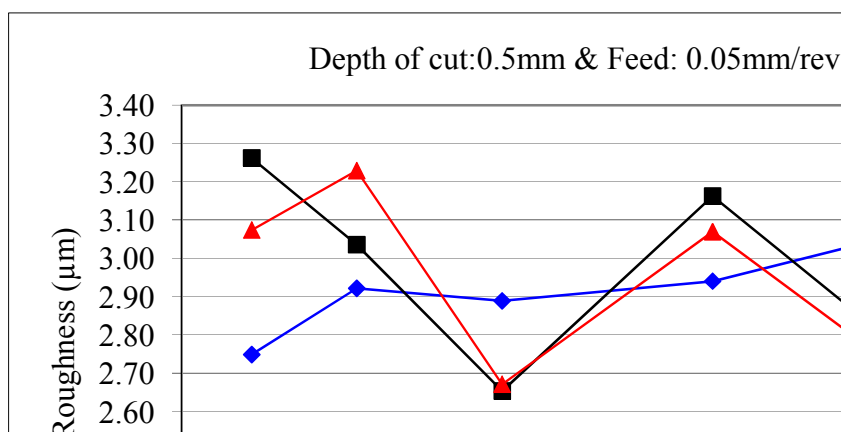
آزمایشات نیروی برشی برحسب سرعت برش در شرایط تراشکاری خشک و در عمق برش ثابت  $0/5\text{mm}$ ، نرخ پیشروی ابزار  $0/05\text{mm/rev}$  و در سرعت‌های برشی  $250$ ،  $355$ ،  $500$ ،  $710$  و  $1000\text{rpm}$  و یا به عبارت دیگر در سرعت‌های برشی  $13/89$ ،  $19/73$ ،  $27/79$ ،  $39/46$  و  $55/58\text{m/min}$  توسط اینترت‌های HZ15 انجام شده است. شکل ۴ نتایج به دست آمده از این آزمایشات را ارائه می‌دهد. با توجه به شکل، نیروی برشی فولاد CH در تمامی سرعت‌های برش بیشترین مقدار و نیروی برشی سایر فولادهای مقادیر مشابهی دارند. نیروی برشی با افزایش سرعت برش در مورد همه فولادها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.





شکل ۴. نتایج نیروی برشی برحسب سرعت برش در شرایط نرخ پیشروی ابزار و عمق برش ثابت و ماشینکاری در شرایط خشک توسط اینزرت‌های HZ15.

آزمایشات زبری سطح برحسب سرعت برش در تراشکاری توسط ابزارهای اینزرتی در عمق برش ۰/۵mm، نرخ پیشروی ابزار ۰/۰۵mm/rev و سرعت‌های برش ۱۳/۸۹، ۱۹/۷۳، ۲۷/۷۹، ۳۹/۴۶ و ۵۵/۵۸m/min انجام شده است. شکل ۵ نتایج به دست آمده از این آزمایشات را ارائه می‌دهد. مطابق با شکل، فولادهای CH و FY دارای مقادیر زبری سطح مشابهی در سرعت‌های برش متفاوت می‌باشند و با افزایش سرعت برش، زبری سطح به صورت زیگزاکی تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که در فولاد YA، با افزایش سرعت برش، زبری سطح افزایش می‌یابد.



شکل ۵. نتایج زبری سطح برحسب سرعت برش در شرایط عمق برش و نرخ پیشروی ثابت و تراشکاری در شرایط خشک توسط اینزرت‌های HZ15.

در کل، مهمترین عوامل موثر بر قابلیت ماشینکاری فولادهای AISI 1045 مورد بررسی شامل سختی، تنش تسلیم، استحکام نهایی، درصد تغییر طول، درصد پرلیت و میزان کشیدگی ساختار می‌باشد. کم بودن استحکام نهایی و تنش تسلیم، بالا بودن انرژی شکست و درصد تغییر طول، میزان کشیدگی کم ساختار و درصد پرلیت متوسط در فولاد CH، بالا بودن نیروی برشی

در این فولاد را توجیح می‌کند. هر چند که پایین بودن سختی تأثیر کاهنده‌ای بر نیروی برشی دارد، اما تأثیر عوامل مخرب بر قابلیت ماشینکاری براساس معیار نیروی برشی شدیدتر می‌باشد. کم بودن استحکام نهایی و تنش تسلیم و بالا بودن انرژی شکست و درصد تغییر طول منجر می‌شود ناحیه تغییر شکل پلاستیک جلوی ابزار برش افزایش یابد. افزایش ناحیه تغییر شکل پلاستیک سبب می‌شود که ماده کاری در جلوی ابزار برش تجمع کند و نیروی لازم جهت برش افزایش یابد. افزایش ناحیه تغییر شکل پلاستیک منجر به آسان بسته شدن ترک‌های سطحی در محل برش می‌شود و در نتیجه زبری سطح بهتری را نتیجه می‌دهد. افزایش درصد پرلیت افزایش لایه‌های فریت-پرلیت مقابل ابزار برش را ناشی می‌شود. با افزایش این لایه‌ها ناحیه تغییر شکل پلاستیک جلوی ابزار برش کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروی برشی کاهش می‌یابد. افزایش کشیدگی ساختار، کاهش فواصل بین لایه‌های فریت-پرلیت را نتیجه می‌دهد. با کاهش این فواصل، ناحیه تغییر شکل پلاستیک کاهش یافته و محل‌های ایجاد ترک در فصل مشترک لایه‌ها افزایش می‌یابد. هر دو عامل ذکر شده موجب افزایش شکنندگی براده‌ها و کاهش زبری سطح می‌گردند. با توجه به این که محل‌های جوانه‌زنی و رشد ترک‌ها افزایش می‌یابد، زبری سطح کاهش خواهد یافت. پایین بودن نیروی برشی در فولاد FY توسط کم بودن درصد تغییر شکل و بالا بودن درصد پرلیت در این فولاد توجیح می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت ماشینکاری فولادهای AISI 1045 توسط تراشکاری با ابزارهای HSS و اینزرت‌های HZ15 توسط دو معیار نیروی برشی و زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشد.

- ۱- با افزایش سرعت برش، نیروی برشی در تراشکاری توسط ابزارهای HSS و اینزرت‌های HZ15 ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش سرعت برش، زبری سطح در تراشکاری توسط ابزارهای HSS ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در تراشکاری توسط اینزرت‌های HZ15 به صورت زیکزاکمی تغییر می‌کند.
- ۳- مهمترین عوامل موثر بر قابلیت ماشینکاری سختی، درصد تغییر طول، درصد پرلیت و میزان کشیدگی ساختار می‌باشد.
- ۴- افزایش سختی و درصد تغییر طول نیروی برشی را افزایش می‌دهند.
- ۵- افزایش درصد پرلیت و افزایش میزان کشیدگی ساختار نیروی برشی را کاهش و زبری سطح را افزایش می‌دهد.

#### ۵- مراجع

- 1- Metals Handbook, Machinability of Steels, 10th ed., vol. 1, ASM, 1993.
۲. محمد رضا رازفر، اصول ماشین کاری و ابزارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، مرکز نشر، ۱۳۷۹.
- 3- D. Bhattachary, Effect of Sulfur and Zirconium on the Machinability and Mechanical Properties of AISI 1045 Steels, Metallurgical Transactions, Volume 12A, JUNE 1981—973.

- 4- T. Akasawa, H. Sakurai, M. Nakamura, T. Tanaka, K. Takano, Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels, *Materials Processing Technology* 143–144 (2003) 66–71.
- 5- J. Bellot, Steels with improved machinability, UDC 669.14.018.23, France. Translated from *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, No. 11, pp. 14-18, November, 1980.
- 6- M. A. Krishtal, A. A. Borgardt, Yu. D. Yashin, Effect of lead on the machinability free-cutting steel, UDC 669.4:669.14.018.23, Tol'yatti Polytechnic Institute. Translated from *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, No. 3, pp. 10-12, March, 1977.
- 7- M. Murshed, E. Eleftheriou, R. Griffin, C. E. Bates, Effect of Abrasive Inclusions on the Machinability of Cast Steel, *AFS Transactions* 01-112 (Page 1 of 11).
- 8- K. Oikawa, S.- I. Sumi, K. Ishida, The Effects of Addition of Deoxidation Elements on the Morphology of (Mn,Cr)S Inclusions in Stainless Steel, *Basic and Applied Research: Section I*, 1998.
- 9- L. Jiang, K. Cui, H. Hfininen, Effects of the composition, shape factor and area fraction of sulfide inclusions on the machinability of re-sulfurized free-machining steel, *Materials Processing Technology* 58 (1996) 160 165.
- 10- Yu. M. Brunzel, I. M. Fomin, Effect of the pearlite structure of structural steel on its machinability, *Metal Science and Heat Treatment*, UDC 621.9.011:669.14.018.298.
- 11- A. Ebrahimi, M.M. Moshksar, Study of machinability in boring operation of microalloyed and heat-treated alloy steels, *Materials Science and Engineering A* 460–461 (2007) 314–323.
- 12- T. Akasawa, I. Fukuda, K. Nakamura, T. Tanaka, Effect of microstructure and hardness on the machinability of medium-carbon chrome-molybdenum steel, *Materials Processing Technology* 153–154 (2004) 48–53.