پیش‌بینی اثر سرعت‌های برشی و پیشروی بر تنش‌های پسماند در شافت‌های تراش‌کاری شده از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی

عباس فدائی* (استادیار)

میثم سوری (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۳-۲، شماره‌ی ۱، ص. ۱۲۳-۱۳۲، (پادداشت‌ش)

در این پژوهش اثر سرعت برشی و پیشروی بر تنش‌های پسماند در شافت‌های تراش‌کاری شده از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ بررسی شده است. برای تعیین توزیع تنش پسماند از روش پراش اشعه‌ی ایکس و تکنیک الکتروپولیش استفاده شد. همچنین شبیه‌سازی فرایند تراش‌کاری و بررسی تأثیر تغییرات سرعت برشی و پیشروی با استفاده از نرم‌افزار دیفرم^۱ انجام گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمون‌های تجربی اعتبارسنجی شد. سپس با استفاده از داده‌های حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود، از شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تخمین تنش‌های پسماند استفاده شد. در همه‌ی سرعت‌های پیشروی، افزایش سرعت برشی به تنش پسماند افزوده می‌شود. افزایش سرعت پیشروی تا 2 mm/rev باعث افزایش تنش پسماند شده و از این مقدار به بعد افزایش چشم‌گیری مشاهده نشد، که این امر در سرعت‌های بالاتر بیشتر مشهود است.

واژگان کلیدی: تنش پسماند، تراش‌کاری، روش اجزای محدود، شبکه‌ی عصبی مصنوعی.

as.fadaei@gmail.com
sori@basu.ac.ir

۱. مقدمه

پسماند حاصل از تراش‌کاری جنبه‌ی مهمی از درک فرایند و کیفیت نهایی قطعه است.^[۲]

پیش‌بینی و تحلیل تنش‌های پسماند در فرایندهای ماشین‌کاری، یکی از موضوعات مورد توجه پژوهش‌گران دهه‌ی ۱۹۵۰ بوده است. روش‌های استفاده شده بدین منظور شامل آزمایش‌های تجربی، مدل‌های تحلیلی، مدل‌های هوش مصنوعی، مدل‌های اجزای محدود و ترکیبی از روش‌های مختلف است. در چند دهه‌ی اخیر به علت افزایش سریع و چشمگیر قدرت محاسبه‌ی سخت‌افزارها و همچنین محدودیت‌های متعدد در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش تجربی، استفاده از مدل‌های اجزای محدود برای تعیین این تنش‌ها و همچنین بهینه‌سازی شرایط ماشین‌کاری، افزایش یافته است.^[۳] هوآ و همکاران در دو پژوهش^[۴] از نرم‌افزار دیفرم دوبعدی، که بر اساس کد ضمنی لاگرانژی برای شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی فلزات طراحی شده است، در شبیه‌سازی برش متعام AISI ۵۲۱۰۰ استفاده کردند. آن‌ها بر اثر نیروی پیشروی، سختی قطعه‌کار و لبه‌ی برش‌کاری در شکل‌گیری تنش پسماند زیرسطحی در تراش‌کاری خشن تمرکز کردند. نتایج مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و انطباق معقولی بین پیش‌بینی‌های مدل و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد. اغلب تحقیقات به بررسی اثر ماشین‌کاری بر تنش پسماند آزمایشگاهی پرداخته‌اند. اوزیل و

پس از فرایندهای تولیدی نظیر ریخته‌گری و آهنگری، از ماشین‌کاری به عنوان فرایند تولید قطعات صنعتی و نیز عملیات تکمیلی در صنایع مختلف استفاده می‌شود. وجود پدیده‌های فیزیکی پیچیده مانند تغییرشکل‌های بزرگ الاستیک - پلاستیک، شرایط اصطکاکی پیچیده و کوئل حرارتی - مکانیکی ایجاد شده و سازوکارهای جدایش براده، درک چنین فرایندی را مشکل می‌کنند. در کاربردهای مختلف قطعات تراش‌کاری شده، ویژگی‌های سطحی این قطعات تعیین‌کننده‌ی عملکرد مکانیکی آن‌هاست. تنش‌های پسماند ایجاد شده در اثر تراش‌کاری موجب تسریع در شکست قطعه می‌شود. تأثیرات منفی تنش‌های پسماند بر مقاومت خستگی و خوردگی باعث کاهش قابل توجه عمر می‌شود. این تنش‌ها خود تحت تأثیر عواملی همچون ابزار برش، جنس قطعه‌کار، پارامترهای برش - نظیر سرعت برشی، عمق برش و سرعت پیشروی ابزار - شرایط تماسی ابزار - براده و ابزار - قطعه‌کار هستند.^[۱] کارکرد اجزای تراش‌کاری شده به واسطه‌ی تنش‌های پسماند تقویت یا تضعیف خواهد شد. به همین دلیل تعیین تنش‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۲/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۲۲، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۳.

DOI:10.24200/J40.2018.10749.1406

زیرین^[۶] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و مدل ماده جانسون - کوک، فرایند برش عمودی در فولاد AISI ۴۵ را بررسی کرده و توزیع دما، شکل‌گیری براده و روابط اصطکاکی حاکم را تحلیل کردند. لیانگ و سو^[۷] به تحلیل تأثیر پارامترهای برش بر تغییرات توزیع تنش پسماند در فرایند ماشین‌کاری پرداختند. آن‌ها تأثیر افزایش سرعت پیشروی و افزایش شعاع لبه‌ی ابزار را بر افزایش عمق نفوذ تنش‌های پسماند، و همچنین افزایش میزان حداکثر تنش کششی و فشاری در سطح و لایه‌های زیر سطحی را بررسی کردند. مارانا هو و داویم^[۸] به بررسی تأثیر ضریب اصطکاک بر روند تغییر نیروی برشی، دمای تولیدی، تنش‌های پسماند ایجاد شده در فرایند ماشین‌کاری فولاد ضدزنگ AISI ۳۱۶ L پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مدل اصطکاکی تا حد زیادی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود تأثیر می‌گذارد. کاروسو و همکاران^[۹] اثر پارامترهای برش و کیفیت سطح بر توزیع تنش‌های پسماند حاصل از خشن‌تراشی را به شکل تجربی مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که هندسه‌ی ابزار و سختی قطعه‌کار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مکان ایجاد بیشترین تنش پسماند فشاری می‌گذارد. بی و همکاران^[۱۰] تأثیر افزایش سرعت برشی در فرایند ماشین‌کاری در فولاد AISI ۴۵ را بررسی کردند. آن‌ها بیشتر بر تغییر خواص میکروساختاری، میکروسختی و کیفیت سطح تمرکز کردند. در این تحقیق نشان داده شد که در غیاب تغییرات شیمیایی، توزیع تنش پسماند به ترکیبی از بارگذاری‌های وابسته است. موتو و همکاران^[۱۱] با تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار دیفرم دوبعدی به بررسی فرایند ماشین‌کاری متعامد در سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. آن‌ها نشان دادند که زاویه‌ی پیشانی مثبت در ابزار عامل افزایش تنش‌های کششی، و زاویه‌ی منفی باعث ایجاد تنش‌های فشاری بیشتر می‌شود. همچنین افزایش شعاع لبه ابزار باعث کاهش میزان تنش‌های فشاری می‌شود. آبود و همکاران^[۱۲] تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری نهایی در قطعه‌ی Ti - ۶Al - ۴V مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای پیش‌بینی تنش‌های پسماند، از نرم‌افزار اجزای محدود دیفرم دوبعدی استفاده کردند. در این پژوهش، نتایج مطالعه‌ی تجربی برای بررسی اثر نرخ تغذیه و سرعت برشی، توافق خوبی با نتایج شبیه‌سازی نشان داد. اوترو و همکاران^[۱۳] به تحلیل اجزای محدود تنش‌های پسماند ناشی از ارتعاشات ابزار در عملیات ماشین‌کاری پرداختند. تنش‌های پسماند ایجاد شده در قطعه‌کار به روش پراش نوترونی اندازه‌گیری شد. این پژوهش نشان داد، تحلیل‌های اجزای محدود قادر به ایجاد نتایج نسبتاً جامعی در پیش‌بینی تنش‌های پسماند حاصل از ماشین‌کاری هستند. سورابا و سوهاس^[۱۴] مدلی تحلیلی برای تعیین تنش پسماند حاصل از فرایند ماشین‌کاری متعامد در فولاد AISI ۴۵ ارائه کردند. آن‌ها در بررسی خود دریافتند که افزایش سرعت برشی سبب افزایش تنش‌های پسماند کششی در سطح و فشاری در لایه‌های زیرسطحی می‌شود. جی و همکاران^[۱۵] یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی تنش‌های پسماند، در شرایط ماشین‌کاری تحت روان‌کاری ترکیبی آمیخته از هوا و روغن ارائه کردند. آن‌ها تأثیرات عواملی از جمله پارامترهای برش، هندسه ابزار، خواص مواد و میزان نرخ روان‌کاری در ایجاد تنش‌های پسماند روی لوله‌ی از آلیاژ TC۴ را بررسی کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از آزمایش‌های تجربی ارزیابی و مطابقت نسبی خوبی مشاهده شد. هوآنگ و همکاران^[۱۶] از یک روش تحلیلی برای پیش‌بینی تنش پسماند حاصل از ماشین‌کاری متعامد استفاده کردند. در این پژوهش یک رابطه‌ی تحلیلی برای تنش پسماند بر اساس کرنش‌های پلاستیک موضعی ارائه شده است. نتایج آزمون‌های تجربی مؤید شبیه‌سازی و نتایج تحلیلی است. پاریدا و مایتی^[۱۷] با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود، اثر تغییر شعاع نوک ابزار بر نیروها، درجه‌ی حرارت تراش‌کاری و تنش در عملیات تراش‌کاری داغ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را مطالعه کردند. در این پژوهش نشان داده شده است که با

افزایش شعاع نوک ابزار، نیروهای برش و محوری نیز افزایش می‌یابند. نتایج مطالعه‌ی تجربی توافق خوبی با نتایج مدل‌سازی اجزای محدود را نشان می‌دهند. کورتا باریا و همکاران^[۱۸] در خصوص تنش‌های پسماند حاصل از ماشین‌کاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ مطالعه کردند. آن‌ها از یک مدل دو بعدی اجزای محدود متعامد در خصوص مطالعه اثر پارامترهای ورودی مدل در پیش‌بینی تنش‌های پسماند استفاده کردند. این پژوهش نشان داد که تنها قانون بقا ماده برای پیش‌بینی تنش‌های پسماند قابل توجه است. شارما و پاندی^[۱۹] با استفاده از تکنیک پراش اشعه‌ی ایکس، اثر نرخ پیشروی، عمق براده‌برداری، سرعت برشی و درصد شدت توان فراصوت بر ایجاد تنش پسماند در تراش‌کاری فولاد سخت‌کاری شده ۴۳۴۰ را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تأثیر درصد شدت توان و نرخ پیشروی در ایجاد تنش پسماند قابل توجه‌تر است. داوود و همکاران^[۲۰] با انجام آزمون‌های ماشین‌کاری متعامد در زوایای شیب^۲ مختلف ابزار، سه دسته‌ی متفاوت از ثابت‌های مادی جانسون - کوک را تعیین کرده و از آن‌ها در مدل‌سازی اجزای محدود، برای شبیه‌سازی رفتار آلیاژ Ti - ۲۴ - ۲۴ در عملیات ماشین‌کاری با سرعت بالا استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که توزیع تنش پسماند بیش از توزیع دما به ثوابت جانسون - کوک حساسیت دارد.

در این پژوهش اثر سرعت‌های برشی و پیشروی بر تنش‌های پسماند در شافت‌های تراش‌کاری شده از جنس فولاد AISI ۴۵ بررسی شده است. برای تعیین توزیع تنش پسماند از روش پراش اشعه‌ی ایکس و تکنیک الکتروپولیش استفاده شد. همچنین شبیه‌سازی فرایند تراش‌کاری و بررسی تأثیر تغییر سرعت‌های برشی و پیشروی با استفاده از نرم‌افزار دیفرم دوبعدی انجام گرفت. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با آزمون‌های تجربی اعتبارسنجی شد. سپس با استفاده از داده‌های حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود، از شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تخمین تنش‌های پسماند استفاده شد. این رویکرد که به توان تنش‌های پسماند را بر اساس شبکه‌ی عصبی مصنوعی تخمین زد، از جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر است.

۲. مطالعه‌ی تجربی

۲.۱. آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی

به منظور تعیین خواص مکانیکی شافت فولادی انتخاب شده در این پژوهش، آزمون کشش ساده انجام شد. در شکل ۱ نمونه‌ی کشش پس از آزمون نشان داده شده است. برای کنترل تکرارپذیری نتایج آزمون، سه نمونه آزمایش شد که میانگین و انحراف معیار مشخصات مکانیکی حاصل از آزمون‌ها به همراه مقادیر متناظر استاندارد برای فولاد AISI ۴۵^[۲۱] در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌ی مورد نظر برای تعیین درصد عناصر آلیاژی تشکیل‌دهنده‌ی فولاد، تحت آزمون اسپکترومتری قرار گرفت (شکل ۲). نتایج آزمون به همراه مقادیر متناظر استاندارد^[۲۱] در جدول ۲ آورده شده

شکل ۱. نمونه‌ی آزمون کشش بعد از آزمایش.

شکل ۳. نمونه‌ی آزمایشی در دستگاه پراش اشعه‌ی ایکس برای اندازه‌گیری تنش پسماند.

بلوری کرنش الاستیک ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر تنش پسماند در فلز، در صورتی که کم‌تر از استحکام تسلیم ماده باشد، توسط کرنش بین اتمی تحمل می‌شود. روش پراش اشعه‌ی ایکس برای سنجش کرنش ناشی از تنش که باعث تغییر در فواصل اتم‌ها و صفحات کریستالی می‌شود، کاربرد دارد. انکسار اشعه‌ی ایکس می‌تواند فاصله‌ی بین اتمی را مستقیماً اندازه‌گیری کند، به طوری که این فاصله نشان‌دهنده‌ی میزان کرنش الاستیک در سطح نمونه‌ی آزمایشی است. تنش‌های پسماند با استفاده از داده‌های کرنش و نیز معلوم بودن ثوابت الاستیک ماده و روابط تنش - کرنش الاستیک محاسبه می‌شود.

در مطالعه‌ی حاضر، اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش اشعه‌ی ایکس انجام گرفت. به این منظور از دستگاه پراش اشعه‌ی ایکس ساخت شرکت فیلیپس در مجتمع آزمایشگاهی فناوری نانوکفا استفاده شد. تیوب اشعه‌ی ایکس دستگاه فوق، آندی از جنس مس دارد و ولتاژ ژنراتور آن ۴۰ کیلوولت و شدت جریان آن ۴۰ میلی‌آمپر است. در شکل ۳ نمونه در دستگاه به هنگام اندازه‌گیری تنش پسماند نشان داده شده است. تنش‌های تعیین شده به کمک پراش اشعه‌ی ایکس، میانگین ریاضی تنش در حجمی از ماده است که توسط ناحیه‌ی مغیری از سانتی‌متر مربع تا میلی‌متر مربع و عمق نفوذ پرتو تعریف می‌شود. ضریب جذب خطی ماده که برای تشعشع به کار گرفته می‌شود، عمق نفوذ را تعیین می‌کند که ممکن است به مقدار قابل ملاحظه‌ی تغییر کند. برای آلیاژهای آهن، نیکل و آلومینیوم، ۵۰٪ تابش از لایه‌ی تقریباً در عمق ۰/۰۰۵ میلی‌متری پراکنده می‌شود. این عمق کم‌نفوذ نسبت به تکنیک‌های دیگر، تعیین تنش‌های پسماند ماکرو و میکرو را به صورت تابعی از عمق و با رزولوشن ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر می‌سازد. اگرچه طبق اصول می‌توان از هر کدام از فواصل میان صفحه‌ی برای اندازه‌گیری کرنش در شبکه‌ی کریستالی استفاده کرد، اما محدودیت طول موج‌های تولید شده توسط دستگاه‌های تجاری اشعه‌ی ایکس، انتخاب صفحات کریستالی را محدود می‌کند. انتخاب یک قله‌ی ۴ پراش برای اندازه‌گیری تنش پسماند بر دقت روش تأثیر قابل توجهی دارد. در این مطالعه برای چند نقطه‌ی مختلف روی سطح، تنش پسماند اندازه‌گیری شده که در هر مورد با عملیات الکتروپولیش سطحی، ضخامت مشخصی از سطح مورد نظر را برداشته و سپس فرایند تعیین تنش روی سطح تازه ایجاد شده تکرار شد. لایه‌برداری از سطح نمونه در شرکت آبکاری میناب انجام گرفت. در عملیات الکتروپولیش سطحی، نمونه را در یک مخزن قرار داده و الکتروپولیش روی آن پمپاژ شد. سپس در یک بازه زمانی مشخص با اعمال ولتاژ، مقدار مشخصی از ماده برداشته شد. در شکل ۴ نمونه‌ی مورد نظر به هنگام

جدول ۱. خواص مکانیکی فولاد از آزمون کشش و مقادیر استاندارد. [۲۱]

خصوصیت	آزمون	انحراف معیار	استاندارد
استحکام تسلیم MPa	۴۲۶	۱۷/۲	۳۰۰-۴۵۰
استحکام نهایی MPa	۷۰۷	۲۹/۴	۵۷۰-۷۲۰
ازدیاد طول نسبی (%)	۲۱	۱/۲	۱۴-۳۰

شکل ۲. نمونه‌ی پس از آزمون اسپکترومتریک.

جدول ۲. درصد عناصر تشکیل‌دهنده‌ی فولاد از آزمون اسپکترومتریک و مقادیر متناظر استاندارد. [۲۱]

عنصر	آزمون	استاندارد
آهن	پایه	پایه
کربن	۰/۴۳۰	۰/۴۲۰-۰/۵۰۰
گوگرد	۰/۰۲۴	بیشینه ۰/۰۳۵
فسفر	۰/۰۱۱	بیشینه ۰/۰۳۵
نیکل	۰/۰۷۰	بیشینه ۰/۴۰۰
مس	۰/۰۹۰	بیشینه ۰/۱۰۰
سیلیسیم	۰/۲۱۰	بیشینه ۰/۴۰۰
منگنز	۰/۰۶۹۰	۰/۰۵۰-۰/۸۰۰
کروم	۰/۱۳۰	بیشینه ۰/۴۰۰

است. با توجه به نتایج آزمون‌ها، در مورد جنس انتخاب شده برای شافت، یعنی فولاد AISI ۴۵، اطمینان حاصل شد.

۲.۲. تهیه و ساخت نمونه‌های آزمایشی

با توجه به مشخصات ماشین تراش‌کاری موجود و محدودیت‌های ابعادی نمونه‌ها در دستگاه پراش اشعه‌ی ایکس، قطر خارجی نمونه‌ها ۴۵ میلی‌متر، طول آن‌ها ۹۰ میلی‌متر و ضخامت جداره در قسمت توخالی نمونه‌ها، که بیانگر عمق برش در تراش‌کاری متعامد است، برابر ۳/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تراش‌کاری نمونه‌ها در سرعت برشی ۱۷۵ متر بر دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۲ میلی‌متر بر دوران قطعه انجام گرفت. برای تراش‌کاری متعامد، امتداد محور ابزار و قطعه‌کار بر هم عمود انتخاب شدند. مشخصات ابزار اینسرتی استفاده شده در عملیات تراش‌کاری در ادامه بیان می‌شود.

۳.۲. اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش اشعه‌ی ایکس

روش پراش اشعه‌ی ایکس، یک روش غیرمخرب متداول برای تعیین تنش پسماند است. ریزساختار فازات بلوری است؛ هرگاه این ماده تحت تنش قرار گیرد، در شبکه‌ی

شکل ۶. مقدار شعاع لبه‌ی ابزار.

جدول ۴. مشخصات هندسی ابزار.

مقدار	مشخصه‌ی ابعادی
۰/۱۵	شعاع لبه mm
۰/۵	زاویه‌ی آزاد ابزار Deg.
-۷	زاویه‌ی پیشانی ابزار Deg.
۸۰۰	مدول یانگ GPa
۴۶	ضریب هدایت حرارتی N/s°C
۲۰۳	گرمای ویژه J/kg°C
۴/۷	ضریب انبساط حرارتی $\mu/m^\circ C$

شکل ۴. عملیات الکتروپولیش نمونه.

شکل ۵. سطح نمونه بعد از الکتروپولیش.

جدول ۳. عمق لایه‌برداری در عملیات الکتروپولیش و مقدار تنش پسماند اندازه‌گیری شده از روش پراش اشعه‌ی ایکس.

عمق μm	تنش پسماند Mpa
۰	۵۲۲/۸
۱۵	۲۴۷/۹
۳۰	-۳۲/۳
۸۵	-۲۷۹/۱
۳۴۰	-۷۳/۰

۳. شبیه‌سازی اجزای محدود

در این بررسی از نرم‌افزار دیفرم دو بعدی برای تحلیل اجزاء محدود استفاده شد. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل انواع مختلف مسائل شکل‌دهی و عملیات حرارتی را دارد. یک ویژگی مهم این نرم‌افزار قابلیت شبکه‌بندی مجدد مناسب به صورت تمام خودکار است که برای مسائل با تغییر شکل‌های بزرگ بسیار مهم است.

۱.۳. مدل‌سازی ابزار

با فرض عدم سایش ابزار به هنگام براده‌برداری، ابزار به عنوان یک جسم صلب در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی ابزار که در مدل‌سازی آن منظور شد در جدول ۴ ارائه شده است. برای مشخصات فیزیکی و مکانیکی ابزار نیز با توجه به جنس آن که از کاتالوگ شرکت سازنده استخراج شد، از اطلاعات موجود و مرتبط در کتابخانه‌ی نرم‌افزار استفاده شد. این مشخصات نیز در جدول ۴ قید شده است.

۲.۳. مدل‌سازی قطعه

شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ به عنوان جسم کشسانی - خمیری با مدل ماده جانسون - کوک به منظور تعیین تنش‌های پسماند انجام گرفت. مدل ماده جانسون - کوک در دهه ۸۰ میلادی توسعه پیدا کرد و برای تغییر شکل‌های سریع مثل فرایند ماشین‌کاری کاربرد دارد. معادله‌ی توصیف‌کننده‌ی این مدل عبارت

عملیات الکتروپولیش و در شکل ۵ سطح نمونه پس از عملیات نشان داده شده است.

نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش اشعه‌ی ایکس و ضخامتی که در هر مرحله به وسیله‌ی فرایند الکتروپولیش برداشته شده، در جدول ۳ نشان داده شده است.

۴.۲. اندازه‌گیری شعاع لبه‌ی ابزار تراش‌کاری

برای تراش‌کاری متعام نمونه‌های آزمایشگاهی، از اینسرت ۲۲۰۴۰۸ - TNMG۴۳۲ سندویک^۵ استفاده شد. از آن‌جا که در شبیه‌سازی اجزای محدود عملیات تراش‌کاری نیاز به مقادیر نیروهای برشی است، مشخصات اینسرت بر مبنای مطالعات راجش^[۲۲] انتخاب شد. در بهره‌برداری از اطلاعات موجود در این مرجع برای تعیین شعاع لبه‌ی ابزار خریداری شده، از دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی استفاده شد. در شکل ۶ تصویر اینسرت و مقدار شعاع لبه‌ی ابزار، معادل ۰/۱۵ میلی‌متر نشان داده شده است.

جدول ۵. ثوابت معادله جانسون - کوک برای فولاد AISI ۱۰۴۵. [۲۴]

مقدار	ثابت
۵۳۳/۱	MPa A
۶۰۰/۸	MPa B
۰/۰۱۳	C
۱/۰۰۰	m
۰/۲۳۴	n

است از: [۲۳]

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (۱)$$

ثوابت معادله جانسون - کوک برای فولاد AISI ۱۰۴۵ نیز در جدول ۵ ارائه شده است. [۲۴]

خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد AISI ۱۰۴۵ مثل مدول یانگ، ضریب انبساط حرارتی و ضریب هدایت حرارتی، تابعی از دما هستند [۲۵] که در شبیه‌سازی لحاظ شد.

۳.۳. شرایط آسایش

تنش‌های پسماند، تنش‌های باقی‌مانده در قطعه بعد از برداشتن همه‌ی بارهای خارجی است. در نتیجه تعیین تنش پسماند باید پس از آن که ابزار برش از قطعه جدا شد و از نظر شرایط انتقال حرارتی به حالت پایدار رسید، انجام گیرد. عملیات جداسازی ابزار از قطعه‌کار و ایجاد بازه زمانی برای یکنواختی دمای قطعه پس از تبادل حرارت آن با محیط، «شرایط آسایش قطعه» نامیده می‌شود. تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مطالعه بعد از ایجاد آسایش در قطعه صورت گرفت. نتایج برای تنش‌های پسماند در دو حالت قبل و بعد از شرایط آسایش در دو راستای محیطی و محوری در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. هرچند تفاوت زیاد نیست، اما وجود دارد و لذا در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود شرایط آسایش لحاظ شد.

۴.۳. مدل‌سازی شرایط اصطکاکی

در مطالعه‌ی حاضر، برای رسیدن به دقت کافی از دو مدل اصطکاک برای ناحیه‌ی چسبیده و لغزنده استفاده شد. در ناحیه‌ی تماس ابزار - براده در نزدیکی لبه‌ی برنده یک ناحیه‌ی چسبیده فرض شد، که در این ناحیه تنش اصطکاکی با مدل برش ثابت و در ادامه‌ی ناحیه‌ی تماس، منطقه‌ی لغزنده با مدل اصطکاکی کلمب مدل‌سازی شد. طول ناحیه‌ی چسبیده ۲ برابر ضخامت براده قبل از براده‌برداری، ضریب اصطکاک کلمبی ۰/۳ و ضریب اصطکاک در مدل برش ثابت ۰/۵ فرض شده است. [۲۶]

۵.۳. نمونه‌ی از نتایج تحلیل‌های اجزای محدود

نمونه‌ی از نتایج تحلیل‌های اجزای محدود برای سرعت پیشروی ۰/۰۳ میلی‌متر بر دوران قطعه و سرعت برشی ۱۳۵ متر بر دقیقه در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل، بیشترین تنش کششی در سطح نمونه اثر می‌کند که برای راستای محیطی بیشتر از راستای محوری است. همچنین تنش پسماند محیطی تا

شکل ۷. مقایسه‌ی تنش‌ها قبل و بعد از آسایش در راستای محوری.

شکل ۸. مقایسه‌ی تنش‌ها قبل و بعد از آسایش در راستای محیطی.

الف) تنش پسماند محوری؛

ب) تنش پسماند محیطی.

شکل ۹. نمونه‌ی از نتایج تحلیل اجزای محدود.

تجربی نیز خطاهایی وجود دارد، و لذا انطباق کامل نتایج عددی و تجربی دیده نمی شود.

۵. نتایج تحلیل اجزای محدود

۱.۵. تحلیل اثر سرعت پیشروی

برای بررسی تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر تنش های پسماند در نمونه تراش کاری شده، شبیه سازی در پنج سرعت پیشروی مختلف انجام شد. مقادیر 0.05 ، 0.03 ، 0.02 ، 0.01 و 0.005 میلی متر بر دوران قطعه، برای سرعت های پیشروی انتخاب شد که با مقادیر توصیه شده برای تراش کاری فولادها انطباق دارد. برای سرعت های مختلف پیشروی، مقدار براده برداری $1/3$ میلی متر در شبیه سازی های انتخاب شد. در شکل های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب توزیع تنش پسماند در دو راستای محوری و محیطی برای سرعت های پیشروی متفاوت ابزار نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود، افزایش سرعت پیشروی تا مقدار 0.02 mm/rev باعث افزایش بیشینه تنش پسماند کششی در سطح و فشاری زیرسطحی شده است. برای سرعت 0.03 mm/rev از مقدار این تنش ها کاسته شده است. همچنین افزایش سرعت پیشروی ابزار باعث می شود تنش های فشاری، بیشتر در عمق نفوذ کند و ناحیه ی بیشتری از عمق قطعه کار تحت تأثیر تنش های فشاری قرارگیرد. بیشینه تنش فشاری نیز در عمق بیشتری اتفاق می افتد.

شکل ۱۲. تنش پسماند محوری برای سرعت های پیشروی مختلف.

شکل ۱۳. تنش پسماند محیطی برای سرعت های پیشروی مختلف.

عمق حدود 0.04 میلی متر کششی بوده و از آن به بعد فشاری می شود. بیشترین تنش فشاری در عمق 0.08 میلی متر اتفاق می افتد. تنش پسماند محیطی تا عمق حدود 0.23 میلی متر فشاری بوده و به تدریج به سمت صفر میل می کند. برای تنش پسماند محوری نیز الگوی تقریباً مشابهی با تنش پسماند محیطی مشاهده می شود.

۴. مقایسه ی نتایج شبیه سازی و تجربی

به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی های اجزای محدود انجام شده، ابتدا برای نمونه ی مطالعه شده توسط راجش [۲۲] و سپس برای نمونه ی آزمایشی در پژوهش حاضر، تحلیل اجزای محدود انجام گرفت و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه شد. در شکل ۱۰ نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و شبیه سازی برای تنش پسماند محیطی، در شرایط براده برداری یکسان برای نمونه ی مطالعه شده ی پیشین [۲۲] نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و شبیه سازی برای تنش پسماند محیطی در شرایط براده برداری یکسان، برای نمونه ی آزمایشی در پژوهش حاضر در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می شود، روند تغییر تنش پسماند محیطی حاصل از شبیه سازی عددی و اندازه گیری تجربی، برحسب عمق از سطح نمونه ی مطالعه شده مشابه اند. در شبیه سازی عددی از فرض های ساده کننده استفاده می شود. همچنین از داده های منتشره مثل ضرایب جانسون - کوک استفاده شده است. در اندازه گیری

شکل ۱۰. مقایسه ی نتایج شبیه سازی و تجربی برای تنش پسماند محیطی در نمونه ی آزمایشی پیشین. [۲۴]

شکل ۱۱. مقایسه ی نتایج شبیه سازی و تجربی برای تنش پسماند محیطی در نمونه ی آزمایشی پژوهش حاضر.

الف) تنش پسماند محوری؛

ب) تنش پسماند محیطی.

شکل ۱۶. مقایسه نتایج شبکه‌ی عصبی مصنوعی و شبیه‌سازی اجزای محدود.

شده برای تعیین تنش‌های پسماند، برحسب سرعت‌های برشی و سرعت پیشروی، به‌عنوان ورودی‌های شبکه‌ی عصبی در نظر گرفته شد. سپس داده‌پردازی، محاسبه و ماتریس‌بندی داده‌ها انجام شد. لایه‌ی ورودی شبکه دو نرون شامل اطلاعات سرعت برشی و سرعت پیشروی ابزار، و خروجی شبکه نیز یک نرون برای تنش پسماند روی سطح انتخاب شد. محاسبات یک‌بار برای تنش محوری و بار دیگر برای تنش محیطی انجام گرفت.

در این پژوهش علاوه بر لایه‌های ورودی و خروجی، دو لایه‌ی میانی نیز در نظر گرفته شد. از ۱۰۰ داده موجود ۹۰ نمونه برای آموزش شبکه و ۱۰ مورد در مرحله آزمون شبکه به کار گرفته شد. نتایج خروجی آزمون شبکه‌ی عصبی برای تنش‌های پسماند محوری و محیطی سطحی، و نیز درصد خطای نتایج حاصل از پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی با مقادیر متناظر حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۶ ارائه شده است؛ میزان خطا در بیشتر موارد کوچک است. نتایج حاصله حاکی از آن است که استفاده از شبکه‌ی عصبی ساخته شده برای پیش‌بینی تنش‌های پسماند، برای سایر سرعت‌های برشی و پیشروی که شبیه‌سازی اجزای محدود برای آن‌ها انجام نگرفته، می‌تواند تا اندازه‌ی زیادی قابل قبول باشد. میزان تخمین تنش پسماند در سطح برای هر دو راستای محوری و محیطی با استفاده از کد نوشته شده در شبکه‌ی عصبی خطای نسبتاً کمی دارد و حداکثر مقدار آن ۱۵ درصد برای راستای محوری و ۱۷/۴ درصد برای راستای محیطی است. همچنین در شکل ۱۶ میزان تفاوت نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تنش‌های پسماند محوری و محیطی نشان داده شده است. در این

شکل ۱۴. تنش پسماند محوری برای سرعت‌های برشی مختلف.

شکل ۱۵. تنش پسماند محیطی برای سرعت‌های برشی مختلف.

۲.۵. تحلیل اثر سرعت برشی

برای بررسی تأثیر سرعت برشی براده‌برداری بر تنش‌های پسماند ایجاد شده در طول فرایند تراش‌کاری، شبیه‌سازی در پنج سرعت برشی ۱۰۵، ۱۳۵، ۱۷۵، ۲۱۵ و ۲۶۵ متر بر دقیقه - سرعت‌های معمول برش در تراش‌کاری فولادها - انجام شد. نتایج برای تنش‌های پسماند محیطی و محوری، به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در هر دو راستای محوری و محیطی، افزایش سرعت برشی منجر به توسعه‌ی ناحیه‌ی تحت تأثیر تنش کششی می‌شود، بدین معنا که تنش‌های کششی در عمق قطعه بیشتر نفوذ می‌کند. همچنین بیشینه تنش کششی در سطح قطعه افزایش می‌یابد. در راستای محیطی، با افزایش سرعت برشی، بیشینه تنش فشاری نیز کمی افزایش یافته، اما در راستای محوری تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود.

۲.۶. پیش‌بینی تنش پسماند به روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی

با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود، شبکه‌ی عصبی برای تخمین تنش‌های پسماند برای شرایط سرعت‌های پیشروی و برشی دیگر به کار گرفته شد. برای مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی از ابزار کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شد. در مرحله‌ی اول داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود انجام

جدول ۶. مقایسه نتایج خروجی آزمون شبکه‌ی عصبی و شبیه‌سازی اجزای محدود.

تنش محوری شبکه‌ی عصبی (مگاپاسکال)	تنش محوری شبیه‌سازی (مگاپاسکال)	درصد خطای نسبی	تنش محیطی شبکه‌ی عصبی (مگاپاسکال)	تنش محیطی شبیه‌سازی (مگاپاسکال)	درصد خطای نسبی
۲۸۶	۲۴۳	۱۵٫۰	۵۴۰	۶۳۴	-۱۷٫۴
۳۹۴	۳۸۱	۳٫۳	۶۵۳	۶۷۳	-۳٫۱
۴۲۹	۴۲۳	۱٫۴	۷۱۷	۷۱۶	۰٫۱
۴۸۰	۵۰۲	-۴٫۶	۸۰۱	۸۰۱	۰٫۰
۵۵۱	۵۵۲	-۰٫۲	۸۶۹	۸۴۰	۳٫۳
۶۱۵	۵۹۸	۲٫۸	۹۰۹	۸۹۲	۱٫۹
۶۶۷	۶۴۲	۳٫۷	۹۳۵	۹۳۴	۰٫۱
۶۸۴	۷۱۲	-۴٫۱	۹۴۴	۹۹۴	-۵٫۳
۶۹۰	۷۳۲	-۶٫۱	۹۴۷	۹۴۲	۰٫۵
۶۹۲	۷۰۳	-۱٫۶	۹۴۸	۹۱۹	۳٫۱

می‌کند. با افزایش سرعت برشی، بیشینه‌ی تنش پسماند محوری کششی موثر بر سطح نمونه از حدود ۲۵۰ مگاپاسکال به حدود ۵۵۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

-- از سرعت برشی ۱۰۵ متر بر دقیقه تا ۲۶۵ میل‌متر بر دقیقه، تنش پسماند محیطی از عمق حدود ۰٫۴ میلی‌متر به بعد، فشاری بوده و فشاری باقی می‌ماند. همچنین این تنش فشاری با شیب کم‌تری به سمت صفر میل می‌کند. با افزایش سرعت برشی، بیشینه‌ی تنش پسماند محیطی کششی موثر بر سطح نمونه از حدود ۵۰۰ مگاپاسکال به حدود ۸۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

-- شبکه‌ی عصبی ساخته شده می‌تواند با بیشینه‌ی خطای ۱۵٪ برای راستای محوری و ۱۷٫۴٪ برای راستای محیطی تنش‌های پسماند در سرعت‌های برشی و پیشروی مختلف مطالعه شده را پیش‌بینی کند.

فهرست علائم

A : استحکام تسلیم، MPa؛

B : ثابت مادی، MPa؛

C : ثابت مادی؛

m : ثابت مادی؛

n : ثابت مادی؛

T : دما، K .

علائم یونانی

$\bar{\sigma}$: تنش معادل پلاستیک، MPa؛

$\bar{\epsilon}$: کرنش معادل پلاستیک.

شکل خط‌چین نشان‌گر شرایط تساوی نتایج شبکه‌ی عصبی مصنوعی و شبیه‌سازی اجزای محدود، و نقاط توخالی نشان‌گر نتایج شبکه‌ی عصبی مصنوعی است. به عبارت دیگر، فاصله‌ی نقاط تا خط‌چین مبین تفاوت پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تنش‌های پسماند نسبت به مقادیر منتج از شبیه‌سازی اجزای محدود است.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر سرعت برشی و پیشروی بر تنش‌های پسماند در شافت‌های ماشین‌کاری از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ بررسی شد. نتایج حاصله عبارت است از:

-- در مسئله‌ی مطالعه شده، از سرعت پیشروی ۰٫۵ میلی‌متر بر دوران قطعه تا ۰٫۳ میلی‌متر بر دوران قطعه، تنش پسماند محوری از عمق حدود ۰٫۴ میلی‌متر به بعد، فشاری بوده و فشاری باقی می‌ماند. همچنین این تنش فشاری با شیب کم‌تری به سمت صفر میل می‌کند. با افزایش سرعت پیشروی، بیشینه‌ی تنش پسماند محوری کششی موثر بر سطح نمونه از حدود ۱۲۰ مگاپاسکال به حدود ۶۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

-- از سرعت پیشروی ۰٫۳ میلی‌متر بر دوران قطعه تا ۰٫۳ متر بر دقیقه، تنش پسماند محیطی از عمق حدود ۰٫۴ میلی‌متر به بعد، فشاری بوده و فشاری باقی می‌ماند. همچنین این تنش فشاری با شیب کم‌تری به سمت صفر میل می‌کند. با افزایش سرعت پیشروی، بیشینه‌ی تنش پسماند محیطی کششی موثر بر سطح نمونه از حدود ۴۰۰ به حدود ۸۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

-- از سرعت برشی ۱۰۵ متر بر دقیقه تا ۲۶۵ میلی‌متر بر دقیقه، تنش پسماند محوری از عمق حدود ۰٫۵ میلی‌متر به بعد، فشاری بوده و فشاری باقی می‌ماند. همچنین این تنش فشاری با شیب کم‌تری به سمت صفر میل

تشکر و قدردانی

از مدیریت و پرسنل مجتمع آزمایشگاهی فناوری نانوکفا و شرکت آبرکاری میناب که در انجام این تحقیق ما را یاری کردند، کمال تشکر و امتنان را داریم.

زیر نویس ها

melt: ذوب؛

O: مرجع؛

room: اتاق.

پانویس ها

1. deform
2. inconel
3. rake angle
4. Peak
5. sandvik

منابع (References)

1. Miguèlez, H., Zaera, R., Molinari, A. and et al. "Residual stresses in orthogonal cutting of metals: the effect of thermomechanical coupling parameters and of friction", *J. Thermal Stresses*, **32**, pp. 1-20 (2009).
2. Brinkmeier, E., Cammet, J.T., K nig, W. and et al. "Residual stresses-measurement and causes in machining processes", *Annals of the CIRP*, **31**(2), pp. 491-510 (1982).
3. Hearn, E.J. *Residual Stresses Mechanics of Materials: An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials*, Butterworth-Heinemann, Oxford, **2** pp. 394-408 (1997).
4. Hua, J., Shivpuri, R., Cheng, X., and et al. "Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry", *Materials Science and Engineering- A*, **394**(1-2), pp. 238-248 (2005).
5. Hua, J., Umbrello, D. and Shivpuri, R. "Investigation of cutting conditions and cutting edge preparations for enhanced compressive subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel", *Journal of Materials Processing Technology*, **171**(2), pp. 180-18 (2006).
6. Ozel, T. and Zeren, E. "Finite element method simulation of machining of AISI 1045 steel with a round edge cutting tool", *Proceedings of 8th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, Chemnitz, Germany*, pp. 533-542 (2005).
7. Liang, S.Y. and Su, J.C., "Residual stress modeling in orthogonal machining", *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, **56**(1), pp. 65-68 (2007).
8. Maranhão, C., Davim, J.P. "Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: numerical simulation and experimental validation", *Simulation Modelling Practice and Theory*, **18**(2), pp. 139-156 (2010).
9. Caruco, S., Umbrello, D., Outeiro, J.C. and et al. "An experimental investigation of residual stresses in hard machining of AISI 52100 steel", *Procedia Engineering*, **19**, pp. 67- 72 (2011).
10. Ye, G.G., Xue, S.F., Ma, W. and et al. "Cutting AISI 1045 steel at very high speeds", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **56**, pp. 1-9 (2012).
11. Muthu, E., Senthamarai, K. and Jayabal, S. "Finite element simulation machining of Inconel 718 nickel based superalloy", *International Journal of advanced engineering applications*, **1**(3), pp. 22-27 (2012).
12. Abboud, E., Shi, B., Attia, H. and et al. "Finite element based modeling of machining-induced residual stresses in Ti-6Al-4V under finish turning conditions", *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, **8**, pp. 63-68 (2013).
13. Outeiro, J.C. Costes J.P. and Kornmeier J.R. "Cyclic variation of residual Stress induced by tool vibration in machining operation", *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, **8**, pp. 493-497 (2013).
14. Saurabh, A. and Suhas, S. "Analytical modelling of residual stresses in orthogonal machining of AISI 4340 Steel", *Journal of Manufacturing Processes*, **15**(1), pp. 167-179 (2013).
15. Ji, X., Zhang, X. and Liang, S.Y. "Predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **70**, DOI:10.1007/s00170-013-5439-2 (2014).
16. Huang, X. D., Zhang, X. M. and Ding, H. "A novel analytical method for predication of residual stress induced by mechanical load during orthogonal machining", *International Journal of Mechanical Sciences*, **115-116**, pp. 299-309 (2016).
17. Parida, A. K. and Maity, K. "Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis", *Engineering Science and Technology, an International Journal, Article in Press*, **20**(2), pp.687-693 (2016).
18. Kortabarria, A., Armentia, I. and Arrazola, P. "Sensitivity analysis of material input data influence on machining induced residual stress prediction in Inconel 718", *Simulation Modelling Practice and Theory*, **63**, pp. 47-57 (2016).
19. Sharma, V. and Pandey, P.M. "Optimization of machining and vibration parameters for residual stresses minimization in ultrasonic assisted turning of 4340 hardened steel", *Ultrasonics*, **70**, pp. 172-182 (2016).

20. Daoud, M., Chatelain, J. F. and Bouzid, A. "Effect of rake angle-based Johnson-Cook material constants on the prediction of residual stresses and temperatures induced during Al2024-T3 machining process", *International Journal of Mechanical Sciences*, **122**, pp.392-404 (2017).
21. www.interlloy.com.au/1045-medium-tensile-carbon-steel-bar, Interlloy Pty Ltd, *Engineering steels+alloys* (2014).
22. Rajesh, K. "Topology-based modeling and analysis of orthogonal cutting process", University of Kentucky, Master's Theses (2008).
23. Ozel, T. and Zeren, E. "Finite element method simulation of machining of AISI 1045 steel with a round edge cutting tool", *Proceedings of 8th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, Chemnitz, Germany*, pp. 533-542 (2005).
24. Jaspers, S. and Dautzenberg, J. "Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone", *Journal of Materials Processing Technology*, **122**(2), pp. 322-330 (2002).
25. Proudian, J. "Simulating residual stress in machining", MSc Thesis, University of Stockholm, Stockholm (2012).
26. Filice, L., Micari, F., Rizzuti, S. and et al. "A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **47**(3), pp. 709-714 (2007).