



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران جنوب
دانشکده تحصیلات تکمیلی

سمینار برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
“M.Sc.”
مهندسی مواد-شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

عنوان

فولادهای پرآلیاژ رسوب سخت شونده و سوپر آلیاژها
روش‌های تولید، خواص و کاربردها

استاد راهنما:

نگارش:

فهرست مطالب

عنوان مطالب	شماره صفحه
چکیده	۱
مقدمه	۲
فصل اول: کلیات	۳
۱-۱- مقدمه‌ای بر سوپرآلیاژها	۴
۲-۱- مقدمه‌ای بر فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده	۶
۲-۱-۱- مزایا و محدودیت‌های فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده	۶
فصل دوم: سوپرآلیاژها و فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده	۹
۱-۲- سوپرآلیاژها	۱۰
۱-۱-۲- ترکیب شیمیایی و ساختار سوپرآلیاژها	۱۱
۲-۱-۲- ریخته‌گری سوپرآلیاژها	۱۲
۲-۲- فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده	۱۴
۱-۲-۲- انواع فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده	۱۴
۱-۱-۲-۲- فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده حاوی نیکل، کبالت و مولیبدن	۱۴
۲-۱-۲-۲- فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده حاوی تنگستن	۱۵
۳-۱-۲-۲- فولادهای حاوی تنگستن و نیکل	۱۵
۴-۱-۲-۲- فولادهای حاوی تنگستن، نیکل و کبالت	۱۶
۵-۱-۲-۲- فولادهای حاوی تنگستن، نیکل و کرم	۱۶
۶-۱-۲-۲- فولادهای حاوی تنگستن و کبالت	۱۷
۲-۲-۲- فولاد حاوی تنگستن، نیکل و منگنز	۱۷
فصل سوم: روش‌های تولید سوپرآلیاژها و فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده	۱۹
۱-۳- ذوب القایی در خلأ (VIM)	۲۰
۱-۱-۳- کوره القایی تحت خلأ	۲۴
۲-۱-۳- عملیات ذوب القایی در خلأ	۲۷

- ۲۹-..... ۱-۲-۱-۳- انحلال گازها
- ۳۱-..... ۲-۲-۱-۳- هیدروژن زدایی
- ۳۲-..... ۳-۲-۱-۳- نیتروژن زدایی
- ۳۳-..... ۴-۲-۱-۳- اکسیژن زدایی
- ۳۸-..... ۵-۲-۱-۳- گوگرد زدایی
- ۴۱-..... ۶-۲-۱-۳- فسفر زدایی
- ۴۱-..... ۷-۲-۱-۳- حذف عناصر جزئی مضر
- ۴۲-..... ۸-۲-۱-۳- بررسی پایداری بوته
- ۴۵-..... ۹-۲-۱-۳- ذوب و آلیاژسازی فولادهای رسوب سخت شونده در عملیات VIM
- ۴۹-..... ۲-۳- فرآیند ذوب مجدد قوسی تحت خلاء (VAR)
- ۴۹-..... ۱-۲-۳- تشریح فرآیند ذوب مجدد قوسی تحت خلأ
- ۵۰-..... ۲-۲-۳- اجزاء کوره VAR
- ۵۳-..... ۳-۲-۳- تأثیر کیفیت الکتروود بر محصول VAR
- ۵۳-..... ۴-۲-۳- موارد استفاده روش VAR
- ۵۴-..... ۵-۲-۳- کنترل فرآیند VAR
- ۵۷-..... ۶-۲-۳- جزئیات حوضچه مذاب در فرآیند VAR
- ۶۰-..... ۷-۲-۳- موارد غیرعادی در فرآیند VAR و کنترل آنها
- ۶۰-..... ۸-۲-۳- عیوب شمش های VAR
- ۶۴-..... ۹-۲-۳- بررسی واکنش های متالورژیکی در حین فرآیند VAR فولادهای پرآلیاژ رسوب سخت شونده
- ۷۰-..... ۳-۳- ذوب مجدد با سرباره الکتریکی (ESR)
- ۷۰-..... ۱-۳-۳- اصول فرآیند ESR
- ۷۱-..... ۲-۳-۳- کوره ESR
- ۷۳-..... ۳-۳-۳- خصوصیات سرباره های ESR
- ۷۴-..... ۴-۳-۳- نقش سرباره در فرآیند ESR
- ۷۵-..... ۵-۳-۳- مزایای عمده فرآیند ESR
- ۷۶-..... ۶-۳-۳- تصفیه فولادها در فرآیند ESR
- ۷۶-..... ۷-۳-۳- ساختار فولادهای حاصل از ESR
- ۷۶-..... ۸-۳-۳- عوامل مؤثر در انتخاب سرباره برای فرآیند ESR
- ۷۸-..... ۹-۳-۳- ترکیبات استاندارد برای سرباره های ESR

۷۹	-----	ESR	در فرآیند شیمیایی و واکنشهای فیزیکی
۸۰	-----	ESR	مهم سرباره در فرآیند ESR
۸۹	-----		ذوب سه مرحله‌ای
۹۶	-----		فصل چهارم: خواص و کاربرد سوپرآلیاژها و فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده
۹۷	-----		۱-۴- خواص و کاربرد فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده
۹۷	-----		۱-۱-۴- متالورژی فیزیکی فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده
۱۰۱	-----		۲-۱-۴- تأثیر عوامل مختلف بر خواص فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده
۱۰۱	-----		۱-۲-۱-۴- مرحله ذوب و آلیاژسازی
۱۰۴	-----		۲-۲-۱-۴- مرحله تصفیه
۱۱۰	-----		۳-۲-۱-۴- مرحله فرآوری
۱۲۳	-----		۳-۱-۴- کاربرد فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده
۱۲۵	-----		۲-۴- خواص و کاربرد سوپرآلیاژها
۱۲۵	-----		۱-۲-۴- متالورژی فیزیکی سوپرآلیاژها
۱۲۹	-----		۲-۲-۴- ریزساختارها
۱۲۹	-----		۳-۲-۴- استحکام‌دهی سوپرآلیاژها
۱۳۱	-----		۴-۲-۴- رفتار کارسختی
۱۳۳	-----		۵-۲-۴- عملیات حرارتی
۱۳۵	-----		۶-۲-۴- کاربرد سوپرآلیاژها
۱۳۷	-----		فصل پنجم: نتیجه‌گیری
۱۳۸	-----		نتیجه‌گیری
۱۳۹	-----		پیشنهادها
۱۴۰	-----		مراجع
۱۴۶	-----		چکیده انگلیسی
۱۴۷	-----		جلد انگلیسی

فهرست جدول‌ها

شماره صفحه	عنوان
۷	جدول ۱-۱- تاریخچه تحقیق و توسعه فولادهای رسوب‌سخت‌شونده
۸	جدول ۲-۱- مزایای فولادهای رسوب‌سخت‌شونده
۱۲	جدول ۱-۲- دامنه متوسط عناصر آلیاژی اصلی و اثرات آنها بر سوپرآلیاژها
۱۵	جدول ۲-۲- ترکیب شیمیایی فولادهای رسوب‌سخت‌شونده تجاری با ۱۸ درصد وزنی نیکل
۳۱	جدول ۱-۳- واکنشهای گاززدایی تعادلی در خلأ
۳۵	جدول ۲-۳- ثابتهای تعادل رابطه اکسیژن‌زدایی در فاز گازی
۴۳	جدول ۳-۳- نسوزهای متداول در ساخت بوته کوره‌های VIM
۴۵	جدول ۴-۳- افت فشار ناشی از ناپایداری دیرگدازهای مختلف در تماس با مذاب فولاد کم کربن
۴۷	جدول ۵-۳- توان، فرکانس و ولتاژ مورد استفاده در چند کوره VIM با ظرفیتهای مختلف
۵۶	جدول ۶-۳- سرعت ذوب چند فلز و آلیاژ در روش VAR
۶۵	جدول ۷-۳- واکنشهای گاززدایی تعادلی در خلأ
۷۹	جدول ۸-۳- تعدادی از ترکیبات استاندارد سرباره‌های مورد استفاده در فرآیند ESR
۸۰	جدول ۹-۳- محل و نوع واکنش در مناطق حمام فلز و سرباره مذاب
۸۱	جدول ۱۰-۳- انرژی آزاد (ΔG) تشکیل اکسید در دمای ۲۰۰۰K
۸۲	جدول ۱۱-۳- تلفات اکسیدی آلیاژ Ni-Cr-Fe-Mo در فرآیند ESR
۸۲	جدول ۱۲-۳- تلفات اکسیدی فولاد بلبرینگ 1%C, 1.5%Cr در فرآیند ESR
۸۲	جدول ۱۳-۳- تلفات اکسیدی فولاد 3%Ni-Cr-Mo در فرآیند ESR
۸۴	جدول ۱۴-۳- تغییرات مقدار کربن در فرآیند ESR
۸۷	جدول ۱۵-۳- درجه گوگردزدایی با جریانها و سرباره‌های مختلف در فرآیند ESR
۸۸	جدول ۱۶-۳- مقایسه تفکیک گوگردزدایی در جریانهای مختلف فرآیند ESR
۹۲	جدول ۱۷-۳- ترکیب اکسیدهای آلیاژ 718 براساس آنالیز کمی اشعه x
۹۳	جدول ۱۸-۳- ماکزیمم قطری که با ذوب سه‌تایی تولید می‌شود
۹۷	جدول ۱-۴- محدوده خواص مکانیکی برخی از فولادهای رسوب‌سخت‌شونده بعد از آنیل
۱۰۱	جدول ۲-۴- ویژگیهای برخی از فازهای رسوبی در فولادهای رسوب‌سخت‌شونده
۱۰۴	جدول ۳-۴- مقایسه ناخالصیهای موجود در فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده
۱۰۷	جدول ۴-۴- تأثیر فرآیند ESR بر روی توزیع و اندازه آخالها در نواحی مختلف شمش ESR
۱۰۷	جدول ۵-۴- تأثیر فرآیند ESR بر تعداد آخالها در نواحی مختلف شمش ESR شده فولاد En24

- جدول ۴-۶- خواص مکانیکی الکتروود و شمش ESR شده در جهت طولی در فولاد (4340+V) ----- ۱۰۸
- جدول ۴-۷- خواص مکانیکی الکتروود و شمش ESR شده در جهت عرضی در فولاد (4340+V)----- ۱۰۸
- جدول ۴-۸- اثر عملیات همگن سازی بر روی خواص مکانیکی فولادهای پرآلیاژ ----- ۱۱۲
- جدول ۴-۹- ترکیب شیمیایی برخی از فولادهای پرآلیاژ رسوب سخت شونده ریختگی ----- ۱۱۳
- جدول ۴-۱۰- اثر همگن سازی بر روی خواص مکانیکی حالت آنیل فولاد پرآلیاژ ----- ۱۱۴
- جدول ۴-۱۱- خواص مکانیکی فولادهای پرآلیاژ رسوب سخت شونده استاندارد----- ۱۲۰
- جدول ۴-۱۲- برخی از کاربردهای فولادهای پرآلیاژ رسوب سخت شونده ----- ۱۲۴
- جدول ۴-۱۳- فازهای مشاهده شده در سوپرآلیاژها ----- ۱۲۷
- جدول ۴-۱۴- محدوده مجاز آلیاژی در ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن-نیکل ----- ۱۲۸
- جدول ۴-۱۵- عملیات حرارتی تابکاری انحلالی و سیکل های پیرسخت کردن چند سوپرآلیاژ ----- ۱۳۵

فهرست شکل‌ها

شماره صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱- ارتباط میان چقرمگی- استحکام برای چند فولاد با استحکام بالا و فولاد رسوب‌سخت‌شونده --- ۸
- شکل ۱-۲- شکل شماتیک یک پره توربین به همراه پره توربین ریخته‌گری شده ----- ۱۳
- شکل ۲-۲- زمان تولید پره‌های مختلف توربین به همراه دمای کاری آنها----- ۱۳
- شکل ۱-۳- روشهای تولید محصولات ریخته شده از شمش‌های VIM یا الکترودها ----- ۲۲
- شکل ۲-۳- شماتیک کوره القایی در خلاء----- ۲۶
- شکل ۳-۳- میزان انحلال نیتروژن در آهن مذاب و در حضور عناصر آلیاژی ----- ۳۰
- شکل ۴-۳- فشار اکسیژن در فضای بالای مذاب براساس تابعی از غلظت اکسیژن حل شده در مذاب ----- ۳۱
- شکل ۵-۳- تأثیر ظرفیت بوته و مدت زمان نگهداری بر روند حذف نیتروژن فولاد ----- ۳۳
- شکل ۶-۳- رابطه بین غلظت اکسیژن و کربن در فرآیند اکسیژن‌زدایی بوسیله کربن تحت خلاء----- ۳۷
- شکل ۷-۳- روند کاهش اکسیژن و کربن مذاب فولاد با گذشت زمان و در حین فرآیند ذوب----- ۳۷
- شکل ۸-۳- اثر مقدار کربن و سیلیسیم بر روند کاهش گوگرد از فولاد در حین ذوب تحت خلأ----- ۳۹
- شکل ۹-۳- روند تبخیر عناصر جزئی از آلیاژ 80Ni-20Cr و آهن خالص ----- ۴۲
- شکل ۱۰-۳- تغییر مقدار اکسیژن حل شده در مذاب چهار نوع فولاد مختلف در اثر تجزیه نسوز ----- ۴۴
- شکل ۱۱-۳- شماتیک کلی از یک سیکل ذوب برای سوپرآلیاژ پایه نیکل در کوره VIM----- ۴۹
- شکل ۱۲-۳- مقطع طولی از یک شمش فولاد آستنیتی تولید شده به روش VAR ----- ۵۰
- کل ۱۳-۳- طرح کوره VAR با الکتروود مصرف شدنی ----- ۵۱
- شکل ۱۴-۳- شمای ساده‌ای از سیستم کنترل الکتروود به روش وابسته به ولتاژ ----- ۵۲
- شکل ۱۵-۳- ارتباط بین شدت جریان ذوب و قطر شمش تولیدی در فرآیند VAR----- ۵۵
- شکل ۱۶-۳- ارتباط بین ولتاژ قوس با طول قوس در فرآیند VAR----- ۵۵
- شکل ۱۷-۳- فرکانس ریزش قطرات (DSF) نسبت به طول قوس بر حسب تابعی از جریان الکتریکی----- ۵۶
- شکل ۱۸-۳- سرعت ذوب در فرآیند VAR برای شمش‌های مختلف براساس قطر آنها ----- ۵۷
- شکل ۱۹-۳- حوضچه مذاب در فرآیند VAR----- ۵۸
- شکل ۲۰-۳- تغییرات سرعت ذوب نسبت به شدت جریان الکتریکی در فرآیند VAR----- ۵۹
- شکل ۲۱-۳- تغییرات عمق حوضچه مذاب نسبت به شدت جریان الکتریکی در فرآیند VAR----- ۵۹
- شکل ۲۲-۳- مقطع افقی سوپر آلیاژ پایه نیکل IN-718 ، ماکرواچ شده ----- ۶۱
- شکل ۲۳-۳- (الف) مقطع عمودی از آلیاژ IN-718 ، ماکرواچ شده برای نشان دادن نقاط سفید ----- ۶۲
- شکل ۲۴-۳- عیب طرح حلقه درختی در فولاد آلیاژی ----- ۶۳

- شکل ۳-۲۵- عیب خالدار شدن در مقطعی از شمش VAR شده فولاد ابزار ----- ۶۳
- شکل ۳-۲۶- فشار اکسیژن در فضای بالای مذاب براساس تابعی از غلظت اکسیژن حل شده در مذاب ----- ۶۴
- شکل ۳-۲۷- نمودار الینگهام برای اکسیدهای مختلف ----- ۶۹
- شکل ۳-۲۸- تغییر فشار بخار عناصر خالص با دما ----- ۷۰
- شکل ۳-۲۹- شماتیک فرآیند ESR ----- ۷۱
- شکل ۳-۳۰- نمایی از کوره ذوب مجدد با سرباره الکتریکی ----- ۷۲
- شکل ۳-۳۱- نمایی از کوره IESR (ذوب مجدد با سرباره الکتریکی تحت گاز خنثی) ----- ۷۳
- شکل ۳-۳۲- مناطق انجام واکنشها در فرآیند ESR ----- ۸۰
- شکل ۳-۳۳- حلالیت نیتروژن در آهن مذاب در دمای 1600°C ----- ۸۳
- شکل ۳-۳۴- گوگردزدایی در سیستم چهار تایی $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2\text{-SiO}_2$ ----- ۸۹
- شکل ۳-۳۵- تغییرات عنصر سخت کننده در بالا و پایین شمش آلیاژ 718 ----- ۹۰
- شکل ۳-۳۶- مقایسه تمیزی آلیاژ 718 بر اساس آزمایش پرتو الکترونی در فرایندهای مختلف ----- ۹۱
- شکل ۳-۳۷- مقایسه تمیزی آلیاژ 718 توسط Satton ----- ۹۲
- شکل ۳-۳۸- تعداد نسبی شاخص های فراصوتی در بیلت های دانه ریز VIM+VAR ----- ۹۳
- شکل ۳-۳۹- فرکانس نرماله شده انواع مختلف نقاط سفید آلیاژ 718 در طول یک سال ----- ۹۵
- شکل ۳-۴۰- فرکانس نرماله شده الگوی حلقه ای و شرایط دندریتی ----- ۹۵
- شکل ۴-۱- روابط فازی در سیستم Fe - Ni (a) شبه پایدار (b) تعادلی ----- ۹۸
- شکل ۴-۲- نمودار CCT فولاد رسوب سخت شونده 18Ni Marage 300 آنیل محلولی شده ----- ۱۰۰
- شکل ۴-۳- تأثیر تیتانیوم روی استحکام تسلیم (a) فولاد کبالت دار (نوع C) ----- ۱۰۳
- شکل ۴-۴- تأثیر ولتاژ بر روی عمق حوضچه مذاب در فرآیند ESR ----- ۱۰۵
- شکل ۴-۵- تأثیر جریان بر روی عمق حوضچه مذاب در فرآیند ESR ----- ۱۰۶
- شکل ۴-۶- تأثیر فرآیندهای VAR و VIM بر بهبود چقرمگی شکست فولادهای پرآلیاژ ----- ۱۰۹
- شکل ۴-۷- سطح شکست نمونه آزمایش ضربه شارپی برای شمش ریختگی فولاد پرآلیاژ ----- ۱۱۴
- شکل ۴-۸- سطح شکست نمونه آزمایش ضربه شارپی برای شمش ریختگی فولاد پرآلیاژ ----- ۱۱۵
- شکل ۴-۹- تأثیر دمای آنیل محلولی بر روی خواص کششی حالت آنیل فولاد رسوب سخت شونده ----- ۱۱۷
- شکل ۴-۱۰- تأثیر عملیات آنیل محلولی بر روی خواص مکانیکی فولاد رسوب سخت شونده کبالت دار ----- ۱۱۷
- شکل ۴-۱۱- تأثیر دمای آنیل محلولی بر روی (a) چقرمگی یک نوع فولاد رسوب سخت شونده ----- ۱۱۸
- شکل ۴-۱۲- نمودار تنش - کرنش فولاد پرآلیاژ رسوب سخت شونده C - 300 ----- ۱۲۱
- شکل ۴-۱۳- رابطه تنش جریان با نرخ کرنش و کرنش برای فولاد C - 300 در دمای اتاق ----- ۱۲۲

- شکل ۴-۱۴- تغییر $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$ و n و $\frac{TS}{YS}$ با ε° در ورقی از فولاد C-300-----۱۲۲
- شکل ۴-۱۵- تأثیر همزمان نرخ کرنش و سایز دانه آستنیت بر خواص کششی فولاد C-300-----۱۲۳
- شکل ۴-۱۶- تأثیر نورد سرد روی اندازه دانه آلیاژ A-286-----۱۳۲
- شکل ۴-۱۷- تأثیر کارسرد و پیرسازی بر سختی A-286-----۱۳۳

چکیده

سوپرآلیاژ و فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده از جمله آلیاژهای پرکاربرد در صنعت می‌باشند. انواع مختلف این آلیاژها خواص مطلوبی را در شرایط کاری مختلف به وجود می‌آورند. برای حصول خواص مکانیکی مناسب باید جدایش عناصر آلیاژی و ناخالصی‌ها در پایین‌ترین سطح قرار گیرند. لذا ریخته‌گری این آلیاژها باید در کوره ذوب القایی تحت خلأ^۱ (VIM) انجام شده و سپس تصفیه به روش‌های ذوب مجدد قوسی تحت خلأ^۲ (VAR) و یا ذوب مجدد تحت سرباره الکتریکی^۳ (ESR) انجام گردد. مراحل مختلف فرآوری این آلیاژها در ایجاد خواص مطلوب و کاربردهای خاص موثر هستند. در این پژوهش، روش‌های مختلف تولید و فرآوری سوپرآلیاژها و فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت‌شونده بررسی شده است. مشخص شده است که استفاده از روش‌های VIM، VAR و یا ESR تأثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی این آلیاژها دارد. ریزساختار این آلیاژها طی عملیات پیرسازی اصلاح شده و باعث ایجاد خواص متنوعی در آنها می‌شود.

¹ Vacuum Induction Melting

² Vacuum Arc Remelting

³ Electro Slag Remelting

مقدمه:

تولید سوپر آلیاژها در اواخر ۱۹۳۰ در کشورهای فرانسه، آلمان، انگلیس و ایالات متحده آغاز شد. آلیاژهای اولیه به صورت کارشده^۱ تولید می‌شدند. جهت افزایش استحکام این آلیاژها از عملیات حرارتی رسوب سختی استفاده می‌شد. از سال ۱۹۳۹ آلیاژهای Ni-Cr-Fe توسط شرکت Inco تولید شدند که با استفاده از عملیات حرارتی انحلالی و رسوب سختی به حداکثر استحکام دمای بالای خود می‌رسیدند. این آلیاژها استفاده وسیعی در پره های توربین پیدا کردند.

تکنولوژی ذوب القایی تحت خلأ در اواخر دهه ۱۹۵۰ باعث افزایش قابلیت کارپذیری گرم و تولید آلیاژهای با ترکیب پیچیده تر و ساختار کنترل شده تر از طریق ریخته‌گری دقیق تحت خلأ شد. کنترل انجماد و دانه‌بندی منجر به ساخت قطعات با انجماد جهت دار و تک کریستال گردید که باعث افزایش تحمل دمایی این آلیاژ شد. امروزه پره‌های توربین‌های گازی از طریق ریخته‌گری دقیق تحت خلأ تولید می‌شوند.

گروهی از سوپرآلیاژها بر مبنای ترکیبی از نیکل، آهن و کبالت تکامل یافته‌اند که برای کار در دماهای بالا در بازه $500-1100^{\circ}\text{C}$ و در موتورهای جت و توربین‌های گازی روی زمینی استفاده می‌شوند. در سوپرآلیاژهای پایه نیکل، بعضی از این عناصر، مثل آلومینیم و تیتانیم بسیار فعال هستند و برخی دیگر همچون نایوبیم یوتکتیک‌هایی با نقطه ذوب پایین تشکیل می‌دهند.

فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت شونده در زمره فولادهای فوق مستحکم می‌باشند که تحقیق بر روی آنها در سال ۱۹۵۸ با ابداع رده‌های ۲۰ و ۲۵ درصد نیکل شروع شد. با پی بردن به تأثیر مولیبدن و کبالت در افزایش استحکام و سختی آلیاژهای فوق، در اوایل دهه ۱۹۶۰ فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت شونده ۱۸ درصد نیکل کبالت‌دار بر پایه سیستم آلیاژی Fe-Ni-Co-Mo حاوی تیتانیم در سه رده تجاری ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ توسعه داده شده و بازاریابی شدند. سرانجام آلیاژهای دیگری مانند فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت شونده زنگ‌زن و فولادهای پرآلیاژ رسوب‌سخت شونده ویژه با استحکام بسیار زیاد در رده‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ به وجود آمدند. در طول دهه ۱۹۶۰ برای این آلیاژها دو نوع بازار، یکی در کاربردهای نظامی و هوافضا و دیگری ساخت قالب‌ها و ابزارها به وجود آمد.

^۱- wrought