بهبود ویژگی‌های مکانیکی چدن‌های نشکن آستمپر جهت افزایش قابلیت ماشین‌کاری و استحکام خستگی

مهران تدین سعیدی*[۱]، ناصر ورهرام[۲]، جی.وی.اس.ناگسوارا راؤ[۳] و نیما باقرسایی[۴]

چکیده

چدن‌های نشکن آستمپر به دلیل ویژگی‌های مناسب مکانیکی مانند: استحکام بالا، داکتیلیتی مناسب و مقاومت سایشی، دارای کاربردهایی وسیع در صنایع گوناگون از جمله خودروسازی، راه آهن و دیگر صنایع سنگین می‌باشند، اما محدودیت بزرگ آن‌ها سختی نسبتاً بالا و قابلیت ماشین‌کاری کم و بالا رفتن هزینه‌ی تولید آن از این جهت می‌باشد. "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشینکاری" یک ماده جدید مهندسی با ویژگی‌های بسیار مناسب است و در مقایسه با چدن‌های نشکن معمولی دارای استحکام بالاتر در سختی نسبتاً یکسان و نیز قابلیت ماشین‌کاری و در مقایسه با چدن‌های نشکن آستمپر معمولی با استحکام خستگی بهتر می‌باشد. در این پژوهش امکان تولید "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" با انتخاب ترکیب شیمیایی مناسب و سیکل عملیات حرارتی آستنیته در دمای ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه، آستمپرینگ در دمای ۳۹۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه، ایجاد ساختار آسفرایتی با استحکام کششی ۹۰۰ و استحکام تسلیم ۷۰۵ نیوتن بر میلیمتر مربع، ازدیاد طول نسبی ۱۵درصد، سختی ۲۳۲ برینل، استحکام خستگی ۳۷۰ نیوتن بر میلیمتر مربع و بهبود برآیند نیروی برشی و در نتیجه بهبود قابلیت ماشین‌کاری به مقدار ۲۰درصد امکان‌پذیر شد.

واژه‌های کلیدی: چدن نشکن آستمپر، مقاومت خستگی، ماشین‌کاری.

۱- دکترای مهندسی مواد و متالورژی، استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.

۲- دکترای مهندسی مواد و متالورژی، استاد دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

۳- دکترای مهندسی مواد و متالورژی، دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، انستیتو ملی تکنولوژی، هندوستان.

۴- کارشناس ارشد مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: mehrantadayonsaidi@yahoo.com

پیشگفتار

"چدن‌های نشکن آستمپر با قابلیت ماشینکاری" یا MADI[1] گروه جدیدی از چدن‌های نشکن می‌باشند که با چدن‌های نشکن آستمپر معمولی تفاوت دارند و البته، همانند چدن‌های نشکن آستمپر معمولی دارای ویژگی‌های کششی بالاتری نسبت به چدن‌های نشکن معمولی می‌باشند (شکل ۱). توسعه و تجاری سازی چدن‌های نشکن آستمپر برای مهندسین طراح گروه جدیدی از مواد با ترکیب استثنایی ویژگی‌های مکانیکی مشابه با فولادهای ریختگی و فورج شده و هزینه‌های تولیدی مشابه با چدن‌های نشکن معمولی را فراهم ساخته است. اگر چه چدن‌های نشکن آستمپر جایگزینی تثبیت شده در بسیاری از کاربردها که پیش از این در انحصار قطعات فولادی، آهنگری، آلومینیومی و متالورژی پودر بوده، هستند، اما چدن‌های نشکن آستمپر براحتی چدن‌های داکتیل فریتی یا پرلیتی ماشینکاری نمی‌شوند. مهم‌ترین محدودیت چدن‌های نشکن آستمپر سختی بالا و قابلیت ماشین‌کاری کم آن می‌باشد و تولید آن‌ها در چهار مرحله: ریخته گری، ماشین‌کاری عمده‌ی اولیه، عملیات حرارتی و ماشین‌کاری جزئی نهایی انجام می‌شود و این دو مرحله‌ای بودن ماشین‌کاری ناشی از سختی بالای قطعات پس از عملیات حرارتی آستمپرینگ می‌باشد که همین دو مرحله‌ای شدن فرآیند ماشین‌کاری باعث افزایش هزینه‌ی تولید چدن نشکن آستمپر می‌شود[۴-۱]. چدن‌های جدید نشکن آستمپر که قابلیت ماشین‌کاری آن‌ها بهبود یافته است، به نام "چدن‌های نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" نامگذاری شده‌اند و دارای ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی مخصوصی می‌باشند و فرایند تولید آن‌ها در سه مرحله‌ی ریخته گری، عملیات حرارتی و ماشین‌کاری انجام می‌شود که همین کاهش یک مرحله‌ای و حذف یک سیکل ماشین‌کاری منجر به کاهش هزینه‌ی تولید و افزایش بهره وری تولید می‌شود. در این پژوهش سعی بر تولید این ماده‌ی جدید همراه با کاهش هزینه‌های تولید می‌باشد به گونه‌ای که عناصر آلیاژی، دما و زمان در سیکل عملیات حرارتی آستنیته و آستمپر در کم‌ترین حد ممکن باشند و از سوی دیگر، ویژگی‌های مکانیکی مناسب شامل کاهش سختی، افزایش ازدیاد طول نسبی، افزایش استحکام خستگی و قابلیت ماشین‌کاری بهبود یابد. در این‌جا مشخصه‌های تولید "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" شامل ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی (دما و زمان آستنیته و آستمپرینگ) می‌باشد و سپس به ویژگی‌های خستگی و قابلیت ماشین‌کاری آن‌ها پرداخته می‌شود.

ترکیب شیمیایی

مبنای انتخاب بر اساس ترکیب شیمیایی چدن‌های نشکن آستمپر معمولی حاوی مقادیر کم منگنز، مس، نیکل و مولیبدن با ملاحظات صرفه‌ی اقتصادی و نیز جلوگیری از مشکلات متالورژیکی و سختی‌پذیری مناسب در چدن‌های نشکن آستمپر انتخاب می‌گردد و بایستی عناصر یاد شده در کم‌ترین مقدار لازم در قطعه ریخته شده در نظر گرفته شوند و تنها در مواردی که افزایش قابلیت سختی پذیری مدنظر باشد، اضافه شوند؛ در غیر این صورت باعث کاهش ویژگی‌های مکانیکی و پیچیدگی عملیات و هزینه‌های تولید می‌شود. ویژگی‌های چدن نشکن آستمپر بر اساس ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی آن‌ها، مشخص کننده‌ی ابعاد و توزیع و پایداری فازهای موجود در ساختار نهایی می‌باشند. کنترل ترکیب شیمیایی در چدن‌های نشکن آستمپر جهت حصول به ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و ایجاد ساختار آسفرایتی کمک شایانی می‌کند به گونه‌ای که ساختار بایستی دارای کم‌ترین مقدار آستنیت واکنش نیافته، کاربیدهای یوتکتیکی و مارتنزیت باشد زیرا در حین انجماد کاربیدهای یوتکتیکی در مناطق بین سلولی جدایش یافته و سپس در فرایند عملیات حرارتی، مناطق فقیر از کربن و آستنیت واکنش نیافته ایجاد می‌کنند و در پی آن فاز مارتنزیت تشکیل می‌شود. پس انتخاب ترکیب شیمیایی مناسب و پس از آن سیکل عملیات حرارتی مناسب جهت حصول به ساختار آسفرایتی شامل شاخه‌های منظم فریت در کنار آستنیت پر کربن بسیار موثر است. عنصر کربن در تولید چدن‌های نشکن آستمپر در محدوده‌ی ۳/۷-۳/۵ درصد انتخاب می‌شود زیرا در این حالت مناسب‌ترین

[1] - Machinable Austempered Ductile Iron

ویژگی‌های کششی را دارد. هم‌چنین، هرچه میزان کربن بالاتر و در محدوده‌ی یاد شده باشد، زمان نگهداری نمونه‌ها در دمای آستنیته جهت رسیدن به ساختار آستنیتی بمراتب کم‌تر است. عنصر سیلیسیم مهم‌ترین عنصر در چدن‌های نشکن آستمپر است و باعث بهبود تشکیل گرافیت، کاهش انحلال کربن در آستنیت، افزایش دمای یوتکتوئید و جلوگیری از تشکیل کاربیدها می‌گردد و مقدار آن بایستی در محدوده‌ی ۲/۸-۲/۴ درصد کنترل شود. عنصر منگنز نقش کاربیدزایی، ایجاد جدایش و افزایش سختی پذیری در چدن‌های نشکن آستمپر دارد واندازه‌ی آن در حد ۰/۳ درصد نگاه داشته می‌شود. عنصر مولیبدن نقش عمده در بهبود قابلیت سختی پذیری در مقاطع ضخیم دارد و به دلیل تمایل به ایجاد جدایش و تشکیل کاربیدهای یوتکتیکی موجب کاهش قابلیت انعطاف پذیری و ماشین‌کاری می‌شود و در حد ۰/۲۵ درصد مناسب است. عنصر نیکل باعث افزایش قابلیت سختی پذیری می‌شود و افزودن بیش‌تر موجب جدایش و ایجاد کاربیدها می‌گردد و مقدار آن تا ۱درصد مناسب است[۸-۵].

عملیات حرارتی

"چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" به وسیله‌ی یک سیکل عملیات حرارتی ایزوترمال به نام آستمپر تولید می‌شود که شامل مراحل زیر است:

سیکل آستنیته کردن: یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در تولید "چدن های نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" دما و زمان آستنیته کردن است. دمای آستنیته مقدار کربن در آستنیت را کنترل می‌کند که به ترتیب بر ساختار و ویژگی‌های قطعه‌ی آستمپر تأثیر می‌گذارد. دمای آستنیته‌ی بالا، باعث افزایش مقدار کربن آستنیت و هم‌چنین، افزایش سختی پذیری آن می‌شود، اما استحاله در حین آستمپرینگ را دشوارتر می‌کند و ویژگی های مکانیکی پس از آستمپرینگ را کاهش می‌دهد (آستنیت با کربن بیش‌تر به زمان بیش‌تری جهت استحاله به آسفرایت نیاز دارد). زمان آستنیته بایستی کم‌ترین حد لازم جهت حرارت یکسان کل قطعه به دمای آستنیته و اشباع استنیت با مقدار تعادلی کربن باشد (معمولاً حدود ۱/۱ تا ۱/۳ درصد باشد)، هم‌چنین، افزون بر شکل و ضخامت قطعه، زمان آستنیته تحت تأثیر ترکیب شیمیایی، دمای آستنیته و ندول کانت می‌باشد. از آن‌جا که استحاله‌ی آستمپر تحولی نفوذی است و به دلیل حلالیت پایین کربن در فریت همراه با جوانه زنی و رشد فریت، کربن به داخل آستنیت پس زده می‌شود و هرچه غلظت کربن در آستنیت اولیه کم‌تر باشد، اختلاف پتانسیل شیمیایی جهت نفوذ کربن از فریت به آستنیت بیش‌تر می‌شود و مقدار کربن آستنیت باقیمانده با سرعت بیش‌تری افزایش می‌یابد و منجر به کاهش مدت مرحله‌ی نخست پنجره‌ی عملیات درآستمپرینگ می‌گردد. پس هرچه بتوان با کاهش غلظت کربن باعث وسعت پنجره‌ی عملیات در سیکل عملیات حرارتی و تأخیر در ورود به مرحله‌ی دوم پنجره‌ی عملیات و جلوگیری از ایجاد کاربیدهای بینیتی و اپسیلون شد، به تشکیل ساختار یکنواخت آسفرایتی در چدن‌های نشکن آستمپری با قابلیت ماشین‌کاری کمک شایانی می‌شود و بمنظور این‌که میزان کربن حل شده در آستنیت اولیه در حین عملیات حرارتی کمینه باشد، بایستی دمای آستنیته کردن و هم‌چنین مدت آن تا حد مناسبی کاهش یابد[۱۰و۹].

سیکل آستمپرینگ: دمای آستمپرینگ یکی از عوامل اصلی تعیین کننده در ویژگی‌های مکانیکی چدن نشکن آستمپر می‌باشد. از آن‌جا که تشکیل ساختار آسفرایت که رشد شاخه‌های فریت به درون فاز آستنیت است، نوعی تحول نفوذی است و وابسته به درجه‌ی حرارت می‌باشد، لذا، با افزایش درجه‌ی حرارت می‌توان به افزایش ضریب نفوذ کربن تا حدی کمک کرد. بمنظور تولید چدن نشکن آستمپر با استحکام مناسب و سختی پایین، اما با ازدیاد طول بالا و چقرمگی شکست بالا (مشخصه‌ی قابلیت ماشین‌کاری خوب) بایستی دمای آستمپرینگ بین ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه‌ی سانتیگراد انتخاب شود تا باعث ایجاد ساختار آسفرایتی همراه با مقادیر بالای آستنیت کربن پایدار(۲۰ تا ۴۰ درصد) شود، پس از انتخاب دمای آستمپرینگ زمان آستمپرینگ باید انتخاب شود تا ویژگی‌های بهینه با تشکیل ساختار پایدار آسفرایت بدست آید، در زمان‌های کوتاه آستمپرینگ نفوذ کربن به آستنیت جهت پایداری آن کافی نمی‌باشد و احتمال دارد در حین سرد شدن تا

دمای اتاق فاز مارتنزیت تشکیل شود. ریز ساختار بدست آمده سختی بالاتری خواهد داشت، اما داکتیلیتی و چقرمگی شکست پایین‌تری خواهد داشت (بویژه در دماهای پایین)، هر چه زمان استمپرینگ بیش‌تر باشد، باعث تجزیه‌ی بیش‌تری از آسفرایت به فریت و کاربید (بینیت) می‌شود که منجر به استحکام، داکتیلیتی و چقرمگی شکست پایین‌تر می شود [۱۳-۱۱].

ویژگی‌های خستگی

چدن‌های نشکن آستمپر ماشین‌کاری شده دارای حد خستگی بالاتری نسبت به چدن‌های نشکن ریختگی و با عملیات حرارتی معمولی و نیز فولاد های ریختگی و سخت شده می باشد. در کاربردهایی نظیر میل لنگ و چرخ دنده ویژگی‌های خستگی مهم می‌باشد، روی هم رفته، چدن‌های نشکن آستمپر با زمینه‌ی آسفرایت شامل فریت‌های سوزنی و آستنیت پرکربن استحکام خستگی بالاتری از چدن‌های نشکن آستمپر با زمینه‌ی فریتی- پرلیتی نشان می‌دهند و حضور ناخالصی‌ها و عدم کروی بودن گرافیت‌ها عواملی هستند که باعث کاهش استحکام خستگی می‌گردد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استحکام خستگی در یک زمینه‌ی آسفریتی (فریت با آستنیت پر کربن) در یک چدن نشکن آستمپر آلیاژی با مقاطع ضخیم، ۶۰-۴۵ درصد بالاتر از ساختار پرلیتی است. حد خستگی چدن‌های نشکن آستمپر دارای نسبت مستقیم با استحکام کششی یا سختی نمی‌باشد و به چقرمگی و میزان آستنیت باقیمانده ارتباط دارد و هرچه این دو بیش‌تر باشد، حد خستگی بالاتر است. باور بر این است که در حین تغییر شکل، آستنیت باقیمانده در جلوی نوک ترک خستگی تبدیل به مارتنزیت شده و رشد ترک را به تاخیر بیاندازد [۱۵-۱۳].

قابلیت ماشین‌کاری

قابلیت ماشین‌کاری چدن‌ها به عوامل گوناگونی مانند ویژگی‌های مکانیکی، ساختار میکروسکپی، شرایط ماشین‌کاری و شرایط سطحی قطعه دارد. استحکام و سختی نسبتاً بالای چدن‌های نشکن آستمپر شرایط ماشین‌کاری را مشکل می‌کند که عمدتا به تاثیر ریزساختار مربوط است چراکه آستنیت واکنش نیافته به دلیل تنش اعمال شده در حین ماشین‌کاری به مارتنزیت استحاله می‌یابد و قابلیت ماشین‌کاری چدن نشکن آستمپر را کاهش می‌دهد. روی هم رفته، قابلیت ماشین‌کاری مواد را می‌توان بر اساس یکی از عامل‌های: طول عمر ابزار برش، نرخ سایش ابزار برشی، مقدار نیروهای برشی، کیفیت سطحی و شکل براده مورد ارزشیابی و سنجش قرار داد. کیفیت سطحی و شکل براده‌ها معمولا تغییر قابل توجهی در چدن‌های نشکن ندارند و براحتی خرد می‌شوند. کیفیت سطحی نیز بیش‌تر متأثر از ندول گرافیت‌ها می‌باشد؛ لذا، بهترین روش اندازه گیری و محاسبه‌ی دقیق قابلیت ماشین‌کاری بر مبنای اندازه‌گیری نیروهای برشی در سه جهت مختصات می‌باشد. در شکل ۲ قابلیت نسبی ماشین‌کاری برخی از مواد فولادی و چدنی مقایسه شده است[۱۰،۱۲،۱۶،۱۷].

مواد و روش‌ها

ترکیب شیمیایی: قالب‌های Y بلوک بر اساس استاندارد ASTM A536-84 تهیه و فلز مذاب پس از تنظیم شارژ به داخل قالب‌های ماسه ای دی اکسید کربن با چسب سیلیکات سدیم باراریزی شد و عملیات کروی کردن گرافیت ها به روش فروبری و جوانه زنی به وسیله‌ی فروسیلیسیم انجام گردید. سپس قالب‌ها تا دمای محیط خنک شدند. انتخاب ترکیب شیمیایی با در نظر گرفتن صرفه‌ی اقتصادی و تاثیر عناصر بر سختی پذیری چدن‌های نشکن آستمپر و نیز بر اساس داده‌های مراجع و تجارب پیشین مؤلفین انتخاب گردید. نمونه‌هایی با درصدهای متفاوت سیلیسیم از ۳/۳-۲/۲درصد، منگنز از ۰/۱۳ - ۰/۵درصد، نیکل از ۱/۳ - ۰/۸۷درصد، مولیبدن از ۰/۳۵ - ۰/۲درصد و مس از ۰/۷-۰/۵درصد تهیه گردیدند و پس از بررسی‌های ساختاری و ویژگی‌های مکانیکی، ترکیب مناسب و مد نظر بر اساس جدول ۱ و با ندول کانت ۱۶۰ انتخاب شد.

عملیات حرارتی: سیکل عملیات حرارتی در دو بخش آستنیته و آستمپر در دما و زمان‌های متفاوت صورت پذیرفت به گونه‌ای که آستنیته کردن نمونه‌ها در حمام نمک مذاب در دماهای بالاتر از خط یوتکتوئید در دماهای

آستنیته ۷۵۰-۸۰۰- ۸۵۰- ۹۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و در زمان‌های ۶۰-۱۲۰-۱۸۰ دقیقه آستنیته شدند و برای آستمپرینگ نیز متناسب با آن در دماهای ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و در زمان‌های ۶۰-۱۲۰-۱۸۰ دقیقه انجام گردید و سپس تا دمای محیط سرد شدند. پس از بررسی‌های ساختاری و با کمک آنالیز تصویری و عملیات اچ رنگی حرارتی جهت تعیین فازها و نیز بررسی ویژگی‌های مکانیکی، در نهایت، سیکل بهینه در دمای آستنیته‌ی ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه و دمای آستمپرینگ ۳۹۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه انتخاب گردید.

ویژگی‌های مکانیکی: استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نسبی به وسیله دستگاه کشش ۳۰ کیلو نیوتن (اینسترون) انجام و بر اساس استاندارد ASTM A370 اندازه گیری شد. آزمایش خستگی بر اساس استاندارد ASTM E 468 و با دستگاه دورانی- خمشی و تعداد سیکل ۲۸۰۰ دور در دقیقه انجام گردید و بالاترین تنشی که نمونه 10^7 سیکل را تحمل کند، به عنوان استحکام خستگی در نظر گرفته شد. آزمون خستگی در مورد نمونه‌ی "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" و نمونه‌ی چدن نشکن آستمپر استاندارد آمریکا گرید یک متداول در کاربردهای صنعتی صورت پذیرفت تا اندازه‌ی بهبود آن مشخص گردد.

آزمون ماشین‌کاری: فرزکاری و دریل‌کاری دو روش متداول جهت بررسی قابلیت ماشین‌کاری مواد می‌باشند که در این پژوهش روش فرزکاری بکار برده شد. در مورد تعدادی از نمونه‌های چدن نشکن معمولی، چدن نشکن آستمپر معمولی استاندارد آمریکایی گرید یک و چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری آزمون فرزکاری اندازه گیری شد و مقایسه انجام گرفت. آزمون‌های ماشین‌کاری در مورد نمونه‌های تخت به ابعاد ۵۰×۵۰×۱۵ میلیمتر مکعب انجام شد و ارزیابی آن‌ها بر اساس مقدار نیروهای برشی در سه جهت محوری مختصات با استفاده از دستگاه دینامومتر اندازه گیری و ثبت گردید. نیروهای برشی در سه جهت با سیگنال‌های پیزوالکتریک و نرم افزار مربوطه جهت نمایش و ثبت به این دستگاه منتقل می‌شوند. نیروی برآیند ناشی از این سه مؤلفه نیز با فرمول محاسبه‌ی برآیند بدست می‌آید. عملیات فرزکاری در شرایط گوناگون عمق برش، نرخ براده برداری و سرعت فرز انجام گرفت که نتایج بهترین شرایط در حالت عمق برش ۳ میلیمتر، نرخ براده برداری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت فرز ۳۶۰ دور در دقیقه بدست آمد.

نتایج و بحث

۱- استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نسبی بر حسب دماهای متفاوت آستنیته و آستمپر در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، استحکام کششی و تسلیم با افزایش دمای آستنیته افزایش می‌یابند و در ارتباط با تغییرات ازدیاد طول نسبی، با افزایش دمای آستنیته تا حدود ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد، ازدیاد طول افزایش می‌یابد که این مورد در نمونه‌ی آستمپر شده در دمای ۳۹۰ درجه‌ی سانتیگراد از مقادیر بالاتری برخوردار است.

۲- تأثیر دمای آستنیته بر سختی در شکل ۶ نمایش داده شده است، همان گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای آستنیته تا ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد سختی کاهش می‌یابد و پس از آن افزایش نسبی مشاهده می‌شود و در حالتی که کم‌ترین مقدار را داراست، ماشین‌کاری را سهولت می‌بخشد.

۳- تأثیر دمای آستنیته بر مقادیر آستنیت باقیمانده در شکل ۷ نشان داده شده است. با انجام عملیات اچ رنگی حرارتی و استفاده از آنالیز تصویری بررسی و مشاهده شد که کم‌ترین مقادیر آستنیت باقی‌مانده در دمای آستنیته‌ی ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد و آستمپرینگ ۳۹۰ درجه‌ی سانتیگراد وجود دارد که هرچه آستنیت باقیمانده کم‌تر باشد، به دلیل احتمال کم‌تر تبدیل به مارتنزیت در حین ماشین‌کاری بهتر می‌باشد. ساختار نمونه‌ی آستنیته شده در دمای ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد و آستمپر شده در دمای ۳۹۰ درجه‌ی سانتیگراد در شکل ۸ نمایش داده شده است که در این حالت کم‌ترین مقادیر آستنیت باقیمانده نسبت به سایر موارد مشاهده شد که مطلوب هدف ما می‌باشد.

۴- مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از آزمون خستگی در مورد نمونه‌های چدن نشکن با قابلیت ماشین‌کاری ناشی از این پژوهش با چدن‌های نشکن آستمپر معمولی استاندارد

ASTM گرید یک که درشکل ۹ نمایش داده شده است، بیانگر بهبود و افزایش استحکام خستگی می‌باشد. در این پژوهش ساختار آلیاژ چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری حاوی مقادیر بالای آسفرایت با بالاترین حجم آستنیت واکنش یافته و پایدار است که ازدیاد طول نسبی و استحکام خستگی را در مقایسه با چدن نشکن آستمپر معمولی افزایش می‌دهد. افزایش ۲۰ درصد استحکام خستگی "چدن‌های نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" با ۳۷۰ نیوتن بر میلیمتر مربع نسبت به چدن نشکن آستمپر معمولی با ۳۰۹ نیوتن بر میلیمتر مربع کاربرد آن‌ها را در مواردی که استحکام بیش‌تر خستگی و قابلیت ماشین‌کاری بهتر مورد نیاز است را امکان‌پذیر می‌سازد.

۵- بر اساس نمودار وضعیت نیروهای برشی در سه جهت محور مختصات در شکل- ۱۰، مشاهده می‌شود که چدن‌های آستمپر معمولی نیروهای برشی بالاتری از چدن‌های نشکن معمولی دارا هستند، این قابلیت پایین ماشین‌کاری چدن‌های نشکن آستمپر را می‌توان به سختی بالا و استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت ناشی از تنش اعمالی در حین کارکرد تیغه‌ی فرز دانست. از سوی دیگر، "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" دارای نیروهای برشی کم‌تری در مقایسه با چدن نشکن آستمپر معمولی هستند که باعث افزایش قابلیت ماشین‌کاری نسبت به چدن‌های آستمپر معمولی متداول در کاربردهای صنعتی می‌گردد، این بهبود قابلبت ماشین‌کاری ناشی از سختی کم‌تر و مقادیر ناچیز آستنیت باقیمانده در ساختار است که تاثیر قابل توجهی در تحول مارتنزیتی ناشی از تنش اعمالی دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بمنظور تولید "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری"، پس از تهیه‌ی نمونه‌هایی با درصدهای متفاوت عناصر آلیاژی، انجام سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی در دما و زمان‌های گوناگون، انجام آزمون‌های مکانیکی و با توجه به نتایج بدست آمده، از آن‌جایی که فراسنج‌های عملیات حرارتی آستمپر شامل دما و زمان تا حد زیادی ویژگی‌های ماده را تحت تاثیر قرار می‌دهند، در مرحله‌ی سیکل آستنیته بهبود نفوذ کربن از فریت در حال رشد به درون آستنیت و ایجاد شرایط بهینه جهت واکنش تبدیل فریت به آستنیت پر کربن در مرحله‌ی آستمپر مد نظر می‌باشد و بایستی انرژی ترمودینامیکی سامانه کاهش یابد و هم‌چنین، در مرحله‌ی سیکل آستمپرینگ چون جوانه زنی و رشد فریت با سرعت بالای نفوذ کربن لازم است، بر این اساس سیکل عملیات حرارتی با دمای آستنیته‌ی ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه و نیز سیکل آستمپرینگ در دمای ۳۹۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه در مورد نمونه‌ای با ترکیب شیمیایی: کربن ۳/۵۸درصد، سیلیسیم ۲/۸۰درصد، منگنز ۰/۱۳درصد، مولیبدن ۰/۲۳درصد، نیکل ۰/۸۷درصد، مس ۰/۵۵درصد، منجر به استحکام نهایی ۹۰۰ نیوتن/ میلیمتر مربع، استحکام تسلیم ۷۰۵ نیوتن/ میلیمتر مربع، سختی ۲۳۲ برینل، ازدیاد طول نسبی ۱۵درصد و استحکام خستگی ۳۷۰ نیوتن/ میلیمتر مربع می‌گردد که مطلوب هدف این پژوهش می‌باشد.

"چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری" یا MADI با مشخصات یاد شده در مقایسه با چدن نشکن آستمپر معمولی گرید یک استاندارد آمریکایی از یک سو استحکام آن تا حدودی حفظ شده و از سوی دیگر، کاهش میزان سختی (عموماً پذیرفته شده است که مواد با سختی بین ۱۷۰ تا ۲۵۰ برینل به اندازه‌ی کافی قابلیت ماشین‌کاری دارند و پر واضح است که هرچه سختی ماده بالاتر باشد، سایش ابزار برش بیش‌تر است. افزون بر این، کار سختی ایجاد شده در حین ماشین‌کاری، به دلیل تمایل آستنیت باقی‌مانده به استحاله به مارتنزیت ماشین‌کاری را دشوارتر می‌کند [۱۵و۱۰و۲]) و افزایش ازدیاد طول نسبی آن موجب افزایش ۲۰ درصد قابلیت ماشین‌کاری و افزایش ۲۰ درصد استحکام خستگی می‌گردد. بنابراین، می‌توان این ماده‌ی جدید را با چدن‌های نشکن آستمپر معمولی و متناسب با آن، فولادهای فورج که با محدودیت ماشینکاری مواجه هستند، جایگزین کرد. افزون بر این، مهم‌ترین مزیت اصلی این خانواده از چدن‌های نشکن آستمپر افزایش راندمان از نقطه نظر کاهش زمان و افزایش سرعت تولید (حذف یک مرحله عملیات ماشین‌کاری پیش از عملیات حرارتی، کاهش عناصر آلیاژی، کاهش دما و زمان سیکل عملیات

حرارتی) نسبت به چدن‌های نشکن آستمپر معمولی

Irons having Different Austempering Temperatures and Times", *Materials and Design*, 29 (2008) 937–942
11- J. Aranzabal., I. Gutierrez., and J. Urcola., "Influence of Heat Treatment on Microstructure of Austempered Ductile Iron", *Mater. Sci. Technol.*, 1994, 10:728-737
12- K. Brandenberg., "Machining Austempered Ductile Iron", *Application Engineer*, Applied Process Inc. Technologies Div. Livonia, MI, SME Report, 5/2002
13- S. Yoshino., "Mechanical Properties of Fatigue of Austempered Ductile Iron", in *2nd International Conference on ADI, ASME-Gear Research Insitute*, 1986, pp. 337-348
14- J.F Janowak., Alagarsamy A, and Venugopalan D., "Fatigue Strength of Commercial Ductile Irons". *AFS Trans*., 1990; 123:511–518.
15- J. Zapletal., S. Vechet., J. Kohout., and K. Orbtlik.,"Fatigue Life Time of Austempered Ductile Iron from ultimate Tensile Strength to Permanent fatigue limit",J.Strength of Materials, Vol.40,No.1, 2008,pp.32-35.
16- U. Seker., and H. Hasirci., Evaluation of machinability of austrempered ductile irons in terms of cutting forces and surface quality, journal of Materials Processing Technology 173, pp 260-268, 2006
17- O. J. Moncoda., R. H. Spicacci., and J. A. Sikora., "Machinability of Austempere Ductile Iron", *AFS Trans.*, 1998, 106:39-44
18- O. Yanagisawa., and N. Varahraam., "Properties of Austempered Ductile Iron in Equipment Designed for Consecutive in-stream Treatment Gravity-Die Casting, and Direct Austempering", *Cast*
۱۹- تدین سعیدی، م.، و ثابت، ح. مبانی چدن نشکن، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، سال ۱۳۸۶.

می‌باشد.

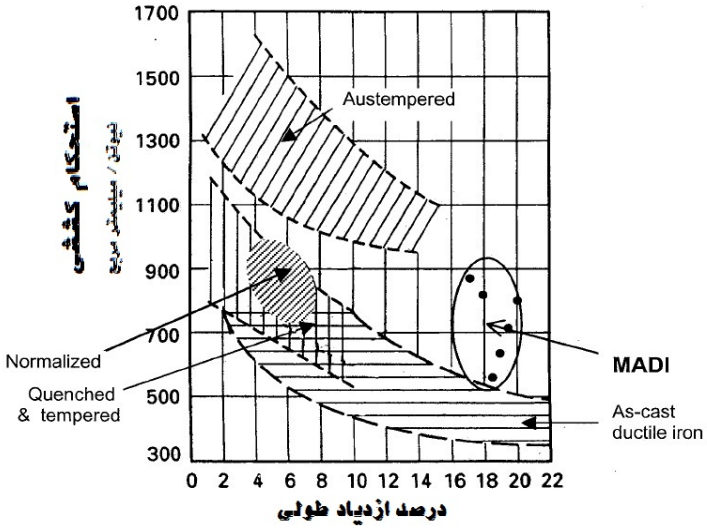
منابع

1- John R. Keough., "ADI Developments in North America", *World Conference on ADI*, USA, Sep. 2002.
2- J. R. Keough., "Austempered Ductile Iron", Section VI, Sorel Metal, *Ductile Iron Data for Design Engineers*, Aug.1998
3- Alan P. Druschitz., and David C. Fitzgerald., Introduction a new Machinable Austempered Ductile Iron, 2003 SAE World Cngress, Detroit, Michigan, March 3-6, 2003
4- F. Zanardi., Fatigue properties and machinability of ADI, Italy, Fonderia, 10, pp.27-32, 2005.
5- B. Kovacs., Heat treating of austempered ductile iron, AFS Trans.91-75, pp.281-286, 1991
6- S.E. Stenford., J. Storesun., and R. Sandstorm., "Influence of Heat Treatment and Composition on the Mechanical Properties and Machinability of Austempered Ductile Iron", *ASME*, 1986, pp. 227-236
7- T. Shiokawa., "The Influence of Alloying Elements and Heat Treatment Condition on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron", in *Proc. of 3rd International Conference on ADI*. Chicago, 1991. pp.375-387
8- B. Y. Lin., E. T. Chen., and T. S. Lei., "The Effect of Alloy Elements on the Microstructure and Properties of Austempered Ductile Irons", *Scripta Metall. Mater.*, 1995, 32: 1363-1367
9- M. C. Cakir., A. Bayram., Y. Isik., and B. Salar., "The Effects of Austempering Temperature and Time onto the Machinability of Austempered Ductile Iron", *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, 407:147-153
10- M.C. Cakir., and Y. Isik., "Investigating the Machinability of Austempered Ductile

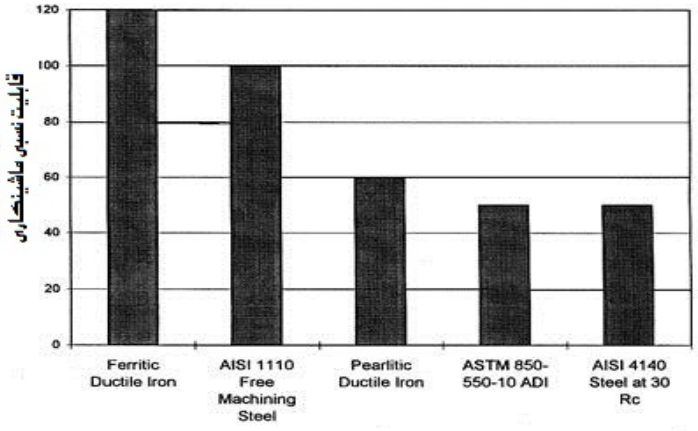
پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ.

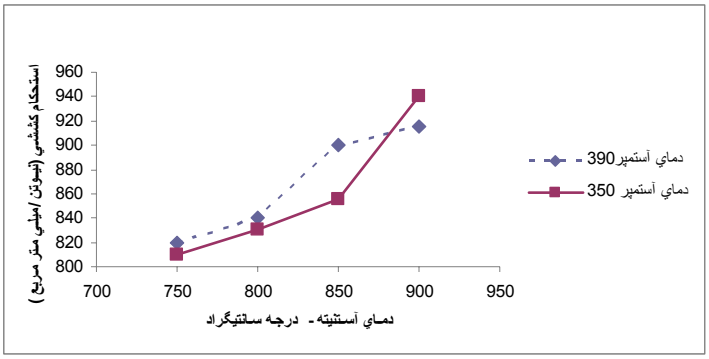
Moدرصد	Cuدرصد	Niدرصد	Mnدرصد	Siدرصد	Cدرصد
۰/۲۳	۰/۵۵	۰/۸۷	۰/۱۳	۲/۸۰	۳/۵۸



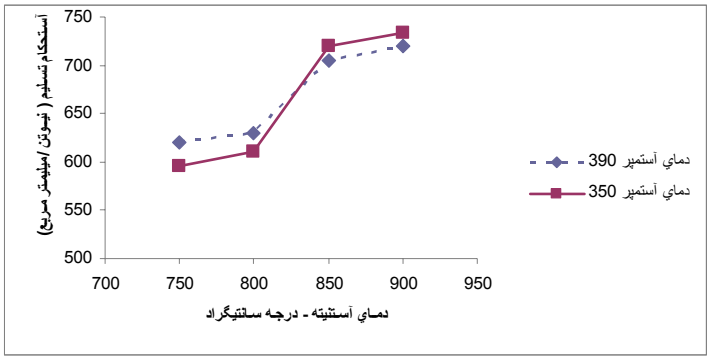
کاری" با سایر مواد.شکل ۱- مقایسه‌ی ویژگی‌های مکانیکی "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین



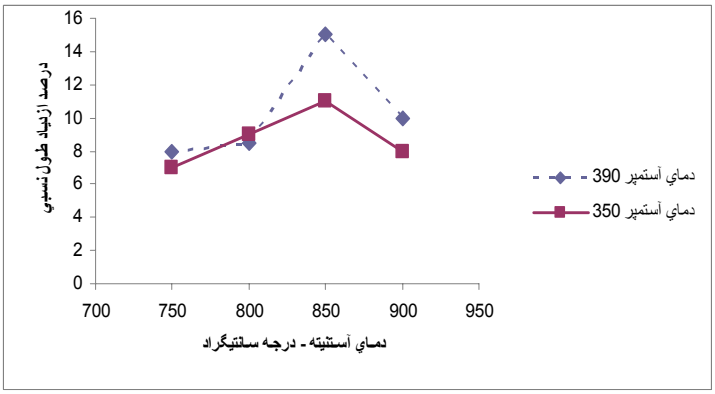
شکل ۲- مقایسه‌ی قابلیت نسبی ماشین‌کاری مواد گوناگون.



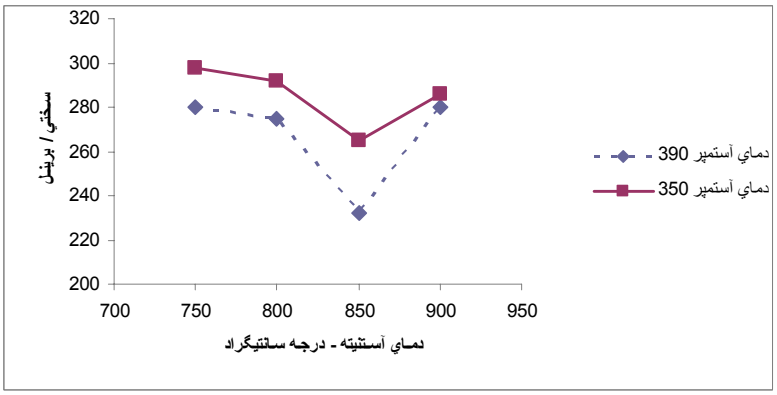
شکل ۳- مقایسه‌ی استحکام کششی در سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی آستمپر.



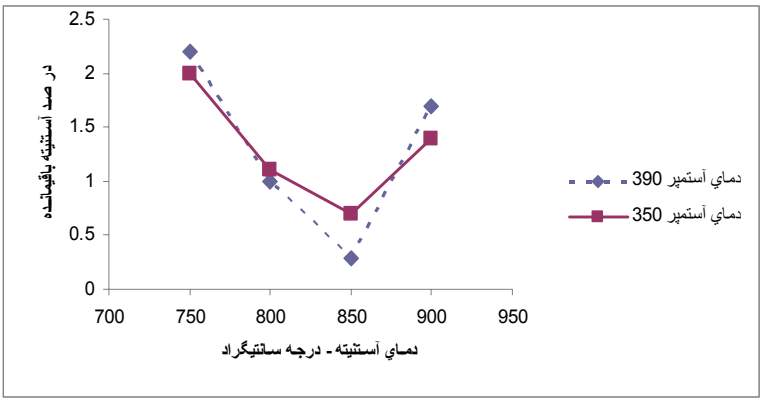
شکل ۴- مقایسه‌ی استحکام تسلیم در سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی آستمپر.



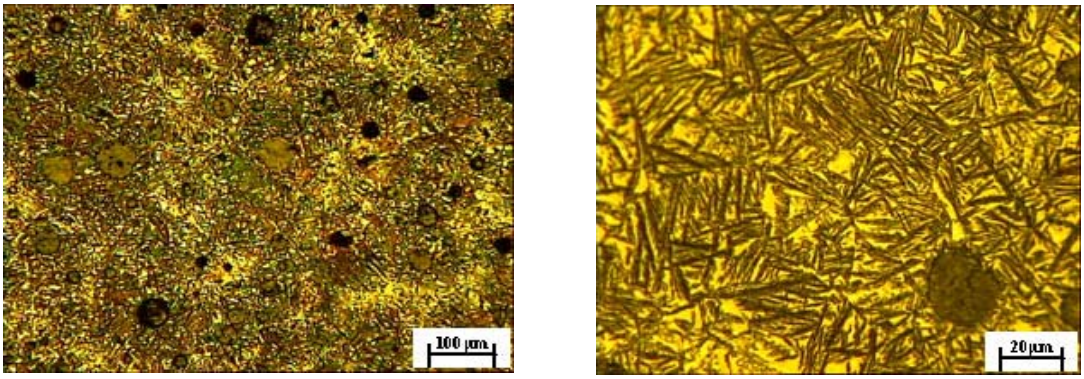
شکل ۵- مقایسه‌ی درصد ازدیاد طول نسبی در سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی آستمپر.



شکل ۶- مقایسه‌ی مقادیر سختی در سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی آستمپر.

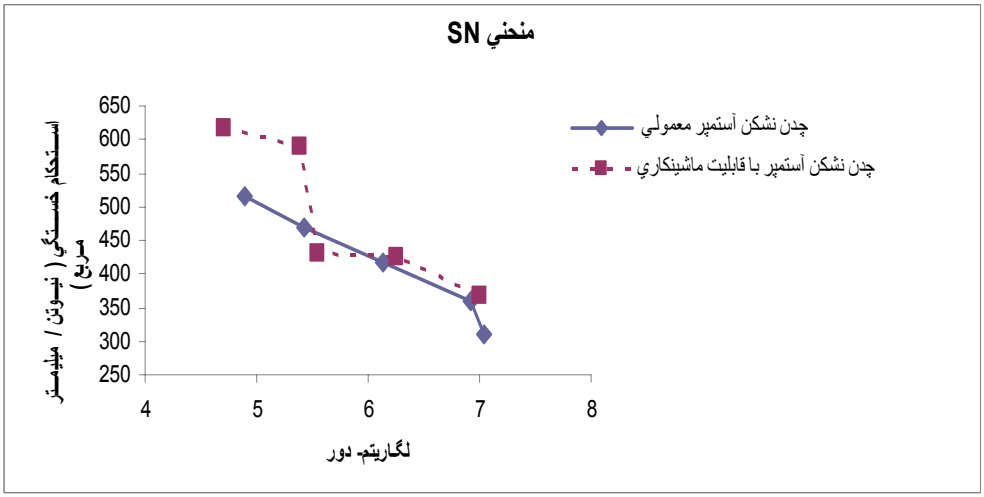


شکل ۷- مقایسه‌ی درصد آستنیت باقیمانده در سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی آستمپر.

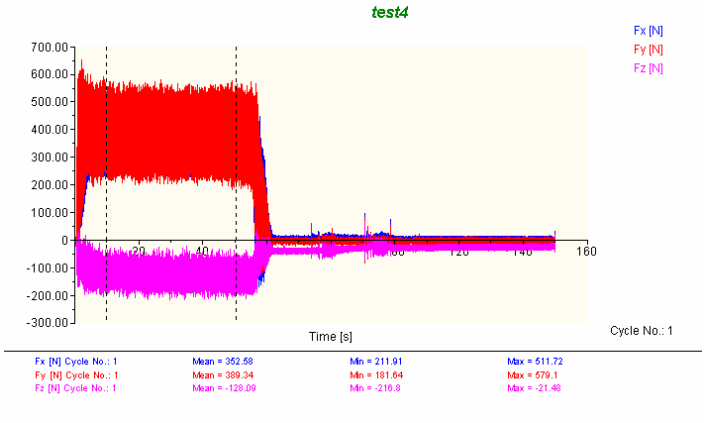


الف ب

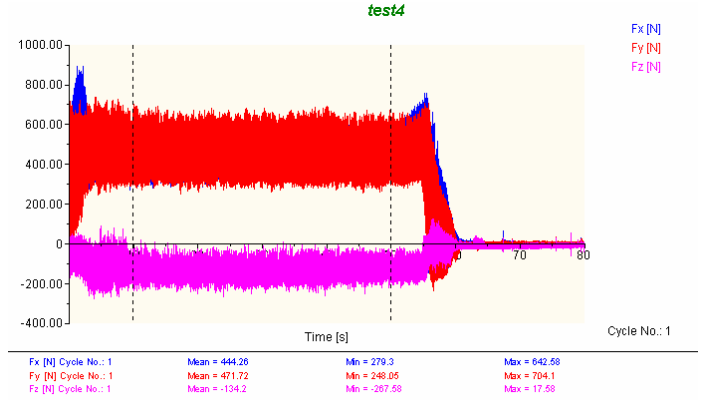
شکل ۸- الف، ساختار میکروسکوپی نمونه‌ی آستنیته در ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد و آستمپر در ۳۹۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه- ب، نایتال ۲ درصد و عملیات رنگ آمیزی حرارتی.



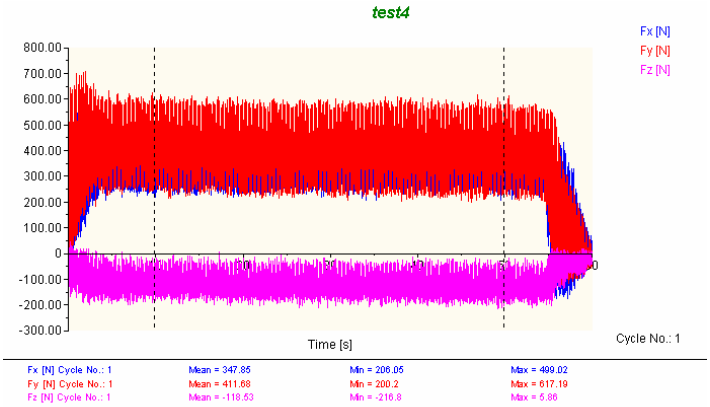
شکل ۹- منحنی مقایسه‌ی استحکام خستگی بر حسب تعداد دور چدن نشکن آستمپر معمولی با "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری".



چدن نشکن معمولی



چدن نشکن آستمپر معمولی



"چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری"

شکل ۱۰- نمودار تغییرات نیروهای برشی (در سه محور مختصات) برای چدن نشکن معمولی، چدن نشکن آستمپر معمولی و "چدن نشکن آستمپر با قابلیت ماشین‌کاری".