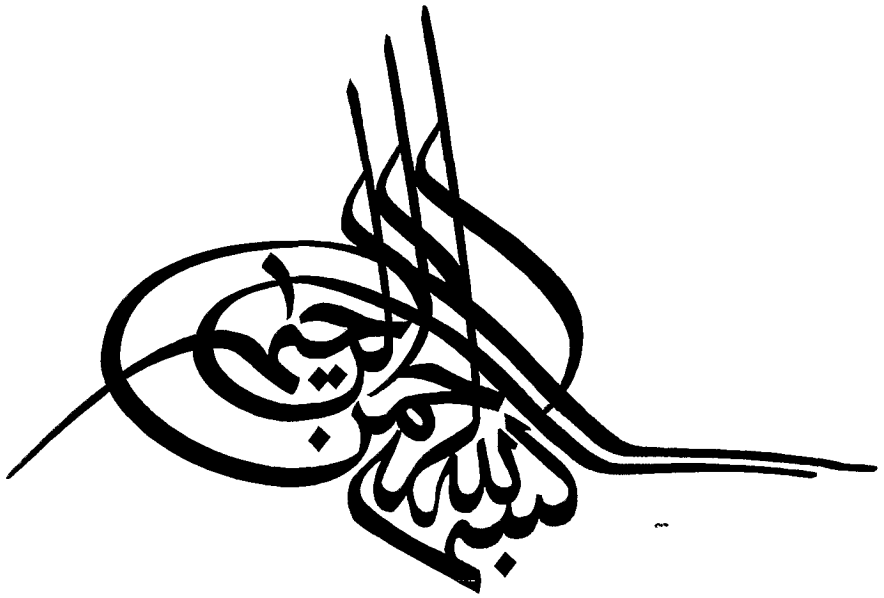
بسم الله الرحمن الرحيم

٤٨٢٩٩

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

تاثیر نیتروژن دهی پلاسمایی بر رفتار سایشی فولادهای زنگ نزن آستنیتی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد

علی فهامی

۴۸۲۹۶

۱۳۸۲/۷/۲۰

استاد راهنما

دکتر فخرالدین اشرفی زاده

استاد مشاور

دکتر محمد علی گلعذار

۱۳۸۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی‌ارشد رشته شناسایی و انتخاب مواد آقای علی فهامی

تحت عنوان

تأثیر نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر رفتار سایشی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی

در تاریخ ۸۰/۱۲/۶ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب قرار گرفت.

۱ـ استاد راهنمای پایان‌نامه : دکتر فخرالدین اشرفی‌زاده

۲ـ استاد مشاور پایان‌نامه: دکتر محمدعلی گلعذار

۳ـ استاد داور ۱: دکتر سیداحمد جنابعلی جهرمی

۴ـ استاد داور ۲: دکتر مهدی صالحی

۵ـ مسئول تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر احمد ساعتچی

تقدیر و تشکّر

از راهنماییهای استاد گرامی دکتر اشرفی‌زاده که همواره کارگشا بوده است و از مسئولین محترم آزمایشگاههای دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان و مرکز مهندسی سطح ایران و از کلیه دوستانی که مرا در انجام این پروژه کمک کردند کمال تشکّر را دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر که هر چه دارم از آنها دارم و تقدیم به خواهرم که کیلومترها از او دورم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب.....شش

چکیده.....۱

فصل اول : مقدمه..... ۲

فصل دوم : مطالعات تئوری ٤

۲-۱- مشخصات فولادهای زنگ نزن..... ٤

۲-۲- طبقه بندی فولادهای زنگ نزن..... ٥

۲-۲-۱- فولادهای زنگ نزن فریتی ٥

۲-۲-۲- فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی..... ۷

۲-۲-۳- فولادهای زنگ نزن رسوب سخت شونده ۸

۲-۲-٤- فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۹

الف) حساس شدن ۱۰

ب) خواص سایشی ۱۰

۲-۲-٥- فولادهای زنگ نزن آستنیتی – فریتی ۱۰

۲-۳- فازهای میانی..... ۱۱

۲-٤- سخت کردن سطحی..... ۱۲

۲-٤-۱- نیتروژن دهی گازی..... ۱۲

۲-٤-۲- کربوره کردن، بوردهی و سخت کردن شعله ای ۱۳

۲-۵- سخت کردن سطحی فولادها به روش پلاسما..... ۱٤

۲-٦- سخت کردن سطح فولادهای زنگ نزن آستنیتی به روش پلاسما ۱٦

۲-٦-۱- نیتراسیون فولادهای زنگ نزن در دمای پایین ۱۷

۲-٦-۲- بررسی ساختار میکروسکوپی فولادهای زنگ نزن آستنیتی نیتریده شده ۱۸

۲-٦-۳- فاز ها در لایه نیتریده شده..... ۲۰

۲-٦-٤- خواص سطحی فولادهای زنگ نزن آستنیتی نیتریده شده..... ۲۵

الف) تغییرات سختی ۲۵

ب) شیب تغییرات غلظت شیمیایی ۲۷

ج) مقاومت سایشی ۲۸

د) مقاومت خوردگی..... ۳۰

۲-٦-۵- کربوره کردن و کربونیتروره کردن پلاسمایی فولادهای زنگ نزن ۳۳

فصل سوم : روش انجام آزمایش..... ۳۷

۳-۱- نمونه های آزمایش ۳۷

۳-۲- روش تحقیق ۳۸

۳-۲-۱- کوانتومتری ۳۸

۳-۲-۲- عملیات نیتراسیون پلاسما ۳۸

۳-۲-۳- سختی سنجی ٤۰

۳-۲-٤- متالوگرافی..... ٤۱

۳-۲-۵- سایش ٤۱

۳-۲-٦- خوردگی ٤۲

۳-۲-۷- آزمایش XRD..... ٤۲

فصل چهارم : یافته‌های پژوهش و بحث..... ٤٤

٤-۱- شناخت لایه‌های نیتریده شده ٤٤

٤-۱-۱- متالوگرافی لایه‌های نیتریده شده ٤٤

٤-۲-۱ پراش اشعه ایکس ۵۲

٤-٢- خواص لایه‌های نیتریده شده ٦٢
٤-٢-١- تغییرات سختی ٦٢
٤-٢-٢- مقاومت به خوردگی ٦٦
٤-٢-٣- رفتار سایشی ٧٢
٤-٢-٤- مطالعه سطوح سایش با استفاده از تصاویر SEM ٧٩
الف) مطالعه سطوح ساییده شده دیسک ٧٩
ب) بررسی سطح پین ٨٧
ج) ذرات سایش ٩٣
د) سطح مقطع زیر سطح سایش ٩٧
ه)ضریب اصطکاک ١٠٢
و) مکانیزم سایش ١٠٤

نتیجه گیری ١٠٧

پیشنهاد ادامه پژوهش ١٠٨

مراجع ١٠٩

چکیده انگلیسی

ضمیمه: چکیده مقاله پذیرفته شده در سمپوزیم فولاد ٨٠

چکیده

رفتار فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316 پس از عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی در اتمسفر N_2-80%H_2 در شرایط مختلف دما و زمان مورد بررسی قرار گرفت با نیتروژن‌دهی در دماهای ٤٠٠ و ٤٥٠°C و زمان‌های ٥، ١٠ و ١٥ ساعت لایه‌ای نازک به ضخامت ٥ تا ٢٠μm تشکیل شد. افزایش بیشتر زمان عملیات در این دماها سبب افزایش بیشتر ضخامت لایه نمی‌شود. آزمایش پراش پرتو ایکس(XRD) نشان داد که این لایهٔ تک‌فاز، آستنیت فوق اشباع از نیتروژن یا فاز S بدون رسوبات نیترید آلیاژی است که مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد ولی با وجود سختی نسبتاً بالا ($700HV_{0.1}$)، مقاومت سایشی بهبود نیافته است. نتایج آزمایش XRD وجود فازهای نیترید کروم و آهن را در لایه سخت شده با نیتروژن‌دهی پلاسمایی به مدت ٥ ساعت در دماهای ٥٠٠ و ٥٥٠°C نشان داد و حداکثر سختی $1300HV_{0.1}$ با عمق نفوذ ٥٠μm حاصل گردید. آزمایش‌های سایش با دستگاه پین روی دیسک بهبود مقاومت سایشی و تغییر مکانیزم سایش را نسبت به نمونه‌های عملیات نشده و نیتریده شده در دماهای کمتراز ٥٠٠°C تایید نمود. سایش شدید چسبان همراه با اکسیداسیون سطح، در نمونه عملیات نشده و سایش خراشان پین درنمونه‌های نیتریده شده در دماهای بالاتر از ٥٠٠°C مشاهده شد. ضریب اصطکاک در نمونه های عملیات نشده ٠/٨ است که پس از نیتروژن دهی تا ٠/٤ کاهش یافته و از سایش چسبان (حالت Stick-Slip) جلوگیری می‌شود. رفتار خوردگی نمونه نیتریده شده در ٥٠٠°C به مدت ٥ ساعت تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد ولی در نمونه نیتریده شده در ٥٥٠°C مقاومت خوردگی کاهش یافته است. بنابراین در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای ٥٠٠°C و زمان ٥ ساعت رفتار متعادلی از نظر خوردگی و سایش ایجاد می‌نماید.

فصل اول

مقدمه

فولادهای زنگ نزن به آلیاژهای آهن با حداقل ۱۲ درصد کروم گفته می‌شود که در صنایع دارویی نظیر قالب‌های قرص سازی، غذایی مانند ظروف آشپزخانه و طبی از قبیل وسایل جراحی و در صنایع شیمیایی نظیر مخازن نگهداری اسید و والوهای انتقال اسید استفاده دارند. وجود کروم در این فولادها فیلم سطحی غیر قابل مشاهده‌ای در سطح ایجاد می‌کند که در برابر اکسیداسیون مقاومت دارد. بسته به نوع و درصد عناصر آلیاژی، این فولادها به پنج دسته آستنیتی، فریتی، مارتنزیتی، آستنیتی - فریتی و رسوب سخت شونده تقسیم می‌شوند. بهترین مقاومت به خوردگی را گروه آستنیتی دارد و اصلی‌ترین عناصر این گروه از فولادهای زنگ‌نزن، کروم و نیکل است. انواع ۳۰٤ و ۳۱٦ از پرمصرف‌ترین فولادهای این گروه است. نوع ۳۱٦ به دلیل وجود ۲/۵ درصد مولیبدن از مقاومت به خوردگی بهتری برخوردار است.

به دلیل ساختار آستنیتی که تا دمای اتاق هم پایدار است، با هیچ نوع عملیات حرارتی حجمی نمی‌توان آن را سخت کرد. از اینرو سختی و استحکام و مقاومت به سایش این فولادها پایین است. یک راه‌حل برای بهبود این خواص استفاده از روش‌های عملیات سطحی است، اما وجود فیلم اکسید کروم در سطح از چسبندگی بین پوشش و زمینه جلوگیری می‌کند. از آنجا که روش نیتروژن‌هی پلاسمایی می‌تواند این فیلم اکسیدی را بردارد تا نیتروژن در عمق نفوذ کند. عملیات ترموشیمیایی پلاسمایی برای فولاد زنگ نزن مورد توجه قرار گرفته است. نیتروژن‌دهی در دماهای معمول (۶۰۰°C - ۵۰۰) ایجاد لایه‌ای سخت از فازهای نیترید آلیاژی نظیر نیترید کروم،

نیکل و آهن در سطح می‌کند، اما مقاومت به خوردگی به چند دلیل کاهش می‌یابد. اول آنکه فیلم اکسیدی حین عملیات بمباران سطح در پلاسما از بین می‌رود. دوم آنکه نگهداری در این دماها موجب حساس شدن فولاد می‌گردد. به علاوه با تشکیل نیترید کروم، محلول جامد (آستنیت) از این عنصر فقیر می‌شود. به این دلیل بیشتر تلاش‌ها در سال‌های اخیر جهت بهبود مقاومت به سایش و سختی بدون از دست رفتن مقاومت به خوردگی متمرکز شده است. روشی که اخیراً پیشنهاد شده است، انجام عملیات در دماهای کمتر از دمای معمول نیتروژن‌دهی می‌باشد. لایه‌ای که در این دماها تشکیل می‌شود بدون رسوبات آلیاژی نیترید و تنها غنی از نیتروژن است که به صورت بین نشین در شبکه آستنیت قرار می‌گیرد و شبکه‌ای پرتنش ایجاد می‌کند. این فاز فوق اشباع از نیتروژن فاز 'S' نام دارد. عمق نفوذ کم، ظاهر سفید وبراق در تصاویر متالوگرافی، افزایش سختی و حتی بهبود مقاومت به خوردگی در این حالت گزارش شده است.

در مورد مقاومت به سایش فولادهای زنگ نزن مراجع زیادی وجود ندارد. به منظور بررسی خواص سایشی و به منظور یافتن بهترین شرایط دما و زمان برای عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی بدون کاهش مقاومت به خوردگی، این عملیات با استفاده از دستگاه نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دماهای ٤٠٠، ٤٥٠، ٥٠٠ و ٥٥٠°C انجام شد. تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع لایه‌های نیتریده شده و مقاومت به سایش در نمونه خام و نمونه‌های نیتریده شده مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش های پلاریزاسیون روی نمونه‌ها نیز به صورت مقدماتی انجام گرفته و شرایط بهینه مشخص شده است.

فصل دوم
مرور مطالعاتی

۲-۱- مشخصات فولادهـای زنـگ نـزن

فولادهـای زنـگ نـزن[۱] بـه دلیـل مقـاومت خـوردگـی بسیار خـوب کـه ناشـی از کـروم بـالا در آنهاسـت بـه عنـوان یکـی از مـواد مهندسـی مـورد اسـتفاده قـرار مـی گـیرد. اصطـلاح زنـگ نـزن بـه آلیاژهای بـا پایـه آهـن کـه حداقـل ۱۲٪ کـروم دارنـد، گفته می‌شـود. کـروم بـا تشـکیل یـک فیلـم اکسید سـطحی پسـیو[۲] از Cr_2O_3 بـر روی آهـن، از فلـز زیـر لایـه در برابـر خـوردگـی محـافظت می کنـد. افـزودن برخـی عنـاصر آلیـاژی دیگـر نظـیر نیکـل، مولیبـدن، مـس، تیتـانیم، آلومینیـم، نیوبیـوم و نیـتروژن بـه بـهبود سـاختار و خواصـی مکـانیکی کمـک می کنـد[۲،۱].

فولادهـای زنـگ نـزن عمومـاً بـر اسـاس ترکیـب شـیمیایی علامـت گـذاری می‌شـوند[۳]. وجـود عنـاصر آلیـاژی عـلاوه بـر اینکـه موجـب پـایداری نسـبتاً بـالا در برابـر خـوردگـی و اکسیداسـیون می‌شـود، بـر نـوع و سـاختار فازهـای پـایدار نـیز اثـر مـی گـذارد[٤]. عملیـات حرارتـی فولادهـای زنـگ نـزن بـه منظـور تغییـر در ویـژگی‌هـای مکـانیکی، فـیزیکی و تعدیـل تنـش هـای موجـود و ایجـاد حداکـثر مقـاومت بـه خـوردگـی در قطعـه انجـام مـی گـیرد. ترکیـب مناسـبی از مقـاومت بـه خـوردگـی و ویـژگیـهای مکانیکی در فولادهـای زنـگ نـزن، مـورد نظـر اسـت.

برخـی از کاربردهـای ایـن آلیـاژهـا در صنـایع شـیمیایی، سیسـتم هـای ضـد عفونـی بیمارسـتان، تجـهیزات تولیـد غـذا، صنـایع دارویـی، لـوازم خـانگی و لوله‌کشـی، اسـت[۱].

---

۱. Stainless Steel

۲. Passive(غیر فعال)

۲-۲- طبقه بندی فولادهـای زنـگ نـزن

در ایـالات متحـده، انـواع فولادهـای زنـگ نـزن نـورد شـده را بـا سیسـتم عـدد گـذاری (AISI)[1] مشـخص می‌کننـد کـه از سـه رقـم بـرای ایـن منظـور اسـتفاده می‌کنـد[۱]. سیسـتم UNS[2] مشـابه AISI ولی با اعـداد بیشـتر می‌باشـد.

فولادهـای زنـگ نـزن را می‌تـوان بـه پنـج گـروه تقسـیم کـرد[۱،۲،۳،٤]. کـه چـهار گـروه فریتـی، مـارتنزیتی، آسـتنیتی، آسـتنیتی-فریتی[3] بـر پایـه سـاختار میکروسـکوپی تقسـیم بنـدی شـده انـد و گـروه پنجم آلیاژهـای سـختی رسـوبی[4] هسـتند. جـدول ۲-۱ برخـی از ایـن آلیـاژهـا را نشـان می‌دهـد.

۲-۲-۱- فولادهای زنـگ نـزن فریتـی

ایـن فولادهـا بـه خـاطر سـاختار bcc مشـابه بـا آهـن در دمـای اتـاق، بـه فریتـی موسـوم انـد[۱] و معمـولاً حـاوی ۱۱ تـا ۳۰٪ کـروم بـا کربـن کمـتر از ۰/۱۲٪می‌باشـند[۲]. سـایر عنـاصر آلیـاژی بـه مقـدار کـم بـرای پـایداری فریـت bcc اسـتفاده می‌شـود. ایـن فولادهـا را بـا عملیـات حرارتـی نمی‌تـوان سـخت و یـا اصـلاح دانـه کـرد[۵]، سـرد کـردن سـریع از دمـای بـالا تنـها موجـب کمـی افزایـش در سـختی می‌شـود[۵].

فـولاد نـوع AISI 430 یـک فـولاد زنـگ نـزن فریتـی، بـا مقـدار کـروم ۱۷ درصـد اسـت بـا ایـن مقدار کـروم بـا گـرم کـردن و سـریع سـرد کـردن فـولاد هـم سـاختار فریتـی بدسـت می‌آیـد و تنـها بـا کـار سـرد می‌تـوان آنـرا کمی‌سـخت کـرد[٤]. شـکل ۲-۱ تصویـر میکروسـکوپـی فـولاد AISI 430 آنیـل شـده در ۸٤٥ °C و سـرد شـده در هـوا را نشـان می‌دهـد، سـاختار شـامل دانـه‌های هـم محـور فریـت و ذرات پراکنـده کـاربید کـروماسـت[۵].

انـواع دیگـری از ایـن نـوع فولادهـا، شـامل AISI 405 و AISI 409 کـم کـروم (۱۱٪)، AISI 434 و AISI 430 بـا کـروم متوسـط (۱٦تـا۱۸٪) و AISI 442 وAISI 446 بـا کـروم زیـاد (۱۹ تـا ۳۰٪) می‌باشـند[۱].کـه ایـن نـوع آخـر بـرای مـواردی کـه مقـاومت بـه خـوردگـی خیلـی بـالا مـورد نیـاز اسـت، اسـتفاده می‌شـود[۱]. فولادهـای زنـگ نـزن فریتـی نسـبت بـه فولادهـای زنـگ نـزن آسـتنیتی بـه دلیل انعطـاف پذیـری کمـتر، جـوش پذیـری[5] ضعیـف وحساسـیت بـه شـکاف[6]، کمـتر اسـتفاده می‌شـوند.

---

[1].American Iron & Steel Institute

[2].Unified Numbering System

[3].Duplex

[4].Precipitation Hardening

[5].Weldability

[6].Notch Sensitvity

جدول ۲-۱- ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن

Grade	Composition, % C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Others
Austenitic grades								
201	0.15	16.00-18.00	3.50-5.50	5.50-7.50	1.0	0.060	0.030	0.25N
301	0.15	16.00-18.00	6.00-8.00	2.0	1.0	0.045	0.030	...
302	0.15	17.00-19.00	8.00-10.00	2.0	1.0	0.045	0.030	...
303	0.15	17.00-19.00	8.00-10.00	2.0	1.0	0.20	0.15 min	0.60Mo(b)
304	0.08	18.00-20.00	8.00-10.00	2.0	1.0	0.045	0.030	0.10N
308	0.08	19.00-21.00	10.00-12.00	2.0	1.0	0.045	0.030	...
310	0.25	24.00-26.00	19.00-22.00	2.0	1.5	0.045	0.030	...
316	0.08	16.00-18.00	10.00-14.00	2.0	1.0	0.045	0.030	2.0-3.0Mo, 0.10N
316L	0.03	16.00-18.00	10.00-14.00	2.0	0.75	0.045	0.030	2.0-3.0Mo, 0.10N
321	0.08	17.00-19.00	9.00-12.00	2.0	1.0	0.045	0.030	0.10N, 5 × C+N min Ti
20Cb-3	0.07	19.00-21.00	32.00-38.00	2.0	1.0	0.045	0.035	2.0-3.0Mo, 3.0-4.0Cu 8 × C min Nb (1.0 max)
22-13-5	0.06	20.5-23.5	11.5-13.5	4.0-6.0	1.0	0.040	0.030	1.5-3.0Mo, 0.2-0.4N, 0.1-0.3Nb, 0.1-0.3V
Ferritic grades								
409	0.08	10.50-11.75	...	1.0	1.0	0.045	0.045	6 × C Ti (0.75 max)
430	0.12	16.00-18.00	...	1.0	1.0	0.040	0.030	...
430F	0.12	16.00-18.00	...	1.25	1.0	0.040	0.060	0.60Mo(b)
446	0.20	23.00-27.00	...	1.5	1.0	0.040	0.030	0.25N
182-FM	0.08	17.50-19.50	...	2.5	1.0	0.040	0.15 min	...
E-Brite	0.01	25.0-27.5	0.50	0.40	0.40	0.020	0.020	0.75-1.5Mo, 0.015N, 0.2 max Cu (0.5 max Cu + Ni)
Martensitic grades								
403	0.15	11.50-13.00	...	1.0	0.5	0.040	0.030	...
410	0.15	11.50-13.50	...	1.0	1.0	0.040	0.030	...
416	0.15	12.00-14.00	...	1.25	1.0	0.060	0.15 min	0.60Mo(b)
420	0.15 min	12.00-14.00	...	1.0	1.0	0.040	0.030	...
420F	0.15 min	12.00-14.00	...	1.25	1.0	0.060	0.15 min	0.60Mo(b)
431	0.20	15.00-17.00	1.25-2.50	1.0	1.0	0.040	0.030	...
440A	0.60-0.75	16.00-18.00	...	1.0	1.0	0.040	0.030	0.75Mo
440B	0.75-0.95	16.00-18.00	...	1.0	1.0	0.040	0.030	0.75Mo
440C	0.95-1.20	16.00-18.00	...	1.0	1.0	0.040	0.030	0.75Mo
Precipitation-hardenable grades								
630 (17-4PH)	0.07	15.50-17.50	3.0-5.0	1.0	1.0	0.040	0.030	3.0-3.5Cu, 0.15-0.45Nb + Ta
631 (17-7PH)	0.09	16.00-18.00	6.5-7.75	1.0	1.0	0.040	0.030	0.75-1.50Al
633 (AM-350)	0.07-0.11	16.00-17.00	4.00-5.00	0.5-1.25	0.5	0.040	0.030	2.5-3.25Mo, 0.07-0.13N
634 (AM355)	0.10-0.15	15.00-16.00	4.00-5.00	0.5-1.25	0.5	0.040	0.030	2.5-3.25Mo
635 (Stainless W)	0.08	16.00-17.50	6.00-7.50	1.0	1.0	0.040	0.030	0.4Al, 0.4-1.2 Ti
15-5PH	0.07	14.00-15.5	3.5-5.5	1.0	1.0	0.040	0.030	2.5-4.5Cu, 0.15-0.45Nb + Ta
PH13-8Mo	0.05	12.25-13.25	7.5-8.5	0.10	0.10	0.010	0.008	2.0-2.5Mo, 0.90-1.35Al, 0.01N
Custom 450	0.05	14.00-16.00	5.0-7.0	1.0	1.0	0.030	0.030	1.25-1.75Cu, 0.5-1.0Mo, 8 × C min Nb (1.0 max)
Custom 455	0.05	11.00-12.50	7.5-9.5	0.5	0.5	0.040	0.030	0.5Mo, 1.5-2.5Cu, 0.8-1.4Ti, 0.1-0.5Nb
Duplex stainless steel								
312	0.15	30.0 (nominal)	9.0 (nominal)	2.0	1.0	0.045	0.030	...

(a) Maximum, unless range is given or unless otherwise noted. (b) Optional