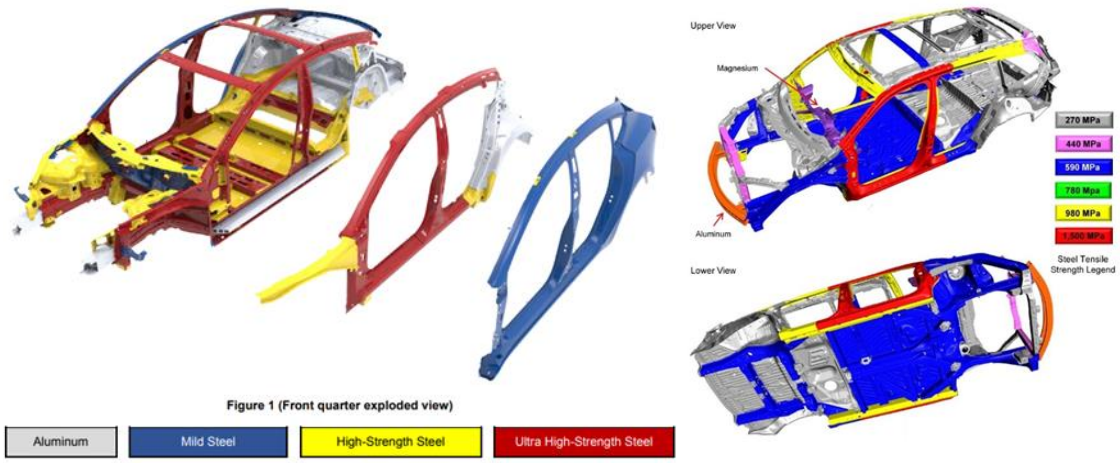
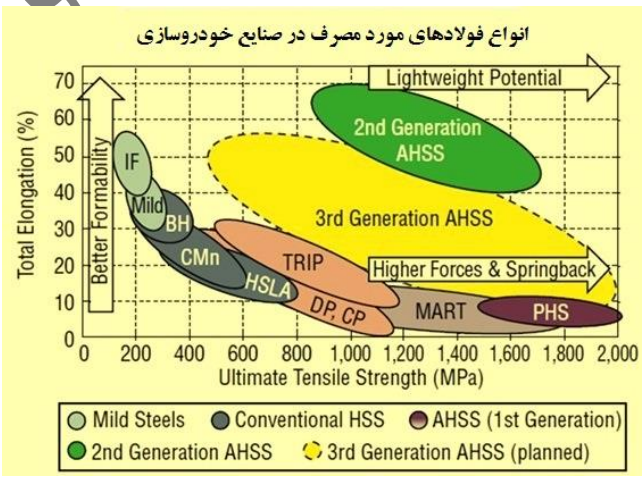
ساخت فولاد منگنزی فوق‌العاده مستحکم و شکل‌پذیر توسط فرایند نورد گرم

فولادهای منگنزدار با ۵ تا ۱۲ درصد وزنی منگنز تلفیقی عالی از استحکام و چقرمگی را فراهم آورده و به‌عنوان نسل سوم فولادهای اتومبیل در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱). اخیراً تلاش‌های گسترده ای در این زمینه صورت گرفته و منجر به پیشرفت چشمگیری در توسعه فولادهای منگنزدار شده است. گزارش شده است که خواص مکانیکی این نوع فولادها با توجه به میزان آستنیت باقی‌مانده در ساختار، تغییر می‌کند و در نتیجه بسیار مهم است که با کنترل پایداری مکانیکی و میزان آستنیت باقی مانده، خواص مکانیکی بهتری حاصل شود.





شکل ۱: کاربرد انواع گریدهای مختلف فولادی مورد استفاده در صنعت خودروسازی

تازه‌ترین تحقیق در این زمینه منجر به تولید فولاد منگنزدار با استحکام و چقرمگی فوق‌العاده عالی شده است. در این تحقیق با استفاده از ترکیب فرایند نورد گرم و افزودن کنترل شدهٔ وانادیم حین ریخته‌گری، یک فولاد با استحکام بسیار بالا ساخته شده است؛ که قابلیت شکل‌پذیری خوبی نیز دارد. برای ساخت این فولاد، دو نمونه در یک کوره القایی تحت خلأ با ظرفیت ۵۰ کیلوگرم ذوب شده و به صورت شمش ریخته شد. هردو نمونه دارای تقریباً ده درصد منگنز بوده بطوریکه به یکی از آن‌ها وانادیم اضافه شده است و نمونه دوم به‌عنوان مرجع و برای بررسی اثر افزودن وانادیم بررسی شده است. بدین ترتیب یک نمونه فولاد ۱۰Mn و دیگری همان فولاد با حضور ۰/۷٪ وانادیم به‌عنوان افزودنی مورد بررسی قرار گرفتند.

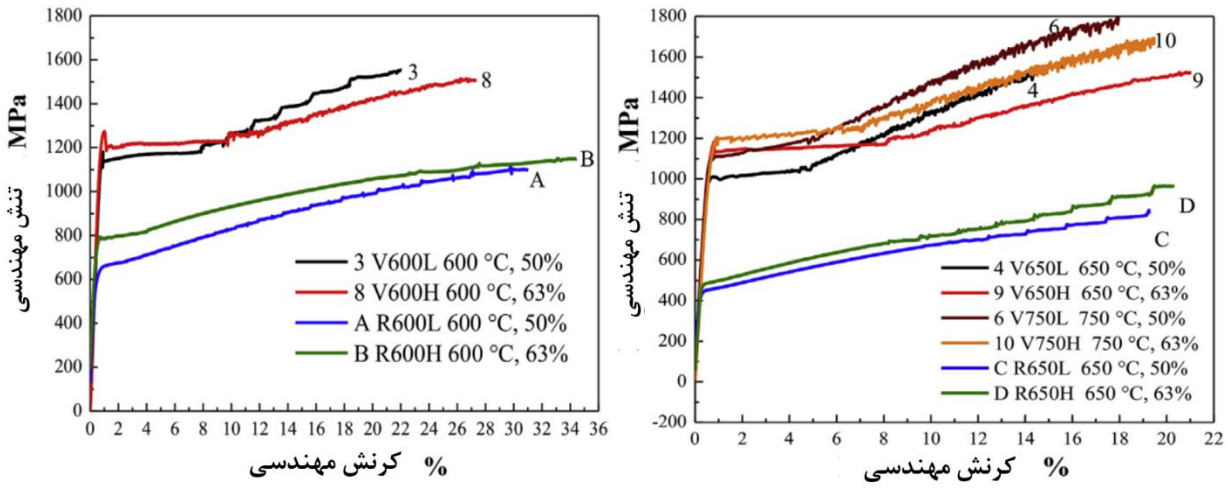
با استفاده از نرم‌افزار Thermal-Calc درصدهای فازی تعادلی نمونه‌های فولادی در دماهای مختلف محاسبه شده است. پس از ریخته‌گری، فرایند فرج گرم بر روی شمش‌ها انجام شده تا بیلت‌هایی با ضخامت ۴۰ میلی‌متر ساخته شود. سپس بیلت‌ها به‌منظور عملیات انحلالی جهت حل شدن کامل کربونیترید وانادیم تا دمای ۱۱۵۰درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان ۲/۵ ساعت حرارت داده شدند. در ادامه، بیلت‌ها تا رسیدن به ضخامت ۴ میلی‌متر و در دمای ۸۰۰ درجه نورد گرم شده و پس از آن توسط آب تا دمای اتاق سرد شدند تا از رسوب‌دهی کاربید وانادیم جلوگیری شود. قطعات نورد شده مجدداً تا رسیدن به ضخامت بین ۲–۱/۵ میلی‌متر در محدوده دمایی بین ۸۰۰–۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نورد گرم شدند. چندین فرایند شکل‌دهی دیگر نیز در دماهای مختلف و برای مدت زمان‌های متفاوت بر روی این نمونه‌ها انجام شده، تا قطعات نهایی ساخته شوند. در واقع با ترکیب چندین مرحله عملیات حرارتی، بهینه‌سازی ساختار و خواص مکانیکی انجام شده است. مشخصات مربوط به نورد گرم ورق‌های فولادی در جدول زیر ارائه شده است.

No.	نمونه	گرید فولاد	فرایند نورد گرم			
			دمای نورد	تعداد سیکل نورد	ضخامت نهایی (mm)	نسبت کاهش نهایی
1	V250L	V–10Mn	250	4	2.0	50%
2	V400L	V–10Mn	400	2	2.0	50%
3	V600L	V–10Mn	600	2	2.0	50%
4	V650L	V–10Mn	650	2	2.0	50%
5	V700L	V–10Mn	700	2	2.0	50%
6	V750L	V–10Mn	750	2	2.0	50%
7	V800L	V–10Mn	800	2	2.0	50%
8	V600H	V–10Mn	600	3	1.5	63%
9	V650H	V–10Mn	650	3	1.5	63%
10	V750H	V–10Mn	750	3	1.5	63%
A	R600L	10Mn	600	2	2.0	50%
B	R650L	10Mn	650	2	2.0	50%
C	R600H	10Mn	600	3	1.5	63%
D	R650H	10Mn	650	3	1.5	63%

در این روش، نه تنها ذرات ریز کاربید وانادیم به صورت گسترده در فریت و آستنیت ترسیب می‌شوند، بلکه توزیع دو حالتی[1] اندازه دانه‌های آستنیت باقی مانده نیز حاصل می‌شود. از این طریق، پس از آنیل بین

[1]. bimodal

بحرانی[۲] فولاد منگنز دار آلیاژی شده با وانادیم، همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، استحکام تسلیم تا ۶۵۰ مگا پاسکال افزایش یافت و چقرمگی آن دچار هیچ گونی افت و تخریبی نشده است. در حالی که استحکام‌دهی رسوبی[۳] محاسبه شده توسط تئوری کلاسیک Ashby-Orowan بیشتر از ۴۰۰ مگا پاسکال نمی‌باشد. کمی‌کردن مکانیزم‌های ممکن برای استحکام دهی نشان داد که استحکام دهی توسط نابجایی‌ها بایستی سهم مازادی را برای افزایش داشته باشد. زیرا بازیابی نابجایی‌ها در فاز آستنیت در اثر حضور نانوذرات رسوب کرده می‌تواند تا میزان زیادی به تأخیر افتد. به بیان دیگر دلیل این افزایش استحکام، ترسیب ذرات نانومقیاس کاربید وانادیم در دانه‌های فریت و آستنیت است. در فولاد آلیاژی حاوی وانادیم، دانه‌های درشت آستنیت‌های باقی مانده، ابتدا در طول تسلیم و در تنش‌های بالاتر از حد تحمل به مارتنزیت استحاله یافته و به دنبال آن به وسیله کار سختی مشخص ایجاد شده، به علت برخورد و ازدیاد نابجایی‌ها دچار پدیده‌های دوقلویی ناشی از تغییر شکل (TWIP)[۴] و استحاله ناشی از تغییر شکل (TRIP)[۵] در دانه‌های ریز آستنیت باقی مانده می‌شود. بطوریکه بهترین نمونهٔ ساخته شده از این نوع آلیاژ دارای استحکام تسلیم ۱/۵ گیگا پاسکال و ۲۸٪ کرنش نهایی بوده است. (شکل ۲)



شکل۲: خواص مکانیکی انواع فولادهای منگنزدار در شرایط مختلف عملیاتی نورد گرم

[۲]. intercritical annealing
[۳]. precipitation strengthening
[۴]. Twinning induced plasticity
[۵]. Transformation induced plasticity