تعيين دماي ابزار در براده‌برداري عمودي به روش المان محدود و مقايسه با نتايج تجربي

علي فتي[i] *؛ محمد رضا رازفر[ii]

چكيده

ماشينكاري فولادها به طور ذاتي دماي بالايي را توليد مي‌كند؛ اين دما علاوه بر كاهش عمر ابزار، باعث پايين آمدن كيفيت قطعه توليدي مي‌شود. از طرفي كاربرد مواد خنك كننده به سلامتي اپراتور آسيب مي رساند و باعث آلودگي محيط زيست مي‌شود. در اين مقاله ماشينكاري در شرايط خشك توسط ابزار كاربايدي بر روي فولاد (st37) انجام شد و براي به دست آوردن دماي منطقه تماس ابزار- براده از دو روش: ترموكوپل جايگذاري شده در ابزار و دوربين مادون قرمز استفاده شد. نتايج تجربي با نتايج نرم‌افزارهاي سوپرفرم و فلوئنت مقايسه شده است. با ثابت نگاه داشتن هندسه ابزار و تغيير در پارامترهاي سرعت برش، نرخ پيشروي و عمق برش و مقادير حرارت ايجاد شده در ابزار مورد مطالعه قرار گرفت. سپس به كمك نتايج تجربي حاصل از ترموكوپل با روش طراحي آزمايش و توسط آناليز رگرسيون، فرمول تخمين دماي سطح ابزار به دست آمد و نشان داده شد كه اثر افزايش سرعت برشي، پيشروي، عمق برش و اثر دو طرفه سرعت برشي و پيشروي، به ترتيب بيشترين تأثير را بر دماي سطح ابزار دارند. همچنين تأثير پارامترهاي سرعت برش و پيشروي همزمان با دما بر روي نيروهاي ماشينكاري مورد بررسي قرار گرفت.

كلمات كليدي: دماي برش، روش ترموكوپل ، توزيع دما، براده برداري عمودي، المان محدود.

Determination of Tool Temperature in Orthogonal Metal Cutting by Finite Element Method and its Comparison with Experimental Work

A.Fata; M.R.Razfar

ABSTRACT

Machining of steel inherently generates high cutting temperature, which not only reduces tool life but also impairs the product quality. Further, the lubricant effect deteriorate the working environment and lead to general environmental pollution. In this work, the cutting tool used is uncoated carbide insert with st37 steel as workpiece material to measure the temperature of the tool-chip interface in dry turning. Two different approaches are implemented for temperature measuring: an embedded thermocouple into the cutting tool and infrared camera. Comparisons are made between experimental and FE results. The influence of cutting speed, feed rate and depth of cut on the temperature are investigated. Afterwards, an expression for the effects of cutting conditions on tool temperature are determined using a design of experiment developed by factorial regression method. With the aid of experimental results is concluded that the main factors of the increasing cutting temperature are, cutting speed, feed rate and depth of cut respectively, It is also determined that interaction between cutting speed and feed rate has maximum effect on increasing in cutting temperature.

KEYWORDS : Cutting temperature; thermocouple method; Temperature distribution; Orthogonal cutting; Finite element.

تاريخ دريافت مقاله:١٣٨٦/٤/١١

تاريخ اصلاحات مقاله: ١٣٨٧/٥/١

[i] * نويسنده مسئول و مربی، دانشگاه هرمزگان E-mail: fata.ali@gmail.com

[ii] استاديار، دانشگاه صنعتي امير كبير E-mail: Razfar@aut.ac.ir

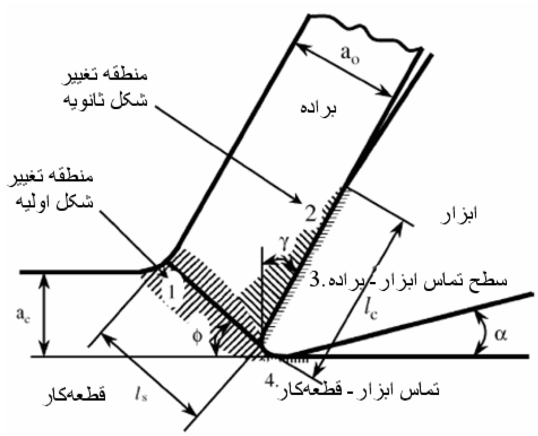
۱- مقدمه

حرارت حاصل از براده‌برداري، يكي از عوامل محدود كننده در عمليات ماشينكاري است. اين پديده تأثيرات نامطلوبي بر كيفيت سطح قطعه‌كار، دقت ابعادي، سايش ابزار، سرعت توليد و قيمت تمام شده دارد. از طرفي استفاده از سيال برش باعث مشكلاتي براي سلامتي كارگر وآلودگي محيط زيست مي‌شود؛ لذا پژوهشگران درصدد كاهش و يا عدم استفاده از سيال برش در عمليات ماشينكاري بر آمده اند. در سال ۱۹۰۷ تيلور[۱] اولين مقاله را در مورد نقش حرارت در برش فلزات ارائه داد[۱]. در اين نظريه عنوان شد كه اگر دماي برش بالا رود، سايش ابزار زياد شده، ممكن است باعث آسيب ديدن قطعه كار و موجب تشكيل لبه انباشته بر روي ابزار گردد كه در نتيجه كيفيت سطح قطعه كار خراب مي شود و همچنين تنش هاي حرارتي در قطعه كار ايجاد مي‌شود[۱]. در سال ۱۹۸۳، استيونسن[۲] و همكارانش با استفاده از نتايج به دست آمده از آزمايش هاي پيچش با نرخ كرنش بالا، تنش سيلان و حرارت را تحت شرايط آدياباتيک (بي دررو) و براساس متغيرهاي نرخ كرنش به دست آوردند[۲]. موراكا[۳] در سال ۱۹۹۰ با كاربرد المان محدود, اثر پارامترهاي مختلف برش و زاويه براده را بر روي توزيع دمايي سطح براده بررسي كرد. نرخ توليد حرارت به كمک برخي روش هاي تجربي كه مقدار كرنش را در نواحي تغيير شكل اوليه و ثانويه بررسي مي‌كنند, محاسبه شده است[۳]. تأثير اصطكاک در عمل برش متعامد به كمک المان محدود، توسط شاي[٤] وهمكارانش در سال ۲۰۰۳ بررسي شده است كه در اين مدل فرآيند برش متعامد تحت شرايط كرنش صفحه‌اي مدل گرديد[٤].

۲- حرارت در برشكاري

عمليات براده‌برداري يک فرآيند ترمو- مكانيكي است. در طول اين فرآيند، حرارت در نتيجه تغيير شكل پلاستيک و اصطكاک در طول سطح تماس ابزار- براده و ابزار- قطعه‌كار حاصل مي‌شود. طرحي از يک نمونه برشكاري عمودي در شكل(۱) نشان داده شده است. به طور كلي فرض شده است كه تقريباً تمام انرژي مورد نياز برش، در مرزهاي برش تبديل به حرارت مي‌شود[۱]. ميزان افزايش دما ممكن است به بالاي ۱۰۰۰ درجه سانتيگراد در منطقه برش برسد كه اين دما تحت تأثير رفتار ماده و مكانيزم تشكيل براده است. بيشترين دما در سطح تماس ابزار- براده اتفاق مي‌افتد. سايش و شكست ابزار به طور قابل ملاحظه‌اي در دماهاي بالا، افزايش مي‌يابد. افزايش دما در ماشينكاري متاثر از پارامترهاي برش است. پارامترهاي زيادي هستند كه تغييرات دما در آنها موثر است؛ مانند: عمر ابزار، مكانيزم هاي تشكيل براده، كيفيت سطح، نيروهاي برش، سرعت برش، بهره‌وري فرآيند و غيره؛ بنابراين تعيين توزيع دما در مرزهاي برش، يكي از وظايف اصلي پژوهشگران ماشينكاري در سال هاي اخير بوده است[۵].

به طور كلي، توليد حرارت در چهار ناحيه، در منطقه برش اتفاق مي‌افتد: منطقه تغيير شكل اوليه(صفحه برش)، منطقه تغيير شكل ثانويه، منطقه اصطكاكي در طول سطح تماس ابزار- براده و يک منطقه كوچک اصطكاكي در سطح تماس ابزار- قطعه‌كار براي ابزارهايي كه ساييده شده است(شكل۱). منبع حرارتي در نواحي تغيير شكل اوليه و ثانويه توزيع شده است؛ زيرا حجم بالايي از تغيير شكل، حين عمل برش در اين دو ناحيه اتفاق مي‌افتد و در بيشتر كارهاي تئوري و تحليلي به صورت منبع حرارتي صفحه‌اي فرض مي‌شود. گرماي حاصل از اصطكاک در يک صفحه واقع در منطقه تماس ابزار- براده توليد مي‌شود. توزيع منابع حرارتي در عمل برش در شكل(۱) نشان داده شده است. در حدود ۸۰-٦۰ درصد حرارت از طريق براده (بسته به سرعت برش) به بيرون منتقل مي‌شود و در حدود ۲۰-۱۰ به قطعه كار و ۲۰-۱۰ درصد به ابزار انتقال مي يابد[۶و۷].



شكل (۱): طرحي از فرآيند برش عمودي[۶]

۳- مدل‌سازي انتقال حرارت ابزار

مدلسازي حرارتي فرآيند برش از دو مرحله تشكيل شده است:

۱) فرآيند تشكيل و تعيين دماي براده

۲) آناليز انتقال حرارت در ابزار

مدل سازي فرآيند تشكيل براده توسط نرم افزار ام.اس.سي سوپر فرم و آناليز انتقال حرارت در ابزار توسط نرم افزار فلوئنت انجام شده است؛ زيرا نرم افزار سوپر فرم نمي‌تواند توزيع دماي نقاط مختلف در زير سطح ابزار را در جايي كه

ترموکوپل نصب شده است نشان دهد.

۳-۱- مدلسازي فرآيند تشکيل براده توسط نرم افزار ام.اس.سي سوپر فرم[5]

فرضيات مدلسازي

در اين مقاله از فرضيات زير براي مدلسازي فرآيند استفاده شده است:

۱- فرآيند ماشينکاري عمودي در حالت پايدار است .

۲- ابزار يک جسم صلب فرض شده است.

۳- شکل براده به صورت پيوسته است.

٤- قطعه‌کار به صورت الاستيک- ويسکوپلاستيک فرض شده است[۷].

از اين فرضيات در مدل سازي فرآيند استفاده شده است. فرضيات فوق به طور ضمني يا صريح در به دست آوردن مدل، اعمال شده‌اند و مشخصاً اعمال اين ساده‌سازي‌ها خطاهايي در پي خواهد داشت که اين خطاها در مقايسة بين نتايج تجربي با شبيه‌سازي نمود پيدا مي‌کنند[۷].

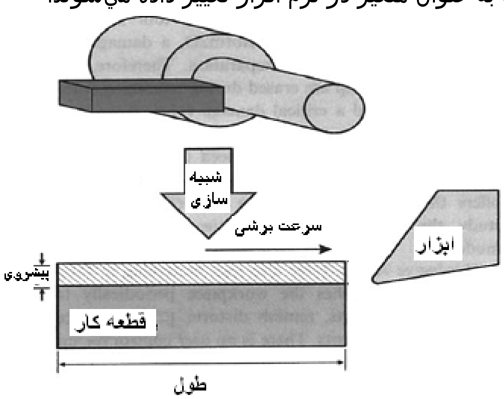
کميت‌هاي متغير عبارتند از: سرعت برش،پيشروي،عمق برش و شعاع لبه برنده اصلي ابزار. در اين مدل ابزار مورد استفاده صلب فرض شده است و جنس قطعه‌کار فولاد معادل با فولاد ساختماني است که از پايگاه داده‌هاي خود نرم افزار استفاده مي‌شود. رفتار اين ماده به صورت الاستيک- پلاستيک و با در نظر گرفتن تغييرات خواص ماده بر اثر درجه حرارت مدل‌سازي شده است. در مدل‌سازي اصطکاک از قانون اصطکاک کلمب استفاده شده است و دو ناحيه اصطکاکي چسبنده و لغزنده بر روي سطح براده ابزار در نظر گرفته شده است. مقدار ضريب اصطکاک در منطقه لغزنده ۰/۵ فرض شده است (بهترين تطابق نيروهاي شبيه سازي شده در نرم افزار و نيروهاي حاصله از کار هاي تجربي در ضريب اصطکاک ۰/۵ مشاهده مي شود. در همة مدل هاي ساخته شده تمام پارامترهاي المان محدود روي مقادير ثابت تنظيم مي‌شوند؛ به عنوان مثال، در همه شبيه‌سازي ها، تعداد المان ها، گره‌ها، نوع المان، اندازه المان و...يکسان است، ولي پارامترهاي ماشينکاري به ترتيب در هر مدل نسبت به مدل ديگر تغيير مي‌کند.

در اين مقاله ٤٠ مدل براي ابزاري با لبه تيز (شعاع لبه برنده اصلي صفر) تهيه شد که شامل ۲۰ مورد سرعت برشي متغير،۲۰ مورد پيشروي متغير است و تعداد ۱۲۰ مدل براي ابزار با شعاع لبه برنده ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ تهيه شد (بقيه پارامترها ثابت در نظر گرفته شد). در برخي از اين شبيه‌سازي ها عمق برش نيز تغيير داده شد. اکثر اين مدل ها همسان با معادل تجربي آن ساخته شده‌اند.

قطعه‌کار در اين مدل، مستطيلي به ابعاد ٦/۳ ميليمتر در ۳/۱ ميليمتر است. طول قطعه‌کار به ٤٠ قسمت مساوي و عرض قطعه‌کار به ۱۰ قسمت مساوي تقسيم شده است. تعداد کل المان‌ها قبل از انجام عمليات تجديد مش[6] (ريز کردن المان ها در منطقه حساس) در همه مدل ها مقدار ثابت ٤۰۰ عدد المان مربعي چهار گره است(معادل با ٤٥۱ گره). زاويه براده ابزار صفر درجه و زاويه آزاد ابزار ٤ درجه فرض مي‌شود که اين مقدار در تمام مدلسازي‌ها ثابت است. دماي اوليه ابزار و قطعه‌کار در تمام شبيه‌سازي ها ۲۰ درجه سانتيگراد در نظر گرفته شده است.

شرايط مرزي:

با توجه به شرايط مرزي استفاده شده در اين شبيه‌سازي-ها، خطوط(منحني ها) صلب به عنوان ديوارة ابزار در نظر گرفته شده‌اند. گره‌هايي که بر روي ديواره‌هاي ثابت قرار گرفته باشند، در هيچ جهتي جابجايي يا چرخش ندارند. آخرين گره‌هاي سمت راست قطعه‌کار با يک ديواره صلب، ثابت نگه داشته مي‌شوند. گره هاي پاييني هم به‌وسيله خط تقارن در عمق ثابت، نگه داشته مي‌شوند. اين گره‌ها در جهت سرعت و در جهت پيشروي در حين عمل برش هيچ گونه جابجايي ندارند. ابزار نيز به عنوان يک جسم صلب از سمت چپ به راست با سرعت ثابت در يک خط مستقيم حرکت مي‌کند. پس از برخورد ابزار به المان ها (قطعه‌کار) و با رسيدن مقدار تنش اولين گره به مقدار تنش بحراني، اين گره از ديگر المان ها جدا شده، به سطح براده ابزار منتقل مي‌شود و به اين صورت براده از قطعه‌کار جدا مي‌شود. در شکل(۲) مدل دو بعدي از فرآيند برش عمودي در مدلسازي المان محدود نشان داده شده است؛ بدين ترتيب پارامترهاي سرعت برش، عمق، پيشروي و شعاع لبه برنده به عنوان متغير در نرم افزار تغيير داده مي‌شوند.



شکل (۲): مدل فرآيند برش عمودي (تراشکاري) در مدلسازي المان محدود

در اين مقاله تنش سيلان جنس قطعه‌کار تابعي از کرنش،

نرخ كرنش و دما (با در نظر گرفتن اثر كرنش هاي بزرگ، نرخ كرنش و دماي برش مرتبط با خواص قطعه‌كار) در نظر گرفته شد. فرآيند برش از ابتدا تا حالت پايدار، به كمك حركت گام به گام ابزار برش شبيه‌سازي شد. در اين مدل، معيار جدايش براده بر اساس يك فاصله بحراني از نوك ابزار فرض شد كه اين كار با به كارگيري كد نرم افزار مارک توسط زير برنامه منطقه‌بندي (تجديد مش) تنظيم مي‌شوند انجام شد. شكل براده، ميدان هاي دما، توزيع تنش، كرنش و نرخ كرنش در براده، قطعه‌كار و ابزار تعيين شدند. در جدول (۱) پارامترهاي تجديد مش مربوط به مدلسازي تشكيل براده نشان داده شده است. شايان ذكر است كه مقدار اين پارامترها در كل فرآيند ثابت است و از طريق روش آزمون و خطا، اين عوامل به عنوان بهترين پارامترها انتخاب شدند.

جدول (۱): مشخصات پارامترهاي تجديد مش

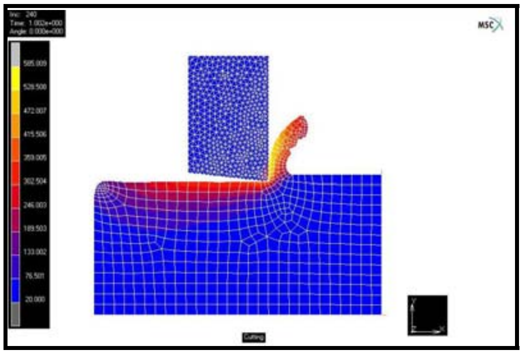
پارامترهاي تجديد مش بندي	
روش تجديد مش بندي	مش مربعي پيش رونده
فركانس جابه جايي	۱
طول لبه المان (ميليمتر)	۰/۱۱٦۲۵
مينيمم طول لبه المان (ميليمتر)	۰/۰۲۳۲۵
زاويه گوشه (درجه)	۱۲۰
كنترل تقسيم بندي منحني	۳۶
نسبت هموار سازي	۰/۵

مدل المان محدود به كار رفته در نرم افزار سوپر فرم و چگونگي تشكيل براده و توزيع حرارت در ابزار در شكل(۳) نشان داده شده است.

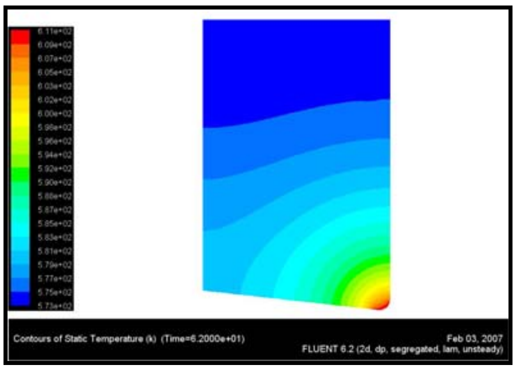
۳-۲- مدلسازي انتقال حرارت در ابزار توسط نرم افزار فلوئنت[۷]

دماي نودهاي سطح تماس ابزار و براده به همراه شار حرارتي اين نودها كه از نرم افزار سوپر فرم به دست آمده است، به عنوان شرايط اوليه براي آناليز انتقال حرارت در نرم افزار فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته است. مدت زمان آناليز براي نزديک شدن به شرايط تجربي ٦۰ ثانيه در نظر گرفته شده است كه پس از گذشت مدت زمان ۳۰ ثانيه توزيع دما در ابزار ثابت مي‌شود. براي مقايسه دماي شبيه‌سازي شده در نرم افزار با دماي دوربين مادون قرمز مي‌توان از نتايج فرآيند تشكيل براده استفاده كرد اما در مورد ترموكوپل كه در فاصله ۰/۵ ميليمتري از سطح ابزار واقع است بايد از نتايج آناليز انتقال حرارت نرم افزار فلوئنت استفاده شود؛ زيرا مدت زمان فرآيند تشكيل براده براي انتقال دما به كل ابزار، بسيار كوتاه است.

شكل(٤) توزيع دما در ابزار كاربايدي را پس از آناليز انتقال حرارت نشان مي‌دهد.



شكل (۳): فرآيند تشكيل براده و توزيع دما در نرم افزار سوپر فرم با ابزار كاربايدي(اينسرت مثلثي شكل) و زاويه براده صفر درجه



شكل (٤): توزيع دما در آناليز انتقال حرارت با استفاده از نرم افزار فلوئنت با ابزار كاربايدي(اينسرت مثلثي شكل) و زاويه براده صفر درجه

۴- آزمايش تجربي

در اين مطالعه دو روش براي بررسي دماي ابزار مطرح شده است:

- روش ترموكوپل جايگذاري شده در ابزار
- روش ترمومتر مادون قرمز

در ادامه ابتدا وسايل و تنظيمات آزمايش شرح داده مي‌شود و سپس هر كدام از روش ها به تفضيل بررسي شده است.

٤-۱- نمونه آزمايش

در هر دو روش شرايط آزمايش يكسان است. براي بالا بردن دقت كار و ايجاد شرايط تراش متعامد از یک لوله به جنس ST37 به قطر ۱۱۰ ميليمتر و ضخامت ديواره ۵ ميليمتر استفاده شد و در ابتدا براي افزايش دقت و يكنواختي ضخامت لوله، روتراشي و داخل تراشي بر روي آن صورت گرفت و به قطر و ضخامت مورد نظر رسانده شد. شايان ذكر است كه كل بار در یک مرحله برداشته شده است. تمامي آزمايش‌ها در

دماي حدود ۱۸ درجه سانتيگراد انجام شده است.

٤-۲- ابزار تراش و ماشين تراش

اينسرت بدون پوشش كه طول هر ضلع آن ۱۳ ميليمتر است، براي اين آزمايش ها استفاده شد. اين ابزار بدون براده شكن و داراي زاويه براده صفر و زاويه آزاد ٤ درجه است. بر طبق استاندارد ISO اين ابزار بين گريدهاي P10 و P20 است. ابزار درون كلگي ديناموتر محكم مي‌شود. اين كلگي در زاويه ۹۰ نسبت به قطعه‌كار قرار گرفته و شرايط تراش عمودي را فراهم مي‌سازد. ماشين تراش مورد استفاده در اين آزمايش‌ها مدل ساگاز[6] *SZ-250* ساخت شركت نارديني برزيل در سال ۱۹۸٤ است.

٤-۳- ديناموتر شامل ترموكوپل

براي اندازه‌گيري دو جزء نيروي ماشينكاري(نيروي برش و پيشروي) به همراه دما، از يک ديناموتر حاوي سيستم اندازه‌گيري دما استفاده شد. اين دستگاه داراي كلگي مخصوص براي اندازه‌گيري دما است كه داراي يک ترموكوپل ميله‌اي مدل K به قطر تقريبي ۰/۵ ميليمتر است. محدوده اندازه‌گيري دما توسط اين سنسور از ۳۰- تا ۷۰۰+ درجه سانتيگراد و ابعاد آن در حدود (٦۰*٦۰*۲۲۰) ميليمتر با وزن تقريبي ۵۰ نيوتن است. در شكل (۵) نماي روبه‌روي اين وسيله به همراه سنسور دما نشان داده شده است.

شكل (۵): ديناموتر حاوي سيستم اندازه‌گيري دما به همراه سنسور

٤-٤- سوراخكاري دقيق ابزار كاربايدي

براي جاسازي دقيق سنسور ترموكوپل در داخل ابزار كاربايدي، لازم است كه در موقعيت مورد نظر، يک سوراخ به اندازه قطر خارجي سيم ترموكوپل (حدود ۰/۵ ميليمتر) به روش اسپارک در ابزار ايجاد شود كه فاصله انتهاي سوراخ از سطح ابزار در حدود ۰/۵ ميليمتر است. جهت سهولت در انتقال حرارت بين ابزار و ترموكوپل از خمير هيت‌سينک[8] استفاده شد. بايد توجه داشت كه سوراخ ايجاد شده در ابزار بايد تا حد امكان كوچک باشد تا موجب آشفتگي شار حرارتي در ابزار نشده و نتايج به دست آمده به واقعيت نزديک تر باشد. موقعيت ترموكوپل در ابزار و سوراخ ايجاد شده در ابزار كاربايدي در شكل (٦) نشان داده شده است.

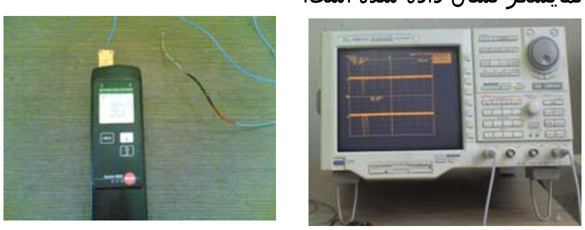
شكل (٦): موقعيت ترموكوپل و سوراخ ايجاد شده در ابزار

٤-۵- اسيلسكوپ ديجيتال حافظه دار

براي ثبت روند افزايش دما در حين عمل برش، لازم است كه از يک وسيله ثبت ديجيتال استفاده شود كه امكان داده-برداري همزمان را داشته و داراي حافظه ثبت اطلاعات باشد. وسيله‌اي كه براي اين كاربرد مورد استفاده قرار گرفت، اسيلوسكوپ ديجيتال حافظه‌دار ساخت كشور ژاپن، مدل يوكوگاوا[9] *DL-4200* است. اين وسيله قابليت ثبت اطلاعات را دارد و با استفاده از ديسكت مي‌توان اطلاعات را جابه‌جا كرد و در نرم‌افزار مطلب[9] اطلاعات ثبت شده با توجه به يک تابع تبديل به درجه حرارت تبديل مي‌شود. در شكل (۷) نمايي از اين دستگاه نشان داده شده است.

۴-۶- نمايشكر ترموكوپل مدل K

به منظور نشان دادن دماي ترموكوپل ميله‌اي مدل K از نمايشگر *تستو*[10] *۹۲۲* استفاده شد كه داراي دو ورودي براي ثبت دما است. از اين ترموكوپل براي مقايسه و انجام كاليبراسيون دوربين استفاده شده است. در شكل (۷) اين نمايشگر نشان داده شده است.



شكل (۷): اسيلسكوپ ديجيتال حافظه‌دار و نمايشگر ترموكوپل

٤-۷- دوربين مادون قرمز

تحقيقات زيادي براي استفاده از تكنيک اندازه‌گيري دما از طريق انتشار اشعه مادون قرمز صورت گرفته است. اين تكنيک داراي مزاياي بسياري نسبت به ساير روش ها است؛ زيرا اكثر جنس هاي ابزار برش مثل سراميک‌ها كه در ماشينكاري سرعت بالا استفاده مي‌شوند، داراي خواص تردي و مقاومت الكتريكي فوق العاده هستند و لذا استفاده از سنسورهاي تماسي مثل

ترموکوپل‌هاي جايگذاري شده در ابزار (براي اندازه‌گيري دماي محل تماس ابزار- براده) مشکل است. اين روش در واقع يک تکنيک غير تماسي براي اندازه‌گيري دماي بدنه اجسام بر اساس انرژي گرمايي ساطع شده است[۸]. شکل (۸) اين دوربين و موقعيت اندازه گيري (موقعيت۱ در کنار براده) را نشان مي‌دهد.

شکل (۸): دوربين مادون قرمز

۴-۸- تنظيمات آزمايش تجربي

در هر آزمايش از دو روش اندازه‌گيري به طور همزمان استفاده شد که در اين صورت به نتايج مقايسه‌اي خوبي مي‌توان دست يافت.

براي قرار دادن دوربين بر روي ماشين تراش، نياز به مکانيزمي بود که دوربين ثابت نگه داشته شود تا از خطاهاي لرزش دست و غيره محفوظ بماند. براي اين منظور، از يک پايه ساعت به عنوان پايه دوربين استفاده شد و با طراحي يک بوش، دوربين به پايه ساعت متصل شد. مزيت اين کار آن است که پايه ساعت قابليت تنظيم در تمام جهات را داراست و از طرفي اين پايه مغناطيس است و در هر جاي دستگاه که لازم باشد مي‌توان آن را نصب کرد؛ بدين ترتيب مي‌توان با روش آزمون و خطا، بهترين موقعيت دوربين را براي ثبت دماي ابزار پيدا کرد که اين تنظيمات در شکل (۹) نشان داده شده است.

شکل (۹): تنظيمات جهت آزمايش تجربي

به منظور اطمينان از عملکرد صحيح دوربين، داده‌هاي آن با داده‌هاي مربوط به ترموکوپل سرتخت ميله‌اي مدل K مقايسه شد و با انجام ۵ آزمايش در سرعت هاي برش مختلف، دقت دوربين بررسي شد. روش تست بدين صورت است که دوربين، نور مادون قرمز را به نقطه‌اي نزديک منطقه برش ابزار مي‌تاباند و در همان نقطه يک ترموکوپل ميله‌اي نيز قرار دارد و به اين ترتيب مي‌توان نتايج حاصل از اين دو روش را با يکديگر مقايسه کرد. تمام مواد بر اثر دمايشان انرژي حرارتي ساطع مي‌نمايند. انرژي ساطع شده با استفاده از قانون استفان بولتزمن به شرح زير است:

$$q_e = \varepsilon \sigma T^4 \qquad (1)$$

که در اين رابطه

ε ضريب انتشار جسم

σ برابر $5.675\times10^{-8}\left(W/m^2K^4\right)$

T دماي جسم

در اين دوربين پارامتر ε که مربوط به مواد گوناگون مي‌باشد قابل تنظيم است. در اين سري از آزمايش‌ها، $\varepsilon = 0.3$ و فاصله دوربين از محل برش در حدود ۱۲۰ ميليمتر است که به عنوان مقدار بهينه در نظر گرفته شده است. اين نتيجه با توجه به مقايسه بين نتايج حاصل از اندازه‌گيري درجه حرارت توسط دوربين در εهاي مختلف و درجه حرارت حاصل از ترموکوپل ميله‌اي به دست آمده است. حال با توجه به توضيحات داده شده، تجهيزات اندازه‌گيري مونتاژ مي‌شوند. شايان ذکر است که با توجه به قابليت ثبت داده‌هاي دوربين، از يک کامپيوتر قابل حمل استفاده شده است که نرم افزار دوربين بر روي آن نصب شده و به صورت روي خط[11] (آنلاين) مي-توان داده‌برداري را انجام داد.

۵- بررسي نتايج آزمايشهاي تجربي

۵-۱- آزمايش اول

بررسي اثر سرعت برش بر دماي ابزار کاربايدي

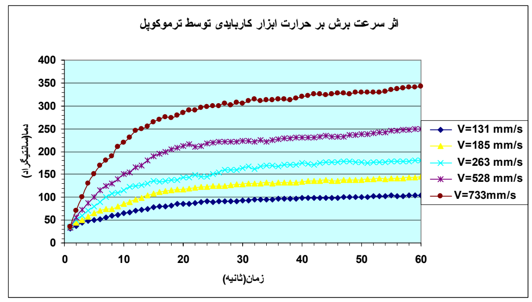
در اين آزمايش کليه پارامترهاي ماشينکاري مقادير ثابتي در نظر گرفته شده و تنها با تغيير دور محور و با توجه به قطر قطعه کار مقادير مختلف سرعتهاي برشي به دست آمد. مقادير پارامترهاي ماشينکاري و زواياي ابزار طبق جداول (۲) است.

جدول (۲): شرايط آزمايش براي بررسي اثر سرعت برش

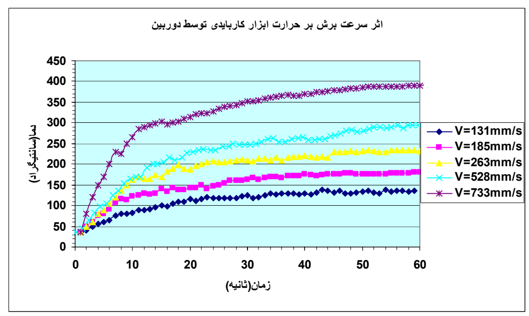
پارامترهاي آزمايش سرعت برشي	
مشخصات ابزار	اينسرت کاربايدي
زاويه براده	صفر درجه
زاويه آزاد	۴ درجه
مشخصات قطعه کار	فولاد ST37
سرعت برش (متغير)	۱۳۱، ۱۸۵، ۲۶۳، ۵۲۸، ۷۳۳ mm/s
پيشروي	۰/۰۸ mm/rev
عمق برش	۱/۵ mm

نتايج به دست آمده توسط ترموکوپل و دوربين در شکل-هاي (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. محور افقي، محور زمان

بوده و زمان داده‌برداري را نشان مي‌دهد. زمان كل داده‌برداري ٦٠ ثانيه است كه به ازاي هر ثانيه يک داده برداشت شده است. محور عمودي نيز مربوط به مقدار حرارت اندازه‌گيري شده در داخل ابزار است. مشاهده مي‌شود كه در شروع آزمايش، مقدار دما با يک شيب نسبتاً تند افزايش و با گذشت زمان، شيب منحني كاهش مي‌يابد و به مقدار صفر و يا شيبي در حد صفر مي‌رسد.



شكل(١٠): دماي ابزار كاربايدي در سرعتهاي برش مختلف (ترموكوپل)



شكل (١١): دماي ابزار كاربايدي در سرعتهاي برش مختلف(دوربين)

در ادامهٔ فرآيند ماشينكاري با تغيير هندسهٔ ابزار برش به علت سايش ابزار و تشكيل لبه انباشته، افزايش بيشتر حرارت را خواهيم داشت ولي در آزمايش‌هاي انجام شده با توجه به اينكه تمامي لبه‌هاي برنده براي بار اول مورد استفاده قرار گرفته‌اند (هر اينسرت داراي سه لبه است) و از طرفي با توجه به كم بودن زمان آزمايش، ابزارها به اين مرحله از فرسايش نمي-رسند و حرارت هاي ايجاد شده را مي‌توان فقط ناشي از پارامترهاي ماشينكاري تنظيم شده دانست. نكته ديگر اينكه دماي ثبت شده توسط دوربين تقريباً در حدود ۵۰ درجه بالاتر از دماي ترموكوپل است و دليل اين تفاوت آن است كه ترموكوپل دماي نقطه‌اي به فاصله ۰/۵ ميليمتر از سطح ابزار را اندازه مي‌گيرد؛ در صورتي كه دوربين دماي نقطه‌اي نزديک به منطقه برش بر روي سطح ابزار را ثبت مي‌كند.

۵-۲- آزمايش دوم

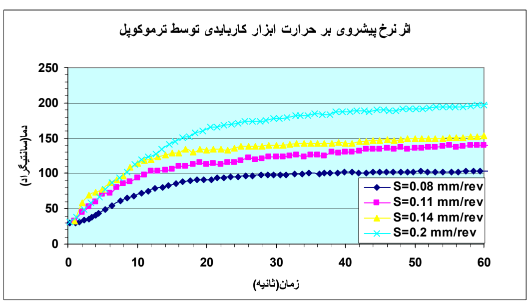
بررسي اثر نرخ پيشروي بر دماي ابزار كاربايدي

در اين آزمايش‌ها با ثابت نگاه داشتن كليه پارامترهاي ماشينكاري و تغييرات نرخ پيشروي، مقادير دماي ايجاد شده در داخل قلم توسط رايانه ثبت گرديد. در اين آزمايش‌ها مقادير پارامترهاي ماشينكاري و زواياي ابزار بر طبق جدول (۳) است.

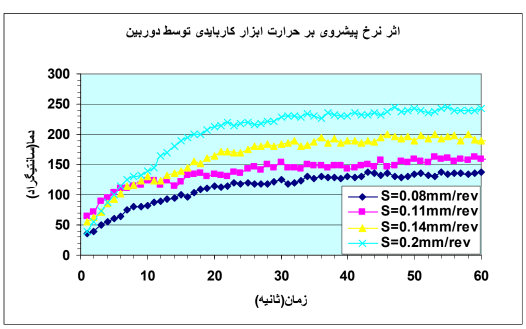
جدول (۳): شرايط تست براي بررسي اثر نرخ پيشروي

پارامترهاي آزمايش پيشروي	
مشخصات ابزار	اينسرت كاربايدي
زاويه براده	صفر درجه
زاويه آزاد	۴ درجه
مشخصات قطعه كار	فولاد ST37
سرعت برش	۱۳۱ mm/s
پيشروي (متغير)	۰/۰۸، ۰/۱۱، ۰/۱۴، ۰/۲ mm/rev
عمق برش	۱/۵ mm

نكته مهم در اين آزمايش اين است كه دماي نهايي يا دماي تعادل ابزار از آزمايش قبل كمتر بوده، اثر پيشروي در توليد حرارت نسبت به سرعت برشي كمتر به نظر مي‌رسد. نتايج به دست آمده از اين آزمايش توسط دوربين و ترموكوپل بر روي ابزار كاربايدي در شكل‌هاي (۱۲) و (۱۳) آمده است.



شكل (۱۲): دماي ابزار كاربايدي در پيشروي‌هاي مختلف (ترموكوپل)



شكل (۱۳): دماي ابزار كاربايدي در پيشروي‌هاي مختلف (دوربين)

۵-۳- آزمايش سوم

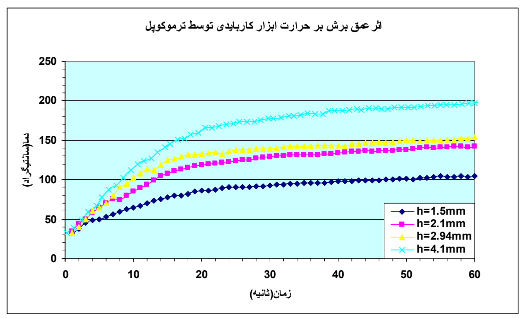
بررسي اثر عمق برش بر دماي ابزار كاربايدي

در آزمايش سوم با ثابت نگاه داشتن همه پارامترهاي ماشينكاري و تغيير در عمق برش، اثرات تغيير عمق برش بر حرارت ايجاد شده، مورد بررسي قرار گرفت. در اين آزمايش‌ها مقادير پارامترهاي ماشينكاري و زواياي ابزار بر طبق جدول (٤) است.

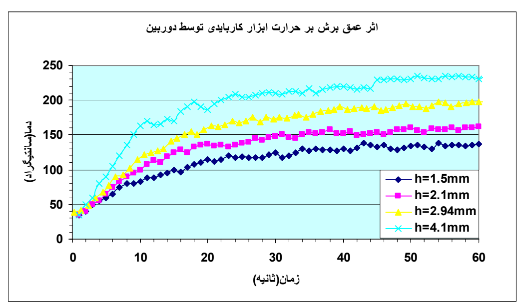
جدول (٤): شرايط تست براي بررسي اثر عمق برش

پارامترهاي آزمايش عمق برش	
مشخصات ابزار	اينسرت كاربايدي
زاويه براده	صفر درجه
زاويه آزاد	۴ درجه
مشخصات قطعه كار	فولاد ST37
سرعت برش	۱۳۱ $^{mm}/_{s}$
پيشروي	۰/۰۸ $^{mm}/_{rev}$
عمق برش (متغير)	۱/۵ ،۲/۲،۱/۹۴ ،۴/۱ mm

نتايج به دست آمده از اين آزمايش توسط دوربين و ترموكوپل بر روي ابزار كاربايدي در شكل‌هاي (١٤) و (١٥) آمده است.



شكل (١٤): دماي ابزار كاربايدي در عمق‌هاي برش مختلف (ترموكوپل)



شكل (١٥): دماي ابزار كاربايدي در عمق‌هاي برش مختلف (دوربين)

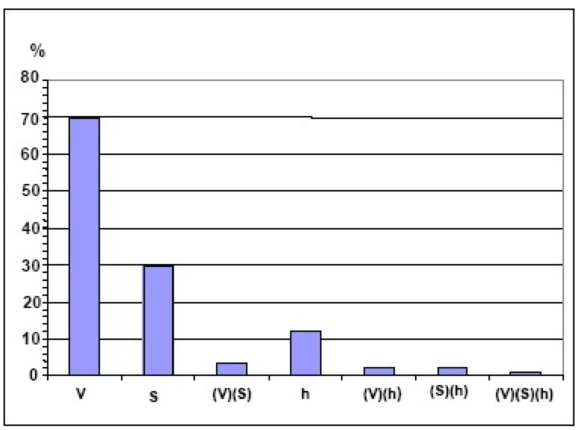
نكته مهم در اين آزمايش اين است كه دماي نهايي يا دماي تعادل ابزار از آزمايش قبل كمتر بوده، همچنين شيب دمايي بسيار كمتر است و اين بيانگر اين مسأله است كه اثر عمق برش در توليد حرارت نسبت به سرعت برشي و نرخ پيشروي كمتر به نظر مي‌رسد.

٦- بررسي اثرات عوامل ايجاد حرارت در ابزار توسط تكنيك طراحي آزمايش[12]

فرض شده است كه تنها عوامل مؤثر بر ايجاد حرارت در ابزار، پارامترهاي سرعت برش، مقدار پيشروي و عمق برش باشند. در اينجا سه پارامتر ماشينكاري يا سه عامل و دو سطح براي هر عامل تعريف شده است. با توجه به تعداد عوامل (سه عامل) و تعداد سطوح در نظر گرفته شده (دو سطح)، از طرح "عامل كامل[13]" استفاده شد. شايان ذكر است كه هر كدام از عوامل سطح دوم نسبت به سطح اول در حدود ٤٠ درصد بيشتر در نظر گرفته شده است. نمودار ميله‌اي اثر هر عامل در شكل(١٦) نشان داده شده است.

جدول (٩): سطوح و مقادير هر عامل

پارامترها	سطح اول (-)	سطح دوم (+)
سرعت برش	۱۱/۱ $^{m}/_{min}$	۱۵/۸ $^{m}/_{min}$
پيشروي	۰/۱۱ $^{mm}/_{rev}$	۰/۱٤ $^{mm}/_{rev}$
عمق	۲/۱ mm	۲/۹٤ mm



شكل (١٦): نمودار ميله‌اي مقادير اثر هر عامل در ايجاد حرارت ابزار

با توجه به نتايج به دست آمده از شكل (١٦) مشخص مي-شود كه اثر سرعت برش بر حرارت ايجاد شده در ابزار بسيار بيشتر از نرخ پيشروي است و از طرفي فاصله زيادي بين اثر سرعت برشي با اثرات عوامل ديگر به وجود آمده است. اين مسأله نشان دهنده اهميت اين عامل در ايجاد حرارت در ابزار و به خصوص در سرعتهاي برشي بالا است و مؤيد نظريه تيلور

در مورد اثر سرعت برشي بر عمر ابزار به عنوان مهم ترين عامل تعيين كننده عمر ابزار است. با توجه به نتايج به دست آمده از آزمايش هاي فوق، معادله پيش‌بيني دماي ايجاد شده در ابزار توسط عوامل مورد آزمايش به قرار زير است[۹]:

$$T = \bar{T} + \left(\frac{\Delta V}{2}\right)V + \left(\frac{\Delta S}{2}\right)S + \left(\frac{\Delta h}{2}\right)h + \left(\frac{\Delta VS}{2}\right)VS \qquad (۲)$$

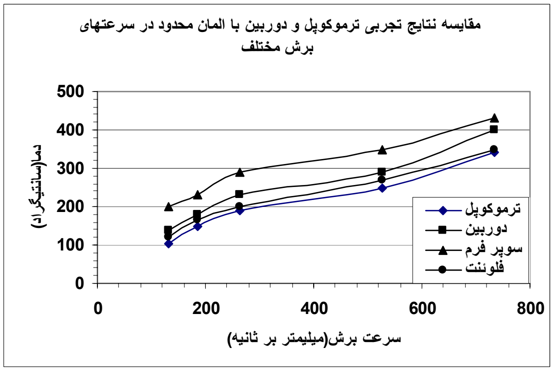
از آنجايي كه اثرات عوامل متقابل Sh،Vh و VSh بسيار كم است براي سادگي معادله، اثرات آنها در معادله لحاظ نمي‌شود. در اين معادله T مقدار دماي پيش‌بيني شده و $\bar{T}$ ميانگين تمام دماهاي به دست آمده در آزمايش است و $\frac{\Delta}{2}$ مقادير نيم اثر هر كدام از عوامل است؛ بدين ترتيب معادله پيش‌بيني فوق به صورت زير نوشته مي‌شود:

T= ۱۹۰/۲ + (۳٤/۸۷)V+ (١٤/٧)S + (٥/٩٦)h + (١/٦٢)VS (۳)

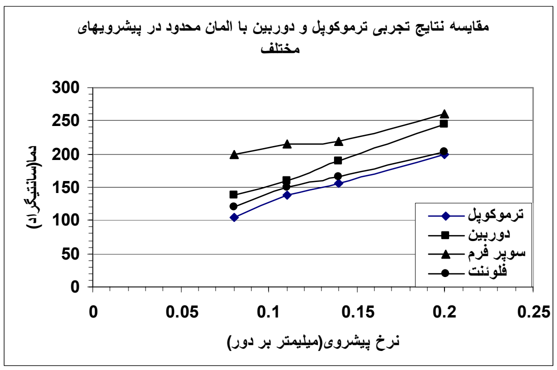
حال با اين معادله مي‌توان در صورت نياز به حفظ دما در يک محدوده خاص كه عمدتاً در ماشينكاري خشک مطرح است، با قرار دادن مقدار دما در يک سمت معادله و با انتخاب سطوح مشخص دو پارامتر مثلاً V و S مقدار پارامتر ديگر را كه عمق براده برداري h است را به دست آورد. با توجه به طراحي آزمايش ها مشاهده مي شود كه تاثير سرعت برشي بيشتر از پيشروي و پيشروي بيشتر از عمق بر روي افزايش درجه حرارت است.

۷- بحث و اظهارنظر

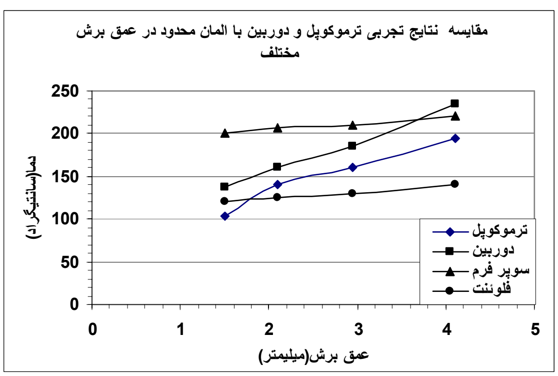
در اين مقاله از دو روش ترموكوپل جايگذاري شده در ابزار و دوربين مادون قرمز براي اندازه‌گيري دماي برش استفاده شد و سپس نتايج آن با آناليز المان محدود كه توسط نرم‌افزارهاي سوپر فرم و فلوئنت انجام شد، مقايسه گرديد. در شكل(۱۷) اثر افزايش سرعت برش بر روي دماي ابزار نشان داده شده است و از طرفي نمودارهاي تجربي و المان محدود با يكديگر مقايسه شده است. در شكل(۱۸) اثر افزايش نرخ پيشروي بر دماي ابزار نشان داده شده است. مشاهده مي‌شود كه شيب نمودار تجربي دما از سرعت برش كمتر است. در شكل(۱۹) اثر افزايش عمق برش بر دماي ابزار نشان داده شده است كه با توجه به نمودار مشاهده مي‌شود كه با افزايش عمق برش شيب نمودار كمتر شده، در عمق هاي برش بالا به سمت شيب صفر ميل مي‌كند. مقدار شيب اين نمودار از سرعت برش و پيشروي كمتر است و اين موضوع بيانگر اثر كمتر عمق برش بر دماي ابزار است.



شكل (۱۷): مقايسه نتايج تجربي و المان محدود در سرعتهاي مختلف



شكل (۱۸): مقايسه نتايج تجربي و المان محدود در پيشروي‌هاي مختلف



شكل (۱۹): مقايسه نتايج تجربي و المان محدود در عمق‌هاي برش مختلف

۸- نتيجه گيري

فرآيند براده‌برداري بسيار پيچيده و پيش‌بيني ناپذير است. به همين دليل پيش‌بيني توزيع دما در سطح تماس ابزار- براده كار بسيار مشكلي است. در اين مقاله دماي ابزار كاربايدي، در برشكاري فولاد ST37 به دو روش ترموكوپل جايگذاري شده در ابزار و دوربين مادون قرمز مورد بررسي قرار گرفت و در انتها نتايج تجربي با نتايج نرم افزارهاي سوپر فرم و فلوئنت

مقايسه گرديد. هدف از اين كار، ايجاد ارتباط بين دماي برش (دماي ابزار) و متغيرهاي اصلي ماشينكاري (سرعت برش، پيشروي و عمق) است كه با توجه به يكسان بودن شرايط در طول آزمايشها نتايج خوبي در اين رابطه به دست آمد كه عبارتند از:

۱- در اين مقاله به دليل پيچيدگي فرآيند براده‌برداري عمودي از دو روش، براي اندازه‌گيري دماي ابزار استفاده شده است. در روش اول، دماي اندازه‌گيري شده توسط ترموكوپل با نتايج نرم افزار فلوئنت در نقطه‌اي به فاصله ۰/۵ ميليمتر از سطح ابزار تطابق خوبي دارد. در اين نرم افزار، پس از گذشت مدت زمان ۳۰ ثانيه، توزيع دما در ابزار تقريباً ثابت مي‌شود كه اين نتيجه با نمودارهاي تجربي دما به خوبي مطابقت دارد. در روش دوم دماي اندازه‌گيري شده در سطح ابزار توسط دوربين مادون قرمز در مقايسه با نرم‌افزار سوپر فرم، اختلاف بيشتري را نشان مي‌دهد؛ و زيرا نقطه اندازه‌گيري دما با دوربين مادون قرمز خارج از منطقه تماس براده با ابزار است در حالي كه نرم افزار سوپر فرم دقيقاً دماي محل تماس براده با سطح ابزار را كه درجه حرارت بيشتري دارد نشان مي‌دهد.

۲- با توجه به طراحي آزمايش ها مشاهده مي شود كه تاثير سرعت برشي بيشتر از پيشروي و پيشروي بيشتر از عمق بر روي افزايش درجه حرارت است. دما در سطح ابزار-براده شديداً تحت تأثير سرعت برش است. براي مثال دما در سرعت 35m/min و عمق 1.5mm در حدود ۲۲۰ درجه سانتيگراد است؛ در صورتي كه در سرعت برش 45m/min اين دما به ۳۰۰ مي‌رسد. درنتيجه با افزايش سرعت برش دماي ابزار به صورت نمايي تغيير مي‌كند.

۳- با استفاده از نتايج تجربي ترموكوپل، فرمول تخمين دماي سطح ابزار ارائه شد كه نشان مي‌دهد اثر افزايش سرعت برش، پيشروي، عمق برش و اثر دو طرفه سرعت برش و پيشروي به ترتيب بيشترين تأثير را بر دماي سطح ابزار دارند.

٤- با توجه به اندازه‌گيري دما توسط سنسور به صورت بي درنگ، مي‌توان دماي ابزار و عمر ابزار را تحت كنترل در آورده، به شرايط ماشينكاري خشك(بدون روانكار) رسيد.

۹- تقدير و تشكر

در پايان از مسئولان كارگاه ماشين ابزار (۲) و آزمايشگاه كامپوزيت دانشگاه صنعتي اميركبير كمال تشكر را داريم.

۱۰- فهرست علائم

a_c	ضخامت براده تغيير شكل نيافته
a_0	ضخامت براده تغيير شكل يافته
h	عمق برش
l_c	طول منطقه تماس ابزار- براده
l_s	طول صفحه برش
q_e	انرژي ساطع شده از جسم
S	پيشروي
T	دما
$\bar{T}$	دماي متوسط
V	سرعت برش
α	زاويه آزاد
γ	زاويه براده
ϕ	زاويه برش
ε	ضريب انتشار جسم

۱۱- مراجع

[۱] Shaw, M. C.; Metal cutting principles, Oxford University Press, 1984.

[۲] Filicie, L. and Umbrello, D.; "On the finite element codes capability for tool temperature calculation in machining processes", Journal of material processing Technology, p.p. 182-190, 2006.

[۳] Silva, M. and Wallbank, J.; "Cutting temperature: prediction and measurement methods a review", J. of material processing, p.p. 195-202, 1999.

[۴] Komanduri, R. and Hou, Z.B.; "A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperature generated in some manufacturting processes and tribology", Tribology International, vol. 34, p.p. 653-682, 2001.

[۵] Korkut, I.; Boy, M. ; KARACAN, I.; Seker, U. , "Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters", Journal materials & design, , vol. 28, p.p. 2329-2335, 2007 .

[۶] Dogu, Y.; Aslan, E.; Camuscu, N. ; "A numerical model to determine temperature distribution in orthogonal metal cutting"Journal of Material processing & Technology, p.p. 171-180, 2005.

[۷] Fleischer, J. and Weule, H.; "Estimation of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method". University of karlsruhe(TH)

[۸] Sullivan , D.O. and , Cotterell, M.; "Temperature measurement in single point turning", Journal of Material processing & Technology, p.p. 301-308, 2001.

[۹] Barrentine, L. ; Design of experiment., Oxford University Press, 1999.

۱۲- زیرنویس ها

[۱] Taylor

[۲] Stephenson

[۳] Moraka

[۴] Shay

[۵] Msc-Superform

[۶] Adaptive Remeshing

[۷] Fluent

[۸] Heat Sink

[۹] Matlab

[۱۰] Yokogawa

[۱۱] Testo

[۱۲] On-line

[۱۳] Design Of Experiment

[۱۴] Full Factorial