فولادهای تولاکس و قابلیت‌های آن در جایگزینی به‌جای دیگر فولادها

نوید صفرپور[۱]، عیسی خوران[۲]، محمد خوران[۳]

۱ کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه تهران، تهران

۲ کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشکدهٔ مهندسی مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، eisa.khoran@gmail.com

۳ دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی اسفراین، اسفراین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۳۱

چکیده

فولادهای تولاکس آخرین محصول شرکت فولادسازی اس. اس. ای. بی. در سوئیس هستند. این شرکت در سال‌های قبل فولادهای پراستفاده دیگری مانند هاردآکس[۱] را که یک فولاد ضدسایش متداول در صنعت است را نیز تولید و روانه بازار کرده است. فولادهای تولاکس با هدف جایگزینی فولادهای متداول مورد استفاده در صنعت ماشین‌سازی ساخته شده‌اند. فولادهای تولاکس در سه دستهٔ تولاکس ۳۳، تولاکس ۴۰ و تولاکس ۴۴ ساخته و روانه بازار شده‌اند. به‌طور معمول فولادهای ماشین‌سازی مورد استفاده در صنعت تحت عملیات کوئنچ و تمپر قرار می‌گیرند تا سخت شوند و به خواص مورد نظر برسند. در نتیجه همین عمل نیز دارای تنش‌های باقیماندهٔ زیادی می‌شوند که کارایی این فولادها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و البته انجام این عملیات حرارتی هزینهٔ زیادی نیز به‌دنبال دارد؛ اما فولادهای تولاکس پیش‌سخت‌شده بوده و بعد از خرید تنها به ماشینکاری نیاز دارند و به‌دلیل انجام تمامی فرایندهای عملیات حرارتی در کارخانهٔ اس. اس. ای. بی. دارای کمترین میزان تنش باقیمانده هستند. هدف از انجام این پژوهش معرفی فولادهای تولاکس و کارایی آنها در صنعت و انجام مقایسه‌ای بین خواص این فولادها با فولادهای متداول صنعت ماشین‌سازی همچون سی. کی. ۴۵[۲]، ام. او. ۴۰[۳]، وی. سی. ان. ۱۵۰[۴] و وی. سی. ان. ۲۰۰[۵] می‌باشد. در پایان این نتیجه حاصل می‌شود که فولادهای تولاکس می‌توانند به‌راحتی جایگزین فولادهای متداول در صنعت شوند.

واژگان کلیدی: شرکت فولادسازی اس. اس. ای. بی.[۶]، فولاد تولاکس[۷]، تولاکس ۳۳[۸]، تولاکس ۴۰[۹]، تولاکس ۴۴[۱۰]

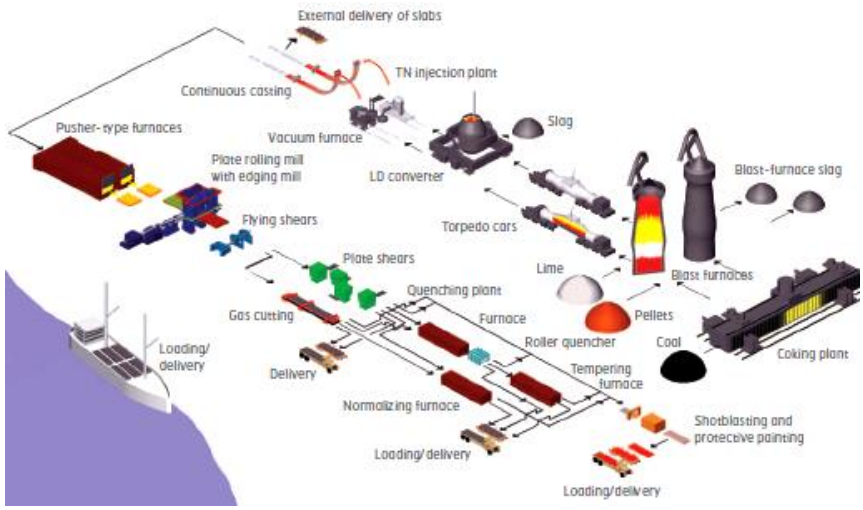
۱. مقدمه

فولادهای تولاکس از محصولات جدید شرکت اس. اس. ای. بی. سوئیس هستند. این شرکت فولادهای تولاکس را با هدف امکان استفاده در ابزارآلات و قطعات ماشین‌سازی و مواردی اینچنین طراحی و تولید کرده است. اصول و مبنای طراحی این فولادها بر نظریهٔ آماده به‌کار بودن استوار است؛ بدین معنا که این فولادها پس از خریداری نیازی به انجام هیچ‌گونه عملیات

حرارتی یا سختکاری ندارند و مستقیماً مورد استفاده و ماشینکاری قرار می‌گیرند [۱]. تمامی فولادهای ساخت شرکت اس. اس. ای. بی. از مرحلهٔ خرید مواد خام، که همان سنگ‌های معدنی است، تا تهیهٔ مواد نهایی، تماماً در کارخانهٔ واحدی انجام می‌شوند و بههمین دلیل نظارت شدیدی بر کار و رعایت نکات تولید با توجه به شرایط مناسب ابزار و کارخانه وجود دارد [۲]. در شکل ۱ روند ایجاد تولید مواد و فولادها در این کارخانه نمایش داده شده است. بهطور کلی فولادهای تولاکس در سه گروه متفاوت ساخته می‌شوند: تولاکس ۳۳، تولاکس ۴۰ و تولاکس ۴۴. فولادهای تولاکس ۳۳ دارای سختی در حدود ۳۰۰ برینل و تولاکس ۴۴ در حدود ۴۵ راکلول هستند. طبق ادعای شرکت سازنده، تولاکس ۴۴ سخت‌ترین فولاد کاملاً عملیات حرارتی شده و بدون تنش‌های باقیمانده است [۱].

۲. روش تولید

در تولید فولادهای تولاکس از روش CSR استفاده شده است. استفاده از این روش ریختگری بهعلاوهٔ وجود مقادیر کم عنصر کربن سبب شده است تا فولادهای تولاکس ساختاری تمیز و یکنواخت داشته باشند [۳]. در شکل ۲ تأثیر CSR بر ریزساختار و ناخالصی‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایی شماتیک از خط تولید فولاد تولاکس؛ شرکت فولادسازی اس. اس. ای. بی. در سوئیس [۲]

(ب) (الف)

شکل ۲. نمایی از ساختار فولاد؛ الف) بدون CSR، ب) با CSR [۳]

۳. مزایا

۳-۱. تافنس

چون این فولادها کربن کمی دارند و از طرفی در سرعت‌های بالای سردشدن تهیه شده‌اند، در مقابل فولادهای همردهٔ خود، دارای تافنس در حدود ۲ تا ۳ برابر بیشتر می‌باشند [۴].

۳-۲. کاربرد در دماهای بالا

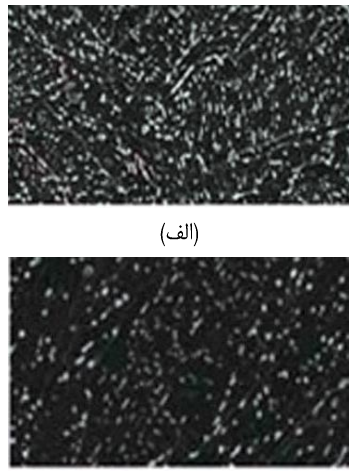
فولاد تولاکس ۴۴ دارای استحکام و تافنس در دماهای بالا تا حدود ۵۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد حتی در زمان‌ای طولانی نیز می باشد و بههمین دلیل در اجزایی که در دماهای بالا کار می‌کنند نیز کارایی خوبی از خود به نمایش گذاشته است [۱].

۳-۳. خستگی

مهمترین نکته در طراحی قطعات ماشین‌آلات را می‌توان عمر خستگی آنها دانست؛ زیرا شکست ۹۰ درصد قطعات ماشین‌آلات و قطعات مهندسی در اثر پدیدهٔ خستگی است. قطعات ساخته شده از فولاد تولاکس به‌دلیل دارابودن استحکام تسلیم بالا و همچنین تافنس مناسب دارای حد خستگی بالایی نیز می‌باشند. البته باید توجه داشت که در بحث خستگی مهمترین عامل تأثیرگذار بر عمر قطعات میزان صافی سطح قطعهٔ مورد نظر است [۱].

۳-۴. ساختار

ساختار فولادهای تولاکس نسبت به فولادهای مشابه به‌دلیل سرعت بالای سردشدن در هنگام عملیات کوئنچ، همچنین کمتربودن میزان کربن، دارای مقادیر بسیار کمتری از کاربید در زمینه و همین‌طور کاربیدهای ریزتر می‌باشد. به‌همین دلیل فولادهای تولاکس قابلیت ماشینکاری، جوشکاری و تافنس بیشتری نسبت به فولادهای متداول و همرده از خود نشان می دهند [۵]. در شکل ۳ ساختار و زمینهٔ فولادهای سری تولاکس نمایش داده شده است.



(الف)

(ب)

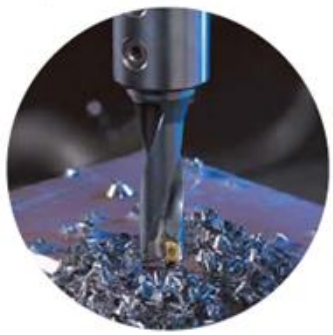
شکل ۳. ساختار فولاد تولاکس؛ الف) بدون اصلاح ساختار کاربید
ب) ساختار کاربید اصلاح‌شده [۵]

۳-۵. تنش‌های باقیمانده

فولادهای تولاکس به‌دلیل پیش‌ساخته بودن و طی‌کردن تمام مراحل تولید از جمله نورد و عملیات حرارتی در کارخانه، کمترین میزان تنش‌های باقیمانده را دارند. دمای تمپرینگ بالای این فولادها طی تولید سبب شده است تنش‌های باقیمانده در این مواد به‌حدی کم باشد که حتی پس از زمان طولانی ماشینکاری هم نیازی به عملیات تنش‌گیری وجود نداشته باشد [۲، ۵].

۳-۶. ماشینکاری

با توجه به ساختار فولاد تولاکس، همچنین درصد کربن کمتر آن نسبت به سایر فولادها، فولادهای تولاکس دارای قابلیت ماشینکاری بهتری نیز می‌باشند [۶-۷].



شکل ٤. ماشینکاری فولاد تولاکس [۷]

۳-۷. قابلیت جوشکاری و برشکاری با گاز

در بحث برشکاری و قابلیت جوشکاری فولادها، مهمترین نکته میزان کربن معادل این مواد است. به‌دلیل کربن معادل کمتر این فولادها نسب به فولادهای مشابه، قابلیت جوشکاری و برشکاری تولاکس بهتر است [۸].

۴. قابلیت پذیرش عملیات مهندسی سطح

۴-۱. نیتروژن‌دهی

فولاد تولاکس به‌دلیل وجود عناصر آلیاژی نیتریدزا دارای قابلیت عالی از نیتریده‌شدن و در نتیجه سختی سطحی بیشتر می‌باشد. این قابلیت فولادهای تولاکس سبب می‌شود تا بتوانند در کاربردهایی که نیاز به سختی سطحی بسیار زیاد هستند نیز استفاده گردند [۴].

۴-۲. پوشش‌دهی

برای پوشش‌دهی این فولادها باید از روش PVD استفاده کرد. برای ایجاد این لایهٔ پوشش بهتر است ابتدا یک زیرلایهٔ نیتریده شده ایجاد شود. با اعمال پوشش‌های مناسب می‌توان سختی این فولادها را تا حد بسیار بالای بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ ویکرز نیز رساند [۵].

۴-۳. تافنس فلز پایه

به‌دلیل بالا بودن تافنس تولاکس به‌عنوان فلز پایه، این فلز قابلیت مناسبی برای سخت‌کاری به‌روش نیتریده کردن و پوشش‌دهی پیدا کرده است؛ زیرا ترک‌های احتمالی ایجادشده در سطوح سخت‌شده راهی به داخل فلز پایه نخواهند یافت [۶].

۴-۴. سخت‌کاری

این فولادها را به روش‌های القایی، پلاسما و لیزر می‌توان سخت‌کاری سطحی کرد و به سطوح سختی ۵۰ تا ۵۵ راکول رساند [۴].

۵. نتایج استفاده به‌عنوان ابزار یا قطعات

۵-۱. قالب پلاستیک

قالب پلاستیکی نشان داده شده در شکل ۵ با جنس قبلی مورد استفاده توانای تولید در حدود ۱۰۰۰ قطعه را دارا بوده است. بعد از جایگزینی فولاد تولاکس به‌جای فولاد قبلی قالب توانایی تولید ۵۰۰۰ قطعه را پیدا کرد و همچنان نیز قابل استفاده بود [۶].

۵-۲. کار گرم

استفاده از فولاد تولاکس ۴۴ به‌جای دیگر مواد در قالب‌های دایکست آلومینیم به‌قدری رضایت‌بخش بوده است که قالب سازان از آن پس فقط سفارش تولاکس می‌دهند. جنس قبلی مورد استفاده در این مواد فولادهای ۱،۲۳۴۳ و ۱،۲۳۴۴ بود. در حال حاضر فولاد تولاکس ۴۴ قابلیت خود را برای جایگزینی این فولادها از خود نشان داده است [۱].

۵-۳. گیره و نگه‌دارنده

از این قطعه به‌عنوان گیره برای نگهداری ورق‌ها در تست کشش ورق‌های ضخیم استفاده می‌شود. مورد قبلی در این گیره فولاد ۱،۲۳۵۸ با سختی حدود ۵۵ راکول بود. بعد از جایگزینی فولاد تولاکس ۴۴ نیتریده شده به‌جای تعویض۲۰ قطعه در سال فقط نیاز به تعویض ۴ عدد بود. این مورد منجر به ذخیرهٔ ۱۲۰۰۰ یورویی سرمایه شد [۹].

به‌عنوان ریل راهنما در ماشین‌های که با فلز یا چوب کار می‌کنند: در این موارد به‌جای فولاد سی. کی. ۴۵ سخت‌کاری القایی شده از فولاد تولاکس ۳۳ استفاده شد. در نتیجه این عمل تعداد قطعات ساخته و مردود شده از ۲۵ درصد به ضفر رسید و البته با نیتریده کردن زمان بهینه کارایی نیز افزایش یافت. اگرچه از لحاظ قیمت خرید، تولاکس مقداری گرونتر بود، اما در نهایت سازنده این قطعات ذخیرهٔ مالی بیشتری داشت [۱].

استفاده به‌عنوان نگه‌دارندهٔ چرخ واگن: این واگن‌ها در واقع واگن‌های مورد استفاده در کوره‌های ریخته‌گری پیوسته می باشد. خریدار فقط به‌دلیل صدایی که این واگن‌ها در هنگام کارکرد ایجاد می‌کردند تمایل به تعویض جنس داشته‌است. پس از استفاده از فولاد تولاکس این صدا قطع و رضایت صد درصدی خریدار ایجاد شد [۱].

شکل ۵. قالب پلاستیکی ساخته‌شده از جنس فولاد تولاکس [۶]

شکل ۶. گیرهٔ تولیدی برای نگه‌داری ورق ساخته‌شده از جنس فولاد تولاکس [۱]

شکل ۷. ریل راهنما از فولاد تولاکس به‌جای سی. کی. ۴۵ [۱]

۵-۴. برش‌کاری با گاز و جوشکاری

تحت شرایط پیش‌گرم کردن و پس‌گرم کردن این فولادها قابلیت برش‌کاری و جوشکاری خوبی نسبت به فولادهای مشابه از خود نشان می‌دهند. [۸].

۵-۵. پولیش‌کاری

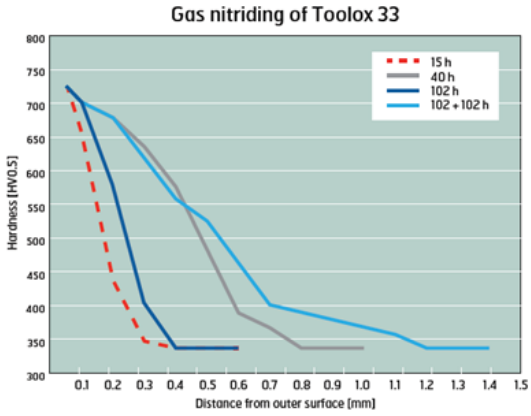
فولادهای تولاکس قابلیت صافی سطح و پولیش‌کاری عالی از خود نشان می‌دهند. شکل ۸ نمونهٔ پولیش‌شدهٔ فولاد تولاکس می‌باشد [۵].

۶. تولاکس ۳۳

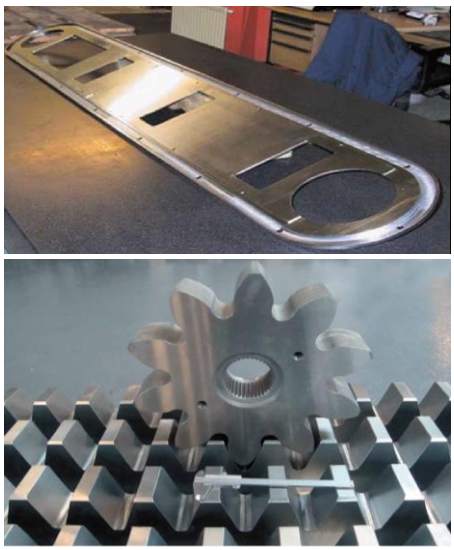
فولاد تولاکس ۳۳ به‌صورت کوئنچ و تمپرشده در شرایطی که دارای تافنس ضربه‌ای بالا و تنش باقیماندهٔ بسیار کمی است به بازار عرضه می‌شود. این فولاد دارای قابلیت ماشین‌کاری عالی و سختی متوسطی در حالت تهیه شده می‌باشد. به‌طور معمول تولاکس ۳۳ در ضخامت‌های ۵ تا ۱۳۰ میلی‌متر تهیه می‌شود. شرکت اس. اس. ای. بی. توانایی تولید ورق با هر ضخامتی را بنا بر درخواست شرکت مصرف‌کننده دارد [۴]. ترکیب شمیایی تولاکس ۳۳ در جدول ۱ و خواص مکانیکی این فولاد در جدول ۲ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود این فولاد دارای استحکام تسلیم بالایی است و این مورد سبب می‌شود تا در صنایع ماشین‌سازی قابلیت استفاده داشته باشد.

شکل ۸ نمونه‌ای سطح تمام‌شدهٔ نهایی از فولاد تولاکس [۱۰]

در جدول ۲ مقایسه‌ای میان خواص مکانیکی تولاکس ۳۳ با فولادهای وی. سی. ان. ۱۵۰ و ام. او. ۴۰ و همین‌طور 25CrMo4 آورده شده است. مشاهده می‌شود که از هر لحاظ تولاکس ۳۳ دارای خواص بهتری است. به استثنای خاصیت استحکام نهایی، که این خاصیت مواد نیز در مورد بحث تولید و طراحی قطعات ماشین‌سازی از لحاظ اهمیت در ردهٔ نخست قرار ندارد. جهت انجام سخت‌کاری تولاکس ۳۳ می‌توان از روش-های PVD یا نیتروژن‌دهی استفاده کرد. در شکل ۹ تأثیر عملیات سطحی نیتروژن‌دهی بر تولاکس ۳۳ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که سختی این فولاد از حدود ۳۲۰ ویکرز به‌حد بالای ۷۳۰ ویکرز نیز رسیده است. این میزان سختی، کارایی این فولاد را در مورد قطعاتی با سختی سطحی بالا و مورد نیاز در کاربردهای سایشی - ضربه‌ای را نشان می‌دهد. علاوه بر کاربردهای نشان داده شده از تولاکس ۳۳ در قسمت های قبل، در شکل ۱۰ تصاویری از دیگر کاربردهای این فولاد نمایش داده شده است [۳].



شکل ۹. اثر عملیات سطحی نیتروژن‌دهی سطحی تولاکس ۳۳ بر سختی



شکل ۱۰. نمونه‌ای از قطعات تولیدی از فولاد تولاکس ۳۳ [۳]

۷. تولاکس ۴۴

فولاد تولاکس ۴۴ به‌صورت کوئنچ و تمپرشده، با تافنس بالا و تنش باقیمانده کم، تهیه و توزیع می‌شود. از این فولاد به‌عنوان فولاد مناسب در صنایع قالب‌سازی و تولید قالب‌های اکستروژن استفاده می‌گردد. تولاکس ۴۴ به‌صورت ورق در ضخامت‌های ۶ تا ۱۳۰ میلی‌متر و به‌صورت میلگرد در قطرهای ۲۱ تا ۱۴۱ قابل تهیه است. در جدول ۳ خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی تولاکس ۴۴ آمده است. مشاهده می‌شود که خواص مکانیکی این فولاد از مابقی فولادهای مورد استفاده به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. سطح این فولاد را با روش‌های مختلف مهندسی سطح از جمله نیتروژن‌دهی می‌توان سخت کرد.

ساخت قالب دایکست از تولاکس ۴۴ در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. به‌دلیل استفاده از فولادی که توسط شرکت عملیات حرارتی شده است، در ساخت قالب دایکاست نشان داده شده ۶۰ درصد زمان کمتری سپری شده و کار ۳۰ روزه در ساخت این قالب در مدت ۱۲ روز انجام شده است. گفتنی است به‌طور کلی فولادهای ابزاری مناسب کار هستند که از طریق سیستم آلیاژی خود و عملیات حرارتی مناسب به سطوح استحکامی مورد نظر برسند. برای فولادهای تولاکس به‌دلیل اینکه قسمت عملیات حرارتی، که بخش بسیار مورد اهمیتی است، در کارخانهٔ تولیدکننده انجام می‌شود، به نوعی می‌توان گفت که خیال مصرف‌کنندگان از بابت بهینه‌بودن شرایط عملیات حرارتی و عدم وجود تنش باقیمانده راحت است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی فولاد تولاکس ۳۳ [۳]

chemical composition		mechanical properties								
C	0.22-0.24%		-40 ^{0}C	-20 ^{0}C	+20 ^{0}C	+200 ^{0}C	+300 ^{0}C	+400 ^{0}C	+500 ^{0}C
Si	0.6-1.1%	Tensile strength [MPa]			980	900			
Mn	0.8%	Yield strength [MPa]			850	900			
P	Max 0.0010%	Elongation, A (%)			16	12			
S	Max 0.003%	Compressive Yield strength [MPa]			800	750	700	590	560
Cr	1.0-1.2%	Impact toughness, Charpy-V[J]	27	45	100	170	180	180	
Mo	0.30%	Hardness [HBW]			310				
V	0.10-0.11%	Hardness [HRC]			29				
Ni	Max 1%								
CE	0.62-0.71	The Young's modulus[GPa]			210				
CET	0.4-0.44								
physical properties									
					+20 ^{0}C	+200 ^{0}C	+400 ^{0}C	+600 ^{0}C	
Thermal conductivity [W/m.K]					35	35	30	23	
Thermal expansion coefficient [10^{-6}/K]					13.1	13.1			

جدول ۲. مقایسه خواص مکانیکی گریدهای مختلف فولاد [۳]

	Impact toughness (Typical J at 20 ^{0}C)	Machining	Low internal stress	Yield strength (Typical, MPa)	Tensile strength (Typical, MPa)
1.7218 25CrMo4	45	*	**	600	650-1100
1.6582 36CrNiMo6	35-45	*	**	700	900-1400
1.7225 42CrMo4	30-35	*	**	675	900-1300
Toolox33	100	***	***	850	980

جدول ۳. خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی فولاد تولاکس ٤٤ [۵]

chemical composition		mechanical properties							
C	0.32%		-40 ^{0}C	-20 ^{0}C	+20 ^{0}C	+200 ^{0}C	+300 ^{0}C	+400 ^{0}C	+500 ^{0}C
Si	0.6-1.1%	Tensile strength [MPa]			1450	1380			
Mn	0.8%	Yield strength [MPa]			1300	1200			
P	Max 0.010%	Elongation, A (%)			13	10			
S	Max 0.003%	Compressive Yield strength, Offer 170 hrs soaking time			1250	1120	1120	1060 1060	930 930
Cr	1.35%	Impact toughness, Charpy-V [J]	14	19	30	60	80	80	
Mo	0.80%	Hardness [HBW]			450				
V	0.14%	Hardness [HRC]			45				
Ni	Max 1%								
CE	0.92-0.96	The Young's modulus [GPa]			210				
CET	0.55-0.57								
physical properties									
					+20 ^{0}C	+200 ^{0}C	+400 ^{0}C	+600 ^{0}C	
Thermal conductivity [W/m.K]					28	32	29	21	
Thermal expansion coefficient [10^{-6}/K]					13.1	13.5	13.5		

شکل ۱۱. تولید قالب دایکست از فولاد تولاکس ۴۴ [۱۲]

۸. مقایسهٔ خواص ماشینکاری تولاکس

در مقایسه‌ای که میان خواص و قابلیت ماشینکاری فولادهای تولاکس ۳۳، تولاکس ۴۴، سی. اس. ۱ و سی. اس. ۲ انجام شد، مشاهده شد که فولاد تولاکس ۳۳ قابلیت ماشینکاری بسیار بیشتری نسبت به دیگر فولادها دارد [۱۱]. برای آشنایی بیشتر ترکیب فولادهای مورد مطالعه در تحقیق استفاده شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ٤. ترکیب فولادها (برحسب درصد وزنی) مطالعه شده [۱۱]

	CS1	CS2	Toolox33	Toolox44
C	0.39	0.38	0.28	0.3
Si	0.33	0.26	0.57	0.61
Mn	1.46	1.39	0.91	0.89
P	0.006	0.01	0.008	0.01
S	0.062	0.009	0.0019	0.0009
Cr	1.84	1.86	1.18	1.23
Ni	-	0.94	0.71	0.66
Mo	0.15	0.17	0.39	0.79
V	-	-	0.117	0.145
Ti	-	-	0.025	0.026
Cu	-	-	0.02	0.04
Al	-	-	0.044	0.045
Nb	-	-	0.002	-
B	-	-	0.0019	0.016
N	-	-	0.0046	0.0036
HV30	339	307	326	458

۹. مقایسهٔ خواص فولادهای تولاکس با فولادهای مورد استفاده در ساخت پرس

۹-۱. میل‌لنگ

دلیل انتخاب جنس جنس وی. سی. ان. ۲۰۰[۱۱]، استحکام تسلیم بالا و در نتیجه مقاومت به خستگی بالاست. این فولاد سختی بالایی دارد، لذا در حالت کلی مقاوت به سایش خوبی نیز خواهد داشت. با توجه به کاتالوگ داده شده استحکام تسلیم این فولاد ۷۰۰ مگاپاسکال است، اما در کلید فولاد ۱۰۰۰ مگاپاسکال نیز ذکر شده است. با توجه به اطلاعات موجود در کاتالوگ فولادهای تولاکس ۴۰ و ۴۴ به‌راحتی قابلیت جایگزین‌شدن این فولاد را از لحاظ خواص مکانیکی دارا هستند.

۹-۲. انگشتی میل‌لنگ

جنس این پین هم بدلیل حساسیت بالا از وی. سی. ان. ۲۰۰ است. برای جایگزینی این فولاد هم می‌توان از تولاکس ۴۰ یا ۴۴ استفاده کرد. البته تولاکس ۳۳ نیز توانایی جایگزینی در این مورد را دارد.

۹-۳. چرخ‌دندهٔ محرک

چرخ دنده محرک در پرس ۶۳ تن از جنس ام. او. ۴۰ می‌باشد. این فولاد به‌دلیل سختی مناسب و تنش تسلیم خوب و در نتیجه عمر خستگی بالا استفاده شده است. فولاد تولاکس ۳۳ قابلیت جایگزینی ام. او. ۴۰ را دارد.

۱۰. جمع‌بندی

به‌طور کلی می‌توان گفت که فولادهای سری تولاکس به‌دلیل خواص مکانیکی مناسب، تضمین کیفیت مواد توسط سازنده و همچنین روش‌های نوین تولید که منجر به ایجاد ساختار یکنواخت در قطعات می‌شوند، قابلیت مناسبی برای جایگزینی با فولادهای متداول مورد استفاده را دارند.

جدول ۵. تریکب شیمیایی (برحسب درصد وزنی) فولادهای تولاکس در مقایسه با سایر فولادهای مورد استفاده در ساخت پرس

UNS.No	Name	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Others
-	Toolox 33	0.22-0.24	0.6-1.1	0.8	0.01	0.02	1-1.2	0.3	0.1-0.11	Ti, Cu. Al. Nb. B.
-	Toolox 40	0.28	1.1	0.6	0.01	0.02	1.22	0.5	0.12	-
-	Toolox 44	0.32	0.6-1.1	0.8	0.01	0.02	1.35	0.8	0.14	-
1.1191	Ck45	0.42-0.5	-	-	0.04	0.04	<0.4	<0.1	-	Ni<0.4
1.6582	VCN150 34CrNiMo6	0.3-0.38	0.5-0.8	<0.4	0.03	0.03	1.3-1.7	0.15-0.3	-	Ni1.3-1.7
1.6580	VCN200 30CrNiMo8	0.26-0.34	0.3-0.6	<0.4	0.03	0.03	1.8-2.2	0.3-0.5	-	Ni 1.8-2.2
1.7225	Mo40 42CrMo4	0.38-0.45	0.6-0.9	<0.4	0.035	0.035	0.9-1.2	0.15-0.30	-	-

جدول ٦. مقایسهٔ خواص مکانیکی فولادهای تولاکس با سایر فولادها

	Yield stress	UTS	Elongation	Hardness quenched	Impact toughness
Toolox 33	850	980	16		100
Toolox 40	1150	1260	14		38
Toolox 44	1300	1450	13		30
Ck45	490*	700-850	14	55-62	25
VCN150	1000* 700**	1200-1400	9	50-58	35-45
VCN200	1050*	1250-1450	9	48-56	30
Mo40	900* 675**	1000-1100	10	53-60	30

* این اعداد از کتاب کلید فولاد استخراج شده اند [۱۳].

** این اعداد از کاتالوگ شرکت فولاد ساب به‌دست آمده‌اند.

در بسیاری از مقالات علمی تولاکس ۴۴ را به نوعی مطابق با 30CrMo6 می‌دانند.

۵. مآخذ

[1] Kienzler, A., B. Okolo, A. Wanner, V. Schulze, D. Löhe, and A. Rothkirch. "Spatially resolved strain measurements of a micro milled mould."

[2] Persson, U., and H. Chandrasekaran. "Machinability of martensitic steels in milling and the role of hardness." In *Proc. 6th Int. Tooling Conf., Karlstad University, Sweden*, pp. 1027-1036. 2002.

[3] Hansson, Per. "MODERN PRE-HARDENED TOOL STEELS IN DIE-CASTING APPLICATIONS." *MATERIALI IN TEHNOLOGIJE* 42, no. I (2008): 97.

[۴] وجست. سی. دبلیو. *کلید فولاد*، واحد پژوهشی فولاد جوان، ۱۳۷۵.

[5] One of the Brochures of SSAB Company**,** *A better concept* , 2005.

[6] One of the Brochures of SSAB Company,*General Product Information*, 2005.

[7] One of the Brochures of SSAB Company**,** *Best practice for polishing of Toolox*,. 2009.

[8] One of the Brochures of SSAB Company**,** *Flame cutting and welding of Toolox*, 2006.

[9] One of the Brochures of SSAB Company, *Use of Toolox in engineering applications*, 2007.

[10] One of the Brochures of SSAB Company, *Machining recommendations for Toolox*, 2006.

[11] One of the Brochures of SSAB Company, *Toolox Engineering & Tool Steel Dimensional Program*, 2005.

[12] One of the Brochures of SSAB Company, *Toolox in round bars, Ultra high strength steel delivered heat-treated*, 2008.

[13] One of the Brochures of SSAB Company, *Product program*, 2004.

پی‌نوشت

1. Hardox
2. CK45
3. Mo40
4. VCN150
5. VCN200
6. SSAB
7. Toolox
8. Toolox33
9. Toolox40
10. Toolox44
11. VCN200