بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد فلزی

نیتروژن-کربن دهی پلاسمایی فولاد به روش توری فعال

نگارش

نسیم خوشدل سلاکجانی

استاد راهنما

دکتر فرزاد محبوبی

اردیبهشت ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: نسیم خوشدل سلاکجانی دانشجوی آزاد ◯ بورسیه ◯ معادل ◯

شماره دانشجوئی: ۸۴۱۲۷۰۶۹ دانشکده: مهندسی‌معدن و متالورژری رشته تحصیلی:شناسایی و انتخاب مواد گروه : متالورژی

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: فرزاد محبوبی درجه و رتبه: دانشیار

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : نیتروژن – کربن دهی پلاسمایی فولاد به روش توری فعال

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی :Active screen plasma nitro-carburizing

نوع پروژه: کارشناسی ◯ ارشد ● دکترا ◯ سال تحصیلی:

کاربردی ● بنیادی ◯ توسعه‌ای ◯ نظری ◯

تاریخ شروع : ۸۵/۵ تاریخ خاتمه :۸۷/۲ تعداد واحد :۶ سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: نیتروژن دهی پلاسمایی، نیتروژن-کربن دهی پلاسمایی، توری فعال، فولادهای کم آلیاژ

واژه‌های کلیدی به انگلیسی : Active Screen, ASPN, plasma nitrocarburizing, cathodic cage

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۱۲	تصویر ◯ جدول ● نمودار ● نقشه ◯ واژه‌نامه ◯	تعداد مراجع ۵۹	تعداد صفحات ضمائم
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ◯	چکیده	فارسی ● انگلیسی ●
یادداشت				

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که یاری‌گرم بودند و فربد که در تمام مراحل انجام این پژوهش بی دریغ همراهیم کرد.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر محبوبی به خاطر راهنمایی‌های بی‌دریغشان صمیمانه سپاس‌گزارم. تقدیر و تشکر فراوان از جناب آقای مولایی مسئول آزمایشگاه متالوگرافی، آقای مهندس حسینی، آقای مهندس زارعی و آقای مهندس آقاجانی که مرا در هرچه پربارتر کردن این پژوهش یاری کردند.

چکیده

فرآیندهای پلاسمایی همانند نیتروژن دهی و نیتروژن–کربن دهی پلاسمایی که به روش متداول انجام می‌شوند، در معرض مشکلات رایجی هم‌چون پدیده کاتد توخالی، قوس الکتریکی و اثر لبه هستند. نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال ASPN، Active Screen Plasma Nitriding، فن‌آوری جدیدی در مهندسی سطح است که مشکلات رایج در نیتروژن دهی پلاسمایی را برطرف نموده است. در این روش پلاسما به طور مستقیم بر روی قطعه تولید نمی‌شود بلکه نمونه‌ها توسط توری احاطه شده و پلاسما بر روی آن تشکیل می‌شود. این تحقیق، به بررسی تاثیر فرآیند نیتروژن- کربن دهی پلاسمایی به روش توری فعال و روش متداول بر روی فولاد کم آلیاژ DIN ۱/٦٥٨٢ و مقایسه خواص لایه ترکیبی حاصل با خواص لایه ترکیبی نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش توری و فعال و روش متداول می‌پردازد. فرآیندهای نیتروژن–کربن دهی در ترکیب گاز CO_2٪۳ + H_2٪۱۷ + N_2٪۸۰ و فرآیندهای نیتروژن دهی در ترکیب گاز H_2٪۲۰+N_2٪۸۰ صورت پذیرفت. جهت بررسی خواص لایه آزمایش‌ها در دماهای ۴۸۰، ۵۲۰،۵۶۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۵ ساعت انجام شدند. در بررسی نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال مشاهده شد که دارای سطحی یک‌نواخت و فاقد اثر لبه می‌باشند. آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) حضور فازهای نیترید و کربونیترید آهن ε و γ′را در نمونه‌های عملیات شده تحت هر دو فرآیند نیتروژن دهی و نیتروژن–کربن دهی نشان می‌دهد. ارزیابی نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آزمون ریزسختی سنجی حاکی از آن است که افزایش دما در روش توری فعال و روش متداول تاثیر مشابهی بر سختی و ضخامت لایه ترکیبی دارد. در تمامی فرآیندها با افزایش دما ضخامت لایه ترکیبی افزایش یافته و درنمونه غملیات شده در ٥٦٠ درجه سانتی‌گراد توسط فرآیند نیتروژن–کربن دهی به روش توری فعال ١٠/٤ میکرومتر ارزیابی شد. سختی نمونه‌های عملیات شده تحت همه فرآیندها با افزایش دما از ٤٨٠ به ٥٢٠ درجه

سانتی‌گراد افزایش و در ٥٦٠ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. سطح نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال بر خلاف نمونه‌های روش متداول در تمامی سطح نمونه یک‌نواخت می باشد و در نمونه-های عملیات شده به هر دو روش زبری سطح روند افزایشی با دما نشان می‌دهد.. اما نمونه‌های عملیات شده به روش متداول به میزان قابل توجهی زبرترند. مقاومت خوردگی نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال با افزایش دمای عملیات ابتدا افزایش یافته و سپس در ٥٦٠ درجه سانتی-گراد کاهش می‌یابد اما در روش متداول با افزایش دما مقاومت خوردگی افزایش می‌یابد. این نتیجه برای هردو فرآیند نیتروژن دهی و نیتروژن–کربن دهی صادق است، علاوه بر آن نتایج نشان دادند، نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال نسبت به خوردگی مقاومت‌ترند.

کلمات کلیدی: نیتروژن دهی پلاسمایی، نیتروژن–کربن دهی پلاسمایی، توری فعال، ASPN، Cathodic cage، فولادهای کم‌آلیاژ.

فهرست مطالب

فصل اول- مقدمه

۱- ۱- مقدمه ۱

فصل دوم- مروري بر منابع

۲- ۱- نيتروژن دهي ۳
۲- ۱- ۱- مقدمه ۳
۲- ۱- ۲- نيتروژن دهي ۴
۲- ۱- ۳- فولادهاي مناسب براي نيتروژن دهي ۴
۲- ۱- ۴- لايه نيترید شده ۵
۲- ۱- ۵- لايه سفيد ۵
۲- ۱- ۶- انواع نيتروژن دهي ۵
۲- ۱- ۶- ۱- نيتروژن دهي گازي ۵
۲- ۱- ۶- ۱- ۱- انواع فرآيند ..... ۶Error! Bookmark not defined.
۲- ۱- ۶- ۱- ۲- تاثير دما ۷
۲- ۱- ۶- ۱- ۳- سختي لايه نيتروژن دهي شده ۸
۲- ۱- ۶- ۲- نيتروژن دهي مايع. ۸
۲- ۱- ۶- ۲- ۱- نيتروژن دهي با فشار مايع ۹
۲- ۱- ۶- ۲- ۲- نيتروژن دهي در حمام هوا دهي شده ۱۰
۲- ۱- ۶- ۲- ۲- ۱- تاثير تركيب شيميايي فولاد ۱۰
۲- ۱- ۶- ۳- نيتروژن دهي پلاسمايي ۱۱
۲- ۱- ۷- مشكلات رايج نيتروژن دهي ۱۱
۲- ۲- نيتروژن- كربن دهي ۱۱
۲- ۲- ۱- مقدمه ۱۱
۲- ۲- ۲- نيتروژن- كربن دهي ۱۲
۲- ۲- ۳- خواص فولادهاي نيتروژن- كربن دهي شده ۱۲
۲- ۲- ۴- انواع فرآيندهاي نيتروژن- كربن دهي ۱۳
۲- ۲- ۴- ۱- فرآيندهاي نيتروژن- كربن دهي فريتي ۱۳
۲- ۲- ۴- ۲- فرآيندهاي نيتروژن- كربن دهي آستنيتي ۱۴
۲- ۲- ۵- انواع روش هاي نيتروژن- كربن دهي ۱۴
۲- ۲- ۵- ۱- نيتروژن- كربن دهي گازي ۱۴
۲- ۲- ۵- ۲- نيتروژن- كربن دهي درحمام نمك ۱۵
۲- ۲- ۵- ۳- نيتروژن- كربن دهي پلاسمايي ۱۶
۲- ۲- ۶- مكانيزم نيتروژن- كربن دهي ۱۶
۲- ۳- پلاسما ۱۷
۲- ۳- ۱- مقدمه ۱۷
۲- ۳- ۲- روش هايي توليد پلاسما ۱۸
۲- ۳- ۳- انواع روشهاي توليد پلاسما ۱۸
۲- ۳- ۴- انواع پلاسما ۱۹
۲- ۳- ۴- ۱- پلاسماي ديود DC ۱۹
۲- ۳- ۴- ۲- تخليه هاي RF ..... ۲۲Error! Bookmark not defined.
۲- ۳- ۵- انواع پلاسما ۲۴
۲- ۳- ۵- ۱- پلاسماي سرد ۲۴
۲- ۳- ۵- ۲- پلاسماي حرارتي ۲۴
۲- ۴- نيتروژن دهي پلاسمايي ۲۵
۲- ۴- ۱- مقدمه ۲۵
۲- ۴- ۲- نيتروژن دهي پلاسمايي ۲۵
۲- ۴- ۳- تجهيزات فرآيند نيتروژن دهي ۲۶
۲- ۴- ۴- لايه سخت شده ۲۶
۲- ۴- ۵- عوامل موثر بر نيتروژن دهي ۲۷
۲- ۴- ۶- مزاياي نيتروژن كربن دهي پلاسمايي ۲۷

۲- ۴- ۷- معايب نيتروژن دهي پلاسمايي..... ۲۸
۲- ۴- ۸- اصول انتقال جرم در نيتروژن دهي پلاسمايي..... ۲۸
۲- ۴- ۹- واكنش پلاسما با سطح قطعه در حين عمليات نيتروژن دهي.... ۲۹
۲- ۴- ۹-۱- كندو پاش..... ۲۹
۲- ۴- ۹- ۲- گرم كردن ۳۰
۲- ۴- ۹- ۳- رسوب..... ۳۰
۲- ۴- ۱۰- تاثير پارامترهاي مختلف بر نيتروژن دهي پلاسمايي..... ۳۱
۲- ۴- ۱۰- ۱- تاثير دما بر نيتروژن دهي پلاسمايي..... ۳۱
۲- ۴- ۱۰- ۲- اثر زمان بر نيتروژن دهي پلاسمايي.Error! Bookmark not defined.۳۴
۲- ۴- ۱۰- ۳- تاثير تركيب گاز واكنش .....Error! Bookmark not defined.۳۴
۲- ۵- نيتروژن كربن دهي پلاسمايي..... ۳۶
۲- ۵- ۱- مقدمه ۳۶
۲- ۵- ۲- نيتروژن- كربن دهي پلاسمايي..... ۳۶
۲- ۵- ۳- انواع نيتروژن- كربن دهي پلاسمايي..... ۳۸
۲- ۵- ۴ پارامترهاي موثر بر نيتروژن- كربن دهي پلاسمايي ۳۸
۲- ۵- ۴- ۱- تاثير زمان عمليات..... ۳۸
۲- ۵- ۴- ۲- تاثير فشار گاز و دماي زير لايه ۴۰
۲- ۶- نيتروژن دهي توسط توري فعال..... ۴۱
۲- ۶- ۱- مقدمه ۴۱
۲- ۶- ۲- توري فعال..... ۴۲
۲- ۶- ۳- نقش توري فعال..... ۴۲
۲- ۶- ۴- نقش اقتصادي توري فعال ۴۳
۲- ۶- ۵- تجهيزات..... ۴۳
۲- ۶- ۶- مكانيزم نيتروژن دهي توسط توري فعال..... ۴۴
۲- ۶- ۷- مروري بر نتايج سايرين..... ۴۵
۲- ۶- ۷- ۱- مقايسه دو روش ASPN و DCPN..... ۴۵
۲- ۶- ۷- ۲- عوامل موثر بر نيتروژن دهي پلاسمايي توسط توري فعال۴۸
۲- ۶- ۷- ۲- ۱- تاثير گازهاي نيتروژن دهي..... ۴۸
۲- ۶- ۷- ۲- ۲- تاثير سيستم توري فعال..... ۴۹
۲- ۶- ۷- ۲- ۲- ۱- نيتروژن دهي با درپوش توري بافت..... ۴۹
۲- ۶- ۷- ۲- ۲- ۲- نيتروژن دهي بدون درپوش..... ۵۰
۲- ۶- ۷- ۲- ۲- ۳- نيتروژن دهي با درپوش Ti يا Cu..... ۵۱
۲- ۶- ۷- ۲- ۳- تاثير ابعاد سوراخ هاي توري فعال..... ۵۲
۲- ۶- ۷- ۲- ۴- تاثير دما ۵۲
۲- ۶- ۷- ۳- خواص لايه نيتروژن دهي شده توسط توري فعال..... ۵۳
۲- ۶- ۷- ۳-۱- مقاومت سايشي..... ۵۳
۲- ۶- ۷- ۳- ۲- زبري..... ۵۵
۲- ۶- ۷- ۳-۳- مقاومت خوردگي ۵۵
فصل سوم- مواد و روشها
۳- ۱- مقدمه ۵۷
۳- ۲-فولاد مورد مطالعه..... ۵۷
۳- ۳تهيه نمونه ۵۷
۳- ۴- عمليات حرارتي اوليه ۵۸
۳- ۵- دستگاه عمليات پلاسمايي..... ۵۸
۳- ۵- ۱- پمپ خلاء..... ۵۸
۳- ۵- ۲- منبع تغذيه ۵۹
۳- ۵- ۳- محفظه خلاء ۵۹
۳- ۵- ۴- كنترل كننده دبي گاز ورودي ۵۹
۳- ۶- مراحل انجام فرآيندهاي پلاسمايي..... ۶۰
۳- ۶- ۱- ايجاد خلاء در محفظه ۶۰
۳- ۶- ۲- تنظيم فشار و تركيب مخلوط گازي ۶۰

۳- ۶- ۳- فرآیند تخلیه نوراني و گرم کردن قطعه کار ۶۰
۳- ۶- ۴- سرد کردن ۶۱
۳- ۷- شرایط انجام آزمایش ۶۲
۳- ۸- نیتروژن دهي و نیتروژن-کربن دهي به روش توري فعال ASPN و ASPNC ۶۲
۳- ۹- آزمون ها ۶۳
۳- ۹- ۱- متالوگرافي ۶۳
۳- ۹- ۲- آزمون پراش سنجي اشعه ایکس (XRD) ۶۳
۳- ۹- ۳- میکروسکوپ الکتروني روبشي (SEM) ۶۴
۳- ۹- ۳- آزمون ریزسختي سنجي و تهیه نیم رخ سختي ۶۴
۳- ۹- ۴- اندازه گیري لایه سفید ۶۴
۳- ۹- ۵- آزمون خوردگي ۶۴
۳- ۹- ۶- زبري سنجي ۶۵

فصل چهارم- یافته ها

۴- ۱- نیتروژن دهي ۶۶
۴- ۱- ۱- نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) ۶۶
۴- ۱- ۲- تصاویر میکروسکوپ نوري و الکتروني روبشي (SEM) ۶۸
۴- ۱- ۳- ضخامت لایه سفید ۷۰
۴- ۱- ۴- ریز سختي سنجي و نیم رخ سختي ۷۱
۴- ۱- ۵- زبري سنجي ۷۲
۴- ۱- ۶- نتایج آزمون خوردگي ۷۳
۴- ۲- نیتروژن-کربن دهي ۷۴
۴- ۲-۱ - نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) ۷۴
۴- ۲- ۲- تصاویر میکروسکوپ نوري و الکتروني روبشي (SEM) سطح مقطع ۷۶
۴- ۲- ۳- ضخامت لایه سفید ۷۸
۴- ۲- ۴- ریز سختي سنجي و نیم رخ سختي ۷۹
۴- ۲- ۵- اثر لبه ۸۰
۴- ۲- ۶- تصاویر میکروسکوپ الکتروني روبشي (SEM) سطح نمونه ها .. ۸۱
۴- ۲- ۷- زبري سنجي ۸۴
۴- ۲- ۸- نتایج آزمون خوردگي ۸۶
۴- ۳- نیتروژن دهي و نیتروژن-کربن دهي ۸۸
۴- ۳- ۱- نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) ۸۸
۴- ۳- ۲- ریزسختي ۸۹
۴- ۳- ۳- زبري ۸۹
۴- ۳- ۴- مقاومت خوردگي ۸۹

فصل پنجم- بحث و بررسي

۵- ۱- مقدمه ۹۰
۵- ۲- نیتروژن دهي ۹۱
۵- ۲- ۱- فازهاي تشکیل دهنده لایه ترکیبي ۹۱
۵- ۲- ۲- ضخامت لایه ترکیبي ۹۲
۵- ۲- ۳- سختي ۹۲
۵- ۲- ۴- زبري ۹۲
۵- ۲- ۵- مقاومت خوردگي ۹۳
۵- ۳- نیتروژن-کربن دهي ۹۵
۵- ۳- ۱- سطح نمونه هاي عملیات شده ۹۵
۵- ۳- ۱- لایه ترکیبي ۹۶
۵- ۳- ۲- فازهاي تشکیل دهنده لایه ترکیبي ۹۷
۵- ۳- ۳- ضخامت لایه ترکیبي ۹۸
۵- ۳- ۴- ریزسختي ۹۸
۵- ۳- ۵- زبري ۹۸

۵- ۳- ۶- خوردگي ۱۰۰
۵- ۴- نيتروژن دهي و نيتروژن-كربن دهي به روش توري فعال ۱۰۱
۵- ۴- ۱- سطح نمونه هاي عمليات شده ۱۰۱
۵- ۴- ۲- لايه تركيبي ۱۰۱
۵- ۴- ۳- فازهاي تشكيل دهنده ۱۰۲
۵- ۴- ۴- ضخامت لايه تركيبي ۱۰۲
۵- ۴- ۴- ريز سختي ۱۰۲
۵- ۴- ۵- زبري ۱۰۳
۵- ۴- ۶- خوردگی ۱۰۳
۵- ۳- ۵- مكانيزم روش توري فعال ۱۰۳
فصل ششم- نتیجه‌گیری
۶- ۱- نتیجه‌گیری ۱۰۶
پیشنهادها ۱۰۸
منابع و مراجع ۱۰۹

۱-۱ مقدمه

نیتروژن دهی عملیات سخت کاری سطحی است که نیتروژن را به درون سطح فولادی که در منطقه فریت قرار دارد وارد می‌کند [۱]. این روش موثرترین روش برای فولادهای آلیاژیی است که حاوی عناصر پایدار کننده نیترید مانند آلومینیوم، مولیبدن، کروم، وانادیوم، و تنگستن است [۲].

نیتروژن دهی پلاسمایی که از فن آوری تخلیه نورانی استفاده می‌کند، در سی سال گذشته به طور گسترده‌ای در صنعت پذیرفته شده است. این فرآیند نسبتاً جدید، در خلاء اتفاق می‌افتد و پتانسیل الکتریکی ولتاژ بالا برای به وجود آوردن پلاسما که در آن گونه‌های فعال نیتروژن دهی به سطح نمونه منتقل می‌شوند، بر قطعه کار به عنوان کاتد و دیواره کوره به عنوان آند اعمال می‌شود [۳]. فرآیند دیگری که برای بهبود خواص سطحی فولاد مانند مقاومت به سایش و خوردگی و افزایش استحکام خستگی استفاده می‌شود، نیتروژن-کربن دهی پلاسمایی است. در این فرآیند عمر قطعات ماشین به طور فزاینده‌ای بهبود می یابد. علاوه بر آن درجاتی از فولاد که به خوردگی مقاوم نیستند به خاطر لایه ترکیبی بوجود آمده در اثر نفوذ کربن و نیتروژن، مقاومت خوردگی نسبتاً خوبی به‌دست می‌دهد [۴]. به خوبی مشخص است که نیتروژن دهی پلاسمایی مزایای بسیاری نسبت به نیتروژن دهی سنتی دارد، به ویژه کاهش مصرف گاز و انرژی و سازگاری با محیط زیست، با این وجود گسترش استفاده از این تکنولوژی در روزهای اخیر کند شده است. در روش متداول پلاسمایی DC، قطعات تحت عملیات در معرض یک پتانسیل کاتدی بالا هستند و پلاسما مستقیماً روی سطح قطعات، به منظور گرم کردن آن‌ها و ایجاد گونه‌های فعال، تشکیل می‌شود. هرچند این روش برای نیتروژن دهی اشکال کوچک مناسب است، دارای نواقصی نیز می‌باشد. این مشکلات عبارتند از: برقراری دمای یک‌نواخت در محفظه (مخصوصاً برای قطعات با ابعاد متفاوت)، صدمات ناشی از قوس، اثر لبه و اثر کاتد تو خالی [۳]. برای غلبه بر این مشکلات در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی

صورت گرفته است. یکی از اقداماتی که اخیراً در این راستا انجام شده است، نیتروژن دهی توسط توری فعال است. در این فرآیند جدید محل قرارگیری قطعه کار به طور کامل در یک توری فلزی قرار می‌گیرد و ولتاژ کاتدی به توری اعمال می‌شود. بنابراین پلاسما بر روی توری فلزی تشکیل می‌شود و قطعات دیگر مستقیماً در معرض پلاسما نیستند. پلاسما توری را گرم می‌کند و گرما از طریق تابش به قطعات منتقل شده و آن‌ها را تا دمای لازم برای عملیات گرم می‌کند. در نتیجه می‌توان اشکال بسیار پیچیده را توسط این روش تحت عملیات نیتروژن دهی قرار داد و لایه اصلاح شده یک-نواختی بر روی تمام قسمت‌هایی که از لحاظ ابعاد و شکل متفاوتند ایجاد کرد [۵].

هدف از تحقیق حاضر مطالعه فرآیند نیتروژن-کربن دهی پلاسمایی به روش توری فعال و مقایسه آن با نیتروژن-کربن دهی پلاسمایی به روش متداول و همچنین بررسی خواص لایه ترکیبی به‌دست آمده است.

۲- ۱- نیتروژن دهی

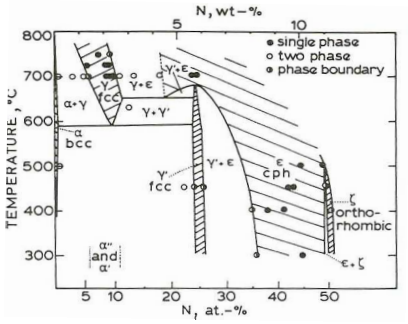
۲- ۱- ۱- مقدمه

نیتروژن دهی عملیات سخت کاری سطحی است که نیتروژن را به درون سطح فولادی که در شرایط فریتی است نفوذ می‌دهد. نیتروژن دهی شبیه به کربن دهی است از این لحاظ که ترکیب شیمیایی سطح را تغییر می‌دهد. اما در نیتروژن دهی، نیتروژن به جای فاز آستنیت به فاز فریت اضافه می‌شود [۱]. عملیات نیتروژن دهی برای اولین بار در سال ۱۹۲۰ مورد استفاده قرار گرفت و از آن زمان کاربردش مرتباً وسیع‌تر شده است. این فرآیند آن‌چنان گسترش یافته است که فولادهایی که در ابتدا نمی‌توانستند تحت این عملیات قرار بگیرند، امروزه جز موادی هستند که عملیات نیتروژن دهی بر روی آن‌ها انجام می‌شود [۶].

۲- ۱- ۲- نیتروژن دهی

نیتروژن دهی در منطقه فریت و در زیر دمای ۵۹۰°C انجام می‌شود، شکل (۲- ۱). بنابراین بعد از نیتروژن دهی تغییر فازی وجود ندارد. قبل از نیتروژن دهی عملیات حرارتی مناسب، یعنی سخت کاری با حرارت دادن تا ۹۳۰°C و کوئنچ کردن در روغن و تمپر کردن تا ۶۵۰°C برای بوجود آوردن ساختار بینیتی که استحکام و چقرمگی مغز قطعه را افزایش می‌دهد، باید بر روی قطعات فولادی انجام شود [۲].

تمپر کردن دردمایی بالاتر از دمای نیتروژن دهی سبب پایداری مغز قطعه در حین فرآیند می‌شود [۱]. قسمت هایی که نباید نیتروژن دهی شوند با لایه نازکی از رسوب قلع که به صورت الکترولیتی نشانده می‌شود، پوشیده می‌گردد. پوشش نفوذ نیتروژن را به دلیل کشش سطحی کنترل می‌کند [۲].



شکل (۲- ۱) دیاگرام فازی آهن–نیتروژن [۲].

۲- ۱- ۳- فولادهای مناسب برای نیتروژن دهی

نیتروژن دهی موثرترین روش برای فولادهای آلیاژی حاوی نیتریدهای پایداری است که توسط عناصری مانند آلومینیوم، کرم، مولیبدن، وانادیم و تنگستن که عناصر نیتریدزای قوی هستند، تشکیل می‌شود. در این میان آلومینیوم عنصر نیترید زای بسیار قویی است [۱ و ۲]. مثال‌هایی از فولادهای کربن متوسط عمومی که برای نیتروژن دهی استفاده می شوند عبارتند از:708A37، 817A40 تا B5970. ترکیب شیمیایی معمول این فولادها ٪C۰/۱-۰/۵، ٪Al۰/۷۵-۱/۲۵، ٪Cr۱-۱/۵، ٪Mo۰/۲ [۲].

۲- ۱- ۴- لایه نیترید شده

به طور کلی یک لایه نیترید شده از دو ناحیه مجزا تشکیل شده است. ناحیه خارجی که نشان دهنده منطقه‌ای است که تمام عناصر نیتریدزا شامل آهن به نیترید تبدیل شده‌اند. که این منطقه لایه سفید[۱] نامیده می‌شود زیرا پس از اچ نایتال[۲] زیر میکروسکوپ سفید دیده می‌شود. منطقه دوم در زیر لایه سفید، منطقه‌ای را که در آن عناصر بسیار خاص به صورت رسوب کروم، مولیبدن، آلومینیوم، وانادیم و غیره به شکل ذرات نیتریدی سخت شده‌اند، نشان می‌دهد. این رسوب‌ها، تنش‌های فشاری را در لایه سطحی افزایش می‌دهند که مقاومت خستگی خوبی را به قطعات نیتروژن دهی شده می‌دهد. در شرایط معمول نیتروژن دهی لایه دوم حداقل ده برابر عمیق‌تر از لایه اول است. لایه خارجی یا لایه سفید بسیار ترد است و باید پیش از به کاربردن قطعه نیتروژن دهی شده توسط سنباده آن را از میان برد. اما در جایی که مقاومت به خوردگی در اولویت قرار دارد لایه

[۱] White layer
[۲] Nital etch

سفید حذف نمی‌شود زیرا فریت نیتروژن‌دار همانند نیتریدها دارای مقاومت به خوردگی نسبتاً بالایی‌ست.

۱. FeN/Fe_3N – نیترید اپسیلن (ε)
۲. Fe_4N – نیترید γ′
۳. α (N) – فریت غنی از نیتروژن
۴. فریت α.

باید توجه داشت که برای رسیدن به خواص بهتر ضخامت بیش‌تر لایه موثر نیست. ضخامت بیش‌تر لایه نه تنها محدودیت خستگی را کاهش نمی‌دهد بلکه تغییر شکل قطعات را نیز افزایش می‌دهد [۶].

۲- ۱- ۵- لایه سفید

در حین فرآیند نیتروژن دهی یک لایه سفید γ'-Fe_4N و ε-Fe_2N در سطح خارجی قطعه به وجود می‌آید [۲]. لایه سفید می‌تواند تا عمق ۰/۵ میلی متر تشکیل شود [۶]. این لایه به خاطر این‌که ترد است و تمایل به ترک خوردن دارد مشکل ساز است. تشکیل این لایه به خاطر پتانسیل بالای نیتروژن است. در نتیجه با کنترل پتانسیل نیتروژن در سطوح دل‌خواه می‌توان از ایجاد لایه سفید جلوگیری کرد [۲]. لایه سفید ایجاد شده باید توسط سنباده زنی، پولیش مکانیکی، شات بلاست، اسید سولفوریک، اچ کردن و یا روش‌های دیگر از روی قطعات برداشته شود [۲ و ۶].
در اثر دمای کم یا درصد تجزیه (۱۵٪) کم آمونیاک ممکن است لایه سفید با ضخامت بیش‌تر بوجود بیاید. ضخامت این لایه با کنترل میزان تجزیه با تنظیم جریان گاز آمونیاک به درون محفظه و نیتروژن دهی در دمای مناسب و صحیح کاهش می‌یابد [۶].

۲- ۱- ۶- انواع نیتروژن دهی

۲- ۱- ۶- ۱ نیتروژن دهی گازی

نیتروژن دهی گازی با استفاده از گاز آمونیاک صورت می‌گیرد [۱]. گاز آمونیاک از درون کوره در دمای حدود ۵۵۰ $^{\circ}C$ عبور می‌کند. که به نیتروژن و هیدروژن نوزاد تجزیه می‌شود [۲].

$$2NH_3 \longrightarrow 2[N]_{Fe} + 3H_2 \qquad (۱-۲)$$

یک نکته بسیار مهم که باید به آن توجه داشت آن است که تجزیه آمونیاک، نیتروژن را به صورت نوزاد یا نیتروژن تک اتمی به دست می‌دهد که تنها گونه‌ای ست که قابلیت ورود به درون فولاد و نفوذ در آن را دارد. اگر گاز آمونیاک خارج از محفظه نیتروژن دهی تجزیه شده و سپس نیتروژن آن وارد محفظه شود نیتروژن دهی انجام نخواهد شد زیرا نیتروژن مولکولی قابلیت ورود به درون فولاد را ندارد [۷].

نیتروژن اتمی حاصل توسط سطح فولاد جذب می‌شود با توجه به دما و غلظت نیتروژن که به درون آهن فریتی نفوذ می‌کند تعدادی فاز ممکن است شکل بگیرد. در غلظت کم نیتروژن فاز α''-$Fe_{16}N_2$ از فریت به صورت رسوب‌های ریز پیوسته رسوب می‌کند. غلظت بیش‌تر نیتروژن γ'-Fe_4N تولید می‌کند. حتی در غلظت های بیشتر نیتروژن فاز نیتریدی ε-$Fe_{2\text{-}3}N$ تولید می‌شود که وقتی با کربن ترکیب می شود، می‌تواند از لحاظ تریبولوژی فازی مطلوب محسوب شود [۱].

زمان واکنش از ۲۱ ساعت تا ۱۰۰ متفاوت است. درحقیقت این زمان به عمق پوشش مورد نظر و اندازه قطعه فولادی بستگی دارد. بعد از نیتروژن دهی قطعه فولادی می‌تواند در همان کوره و در حضور آمونیاک سرد شود. محفظه کوره از فولاد آلیاژی عایق حرارتی ساخته شده است. زمانی که برای عمق لایه‌ای در حدود ۰/۵ mm لازم است در حدود ۱۰۰ ساعت است. سختی که در کوره به دست می‌آید از ۹۰۰ VH تا ۱۰۰ VH متغیر است. لایه سختی که این گونه به دست می‌آید مقاومت به سایش و خوردگی خوبی از خود نشان می‌دهد [۲].

۲- ۱- ۶- ۱- ۱- انواع فرآیند

انواع فرآیندهای نیتروژن دهی عبارتند از:

- فرآیند تک مرحله‌ای
- فرآیند دو مرحله‌ای
- فرآیند سه مرحله‌ای

فرآیند تک مرحله‌ای که در دمای ۵۰۰ تا ۵۲۵°C با تفکیک ۱۵ تا ۳۰٪ آمونیاک انجام می‌شود، یعنی اتمسفری شامل ۷۰ تا ۸۵٪ NH_3 که منبع نیتروژن است.این فرآیند نیترید ترد γ' تولید می‌کند [۱]. برای قطعات فولادهای ساختمانی که دارای شکل پیچیده و دیواره‌های نازک هستند ممکن از گستره دمایی ۵۰۰- ۵۱۰°C استفاده شود [۶].

فرآیند دو مرحله‌ای که برای به حداقل رساندن ضخامت لایه سفید از دو مرحله مختلف کمک می-گیرد. مرحله اول همانند آن‌چه بیش از این ذکر شد و در مرحله دوم تفکیک تا ۶۵ تا ۸۵٪ افزایش می‌یابد [۱]. در مرحله اول دما در محدوده ۵۰۰ تا ۵۱۰°C است و قطعه برای ۱۵ تا ۲۰ ساعت در

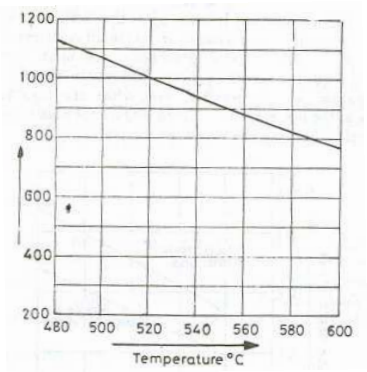
این دما می‌ماند و سپس دما افزایش می‌یابد و به ۵۵۰°C می‌رسد و برای بقیه چرخه نیتروژن دهی، در این دما می‌ماند. در۵۵۰°C مقدار نیتروژن در سطح فولاد افزایش می‌یابد در نتیجه نرخ نفوذ نیتروژن نیز افزایش می‌یابد و این موضوع باعث افزایش ضخامت لایه سخت شده می‌شود اما لایه چقرمگی بیش‌تری به دست می‌آورد. این روش، زمان کلی فرآیند را کاهش می‌دهد [۶].

در فرآیند سه مرحله ای ابتدا نیتروژن دهی به مدت ۱۰ تا ۱۵ ساعت در دمای ۵۰۰°C انجام می‌شود سپس دما تا ۵۵۰- ۵۷۰°C افزایش یافته و به مدت ۱۰ تا ۱۵ ساعت در این دما باقی می‌ماند. پس از آن دما مجدداً به ۵۰۰°C کاهش یافته و در این مرحله نیز ۱۰ تا ۱۵ ساعت نگه داشته می‌شود. در این دما سرعت اشباع شدن لایه‌های خارجی از نیتروژن کم‌تر از نفوذ است و این گرادیان غلظت و تردی سطح را کاهش می‌دهد. قطعاتی که با این روش نیتروژن دهی می‌شوند یک کاهش تدریجی سختی از سطح به مغز قطعه را نشان می‌دهند و سطح آن‌ها چقرمگی بیش‌تری دارد. مزیت مهم این روش آن است که زمان کل عملیات یک سوم زمان لازم برای سایر روش‌هاست [۶].

۲- ۱- ۶- ۱- ۲- تاثیر دما

دمایی که عملیات نیتروژن دهی در آن انجام می‌شود با توجه به نوع فولاد در گستره ۴۹۰- ۵۵۰°C است. برخلاف نتایج به دست آمده در سخت کاری سطحی معمولی، سختی سطح نیتروژن دهی شده با افزایش دمای عملیات نیتروژن دهی افزایش نمی‌یابد. شکل (۲- ۲) نشان می‌دهد که سختی سطح با افزایش دما کاهش می‌یابد و عمق نفوذ بیش‌تر می‌شود. در دمای پایین‌تر سختی سطح بیش‌تر است اما در زمان یکسان عمق لایه سخت شده کم‌تر است. شکل (۲- ۳) تغییرات عمق لایه سخت شده و سختی را نشان می‌دهد. بهترین دما برای عملیات نیتروژن دهی توسط واکنش تفکیک آمونیاک، سرعت نفوذ و اندازه رسوب تعیین می‌گردد. در زیر دمای ۴۵۰°C نفوذ بسیار آهسته انجام می‌شود که این سبب می‌شود زمان زیادی صرف تشکیل لایه سخت شود.

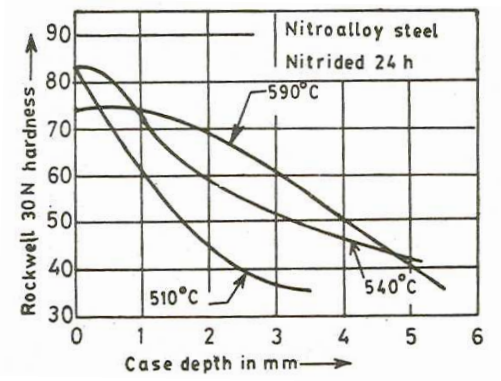
در دماهای بالای ۵۴۰°C تجزیه آمونیاک افزایش یافته و گرادیان غلظت نیتروژن کم می‌شود. ذرات آلیاژی نیتریدی بزرگ می‌شوند و اثر سختی ناشی از پخش رسوبات را کاهش می‌دهند. دماهای بالاتر منطقه سفید کم‌تر، سختی سطح کم‌تر و منطقه نفوذی بیش‌تری به دست می‌دهند. گستره دمایی ۵۰۰ تا ۵۳۰°C برای فولادهای ساختمانی تقابل خوبی میان سختی مناسب و عمق لایه سخت شده مطلوب را برقرار می‌کند [۶].



شکل (۲- ۲) تغییرات سختی با دمای نیتروژن دهی برای فولاد 40Cr2Al1Mo18 [۶].

۲- ۱- ۶- ۱- ۳ سختی لایه نیتروژن دهی شده

سختی لایه سخت شده به ساختار، ترکیب شیمیایی فولاد و دمای عملیات نیتروژن دهی بستگی دارد. سختی لایه با افزایش دمای عملیات کاهش می‌یابد، آنچه از نتایج بر می‌آید آن است که بیش‌ترین سختی که با یک عمق لایه خوب تناسب دارد در بسیاری از فولاد های سازه ای درگستره ی دمایی ۴۹۰- ۵۰۰°C به‌دست می‌آید [۶].



شکل (۲- ۳) تاثیر دما برسختی و عمق نیتروژن دهی [۶].

۲- ۱- ۶- ۲- نیتروژن دهی مایع

نیتروژن دهی مایع در گستره دمایی۵۱۰- ۵۸۰°C همانند گستره دمایی نیتروژن دهی گازی انجام می‌گیرد. آنچه برای سخت سازی لازم است یک حمام نمک مذاب حاوی نیتروژن می‌باشد که حاوی سیانیدها یا سیانات‌ها نیز هست. برخلاف کربن دهی و سیانید دهی مایع که حمام نمک با ترکیب شیمیایی مشابهی را به خدمت می‌گیرند، نیتروژن دهی مایع در زیر دمای بحرانی انجام می‌شود. با این‌که انجام عملیات بر روی قطعات نهایی به دلیل حداقل اعوجاج انجام پذیر است، نیتروژن دهی مایع مقدار بیش‌تری نیتروژن و مقدار کم‌تری کربن را نسبت به فرآیندهایی که در

دمای بالا اتفاق می‌افتد به سطح مواد آهنی انتقال می‌دهد. این روش کاربردهای فراوان دارد و برای فولادهای کربنی کم آلیاژ، فولادهای ابزار، فولادهای زنگ نزن و چدن‌ها کاربرد دارد. مزایای این روش نیز همانند روش گازی افزایش مقاومت به سایش، افزایش استحکام خستگی و اعوجاج کم است. یک حمام نمک متداول برای نیتروژن دهی مایع از مخلوطی از نمک‌های سدیم و پتاسیم تشکیل شده است. مورفولوژی لایه سخت شده در شکل (۲- ۴) آمده است [۸].

شکل (۲- ۴) لایه سخت شده و لایه نفوذی تولید شده توسط نیتروژن دهی مایع سیانید- سیانات [۸].

۲- ۱- ۶- ۲- ۱- نیتروژن دهی با فشار مایع

در این فرآیند آمونیاک با فشار وارد حمام نمک سیانید- سیانات می‌شود. حمام آب‌بندی شده وتحت فشار ۷ تا ۲۰۵ کیلو پاسکال نگه داشته می‌شود. آمونیاک از ته محفظه وارد می‌شود و سبب به وجود آمدن یک جریان عمودی می‌گردد. درصد نیتروژن نوزاد توسط نرخ جریان آمونیاک کنترل می‌شود که برای نرخ ۰/۶ تا m/h ۱ میزان تجزیه آمونیاک ۱۵ تا ۳۰ درصد خواهد بود. حمام شامل سیانید سدیم و سایر نمک‌هاست.

ضخامت لایه به زمان و دمای نیتروژن دهی بستگی دارد. زمان به طور متوسط ۲۴ ساعت است و زمان کل فرآیند ممکن است بین ۴ تا ۷۲ ساعت متغیر باشد و دمای عملیات برای حفظ سختی مغز قطعه حداقل باید ۲۸ درجه بیش از دمای نیتروژن دهی باشد.