بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تهران
پردیس دانشکده های فنی
دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

نیتروژن دهی فولاد گرم کار H11 و بررسی خواص سایشی آن

نگارش:
حمزه فراتی راد

استاد راهنما:
دکتر احمد علی آماده

اساتید مشاور:
دکتر حمیدرضا قاسمی منفرد راد- دکتر شاهرخ آهنگرانی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد
گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

دی ماه 1387

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب حمزه فراتی راد تایید می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن ها استفاده شده است ، مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلا برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: حمزه فراتی راد

امضاء دانشجو:

تقدیم به آن هایی که مرا در دریای بیکران محبتشان غرق کردند

تقدیم به مادر دلسوز و پدر مهربانم

چکیده:

نیتروژن دهی پلاسمایی یکی از تکنیک‌های موثر برای بهبود ویژگی‌های سایشی، مقاومت خوردگی، استحکام خستگی و سختی سطح مواد مهندسی می باشد. در این تحقیق نمونه های فولادی H11 در شرایط مختلف دمایی، زمانی و ترکیب های مختلف اتمسفر مورد عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی پالسی قرار گرفتند. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند نیتروژن دهی برروی خواص لایه های نیتریدی و مورفولوژی سطح نمونه ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی، دستگاه آنالیز فازی پراش اشعه ایکس و AFM مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش های میکرو سختی سنجی و سایش به منظور بررسی ویژگی های مکانیکی نمونه ها انجام شد. نتایج نشان داد که اگر چه ترکیب اتمسفر تاثیر چندانی برروی ضخامت لایه نفوذی ندارد، ولی با افزایش درصد نیتروژن، ضخامت لایه ترکیبی افزایش می یابد. نمونه های نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $75\%N_2+25\%H_2$، که با توجه به نتایج XRD این نمونه ها دارای بیشترین مقدار فاز نیترید ε در لایه ترکیبی هستند، سختی بالاتری در مقایسه با نمونه های نیتروژن دهی شده در سایر اتمسفرها نشان می دهند. آزمایش های سایش نیز نشان داد که کمترین نرخ سایش مربوط به نمونه هایی است که دارای بالاترین سختی و بیشترین ضخامت لایه ترکیبی هستند. لایه ترکیبی با ضخامت پایین در طول آزمایش سایش می شکند و ذرات حاصل از شکسته شدن این لایه ترکیبی سخت به عنوان ذرات ساینده عمل کرده و سایش خراشی شدیدی را در سطوح سایش به وجود می آورند.

واژگان کلیدی: نیتروژن دهی پلاسمایی پالسی، لایه ترکیبی، لایه نفوذی، نیترید های ε و γ′، سایش.

تشکر و قدردانی:

برخود لازم می دانم از جناب آقای دکتر احمد علی آماده، استاد راهنمای این پایان نامه که در تمام مراحل انجام تحقیق راهنمایی های ارزشمندی را بر اینجانب ارزانی داشتند، تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از اساتید مشاور خود جناب آقای دکتر قاسمی منفرد راد و دکتر آهنگرانی به خاطر توصیه های مفیدشان کمال تشکر و قدردانی را دارم. از تمام کارکنان پژوهشکده مهام به خصوص آقای مهندس علی محمدی مدیر محترم گروه پژوهشی مواد و آقایان مهندس هادی مرادی و مهندس ایمان نعمت پور به خاطر فراهم آوردن امکانات لازم و همکاری های صمیمانه شان در انجام این تحقیق بسیار سپاسگزارم. و در پایان از تمامی دوستانی که هریک به نحوی در انجام این تحقیق با اینجانب همکاری داشتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول

مقدمه..... 2

فصل دوم

مروری بر منابع مطالعاتی..... 4

2-1- فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی 5

2- 2- مقایسه روش‌های مختلف نیتروژن‌دهی..... 6

2-3 - خواص ایجاد شده در عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی..... 6

2- 4- لایه های سطحی تشکیل شده در عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی..... 7

2- 5 - تاثیر عناصر آلیاژی برروی خواص لایه های نیتریدی..... 10

2 -6 - مقایسه روش های نیتروژن دهی پلاسمایی پالسی و مستقیم..... 14

2-7- تاثیر زمان عملیات بر خواص سطحی نمونه های نیتروژن دهی شده..... 22

2-8- تا ثیر دمای عملیات بر خواص سطحی نمونه های نیتروژن دهی شده..... 26

2-9- تاثیر مخلوط گازی روی فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی..... 31

2-10- بررسی خواص سایشی فولادهای نیتروژن دهی شده..... 34

فصل سوم

مواد و روش تحقیق 52

3-1- تجهیزات فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی 53

3-2- آماده سازی نمونه ها و پارامترهای فرآیند 53

3-3- بررسی های فازی و مورفولوژیکی 55

3-4- سختی سنجی 55

3-5- آزمایش سایش 56

فصل چهار

نتایج و بحث 58

4-1- بررسیهای ریز ساختاری 59

4-2- آنالیز فازی 65

4-3- سختی سنجی 67

4-5- بررسی رفتار سایش 79

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها 106

نتیجه گیری 107

پیشنهادها 109

منابع و مراجع 110

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول 2-1: مقایسه روش های نیتروژن دهی گازی و پلاسمایی [2]. 6

جدول 2-2: تشکیل فازهای γ' و ε'+ ε''= ε به صورت ε/γ' نسبت به زمان نیتروژن دهی [16]. 18

جدول 2-3: نسبت فازی ε/γ' برای نمونه های نیتروژن دهی شده پالسی (PGD) و مستقیم (DGD) [16]. 22

جدول۲-۴. شدت های بدست آمده از طرح های دیفراکسیون برای فازهای ε و γ' [17]. 26

جدول2-5. تغییر مقدار ضخامت لایه ترکیبی، لایه نفوذی و سختی سطح مربوط به نمونه های نیتروژن دهی شده مخلوط گازی مختلف [23]. 34

جدول2-6. شرایط مختلف نیتروژن دهی پلاسمایی [26]. 35

جدول2-7. ماکزیمم سختی سطحی، عمق و ضخامت لایه ترکیبی برای نمونه های نیتروژن دهی شده در شرایط مختلف [26]. 36

جدول2-8 ترکیب شیمیایی فولادهای عملیاتی [31]. 43

جدول2-9. شرایط انجام عملیات نیتروژن دهی[31]. 44

جدول2-10. میانگین زبری سطحی فولادهای مورد بررسی بعد از عملیات های سطحی متفاوت [31]. 47

جدول3-1 . ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده. 54

جدول3-2. شرایط عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی پالسی نمونه ها. 56

جدول 4-1. ضخامت لایه های ترکیبی و نفوذی تشکیل شده در ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$. 62

جدول4-2. ضخامت لایه های ترکیبی و نفوذی تشکیل شده در ترکیب اتمسفر $50\%N_2+50\%H_2$. 63

جدول4-3. ضخامت لایه های ترکیبی و نفوذی تشکیل شده در ترکیب اتمسفر $75.\%N_2+25\%H_2$ 63

جدول 4-4. آنالیز EDS فیلم های تریبولوژیکی تشکیل شده برروی سطح (نقطه a). 87

جدول 4-5. آنالیز EDS سطح سایش (نقطه b). 87

جدول 4-6. آنالیز EDS ذرات سایشی در نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش $1m/s$ و مسافت لغز 750 متر . 92

جدول 4-7. آنالیز EDS ذرات سایشی داخل شیارها در نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ بعد از مسافت لغزش 2000 متر. 93

جدول 4-8. آنالیز EDS ذرات سفید رنگ در تصویر SEM شکل 4-31 . 93

جدول 4-9. آنالیز EDS براده های سایشی در نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ بعد از مسافت لغزش 2000 متر. 94

جدول 4-10. آنالیز EDS نقطه a در نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 5 ساعت و اتمسفر $75\%N_2+25\%H_2$ بعد از مسافت لغزش 2000 متر. 99

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل 2-1: نمودار فازی Fe-N [3]. 10

شکل2-2: ریز ساختار SEM ناحیه نیترید شده آلیاژ دوتاییFe-18% Cr در دمای $670\ ^oC$ و به مدت 5 ساعت :(a)5 µm،(b)80 µm،(c)100 µm(نزدیک جبهه رشد) از سطح نمونه [14]. 12

شکل 2-3: طرح شماتیک ریز ساختار آلیاژ دوتایی Fe-18% Cr نیترید شدهدر دماهای 670^oC (a)، 570^oC (b) [14]. 12

شکل 2-4: تصاویر میکروسکوپ نوری(a) آلیاژ Fe-3%Cr نیتریده شده در $570\ ^oC$ به مدت 5 ساعت ،(b) آلیاژ Fe-30%Cr نیتریده شده در $670\ ^oC$ به مدت 5 ساعت ،(c) شماتیکی از شرایط تشکیل α ستونی در آلیاژهای Fe-Cr نیتروژن دهی پلاسمایی شده [14]. 13

شکل2-5: تصاویر SEM نمونه های نیتروره شده به روش مستقیم برای 3 ساعت نیتروژن دهی در دماهای مختلف (a)400، (b)450، (c)500 و (d) $550\ ^oC$ [16] . 16

شکل 2-6: تغییرات ریز سختی نمونه های نیتروره شده به روش مستقیم بر حسب عمق ازسطح در دماهای مختلف 500،450،400 و $550\ ^oC$ [16]. 16

شکل 2-7: تغییرات ریز سختی نمونه ها نیتروژن شده ای به روش مستقیم در دمای $500\ ^oC$ و زمان های مختلف به صورت تابعی از عمق از سطح نمونه ها [16]. 17

شکل2-8: طرح پراش اشعه ایکس برای نمونه های نیتروژن دهی شده در $500^{o}C$ در زمان های مختلف بروش مستقیم[16]. 18

شکل 2-9: اجزای فازی بدست آمده از طریق طیف CEMS به صورت تابعی از عمق برای نمونه های نیتروژن دهی شده به روش مستقیم [16]. 19

شکل 2-10: تغییرات ریز سختی نمونه های نیتروژن دهی شده به روش پالسی در $500\ ^{o}C$ و به مدت 3 ساعت و در فرکانس های مختلف [16]. 20

شکل 2-11: الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده پالسی در دمای $500\ ^{o}C$ و به مدت 3 ساعت در فرکانس های مختلف، (a) 2 kHz، (b)4 kHz، (c) 6 kHz، (d)8 kHz، (e) 10 kHz [16]. 20

شکل2-12: درصد فازهای بدست آمده در نمونه های نیتروژن دهی شده پالسی در $500^{o}C$ به مدت 3 ساعت در فرکانس های مختلف [16]. 21

شکل2-13: درصد فازهای بدست آمده به صورت تابعی از عمق از سطح نمونه برای نمونه های نیتروژن دهی پالسی شده در $500^{o}C$ و به مدت 3 ساعت، (a) 2 kHz، (b) 10 kHz[16]. 21

شکل۲-۱۴.تغییرات ریز سختی نمونه های نیتروژن دهی شده در دمای $۵۰۰\ ^{o}C$ و زمان های مختلف (■) ۲ h، (○) ۱۵ h، (*) ۲۸ h [17]. ۲۳

شکل2-15. تغییرات سختی سطح را به صورت تابعی از زمان عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی مستقیم برای نمونه های فولادی کم آلیاژ 4140 [17]. 24

شکل۲-۱۶. تصاویر SEM سطح مقطع نمونه های فولادی ۴۱۴۰ نیتروژن دهی شده در ^{o}C ۵۰۰ و
برای (a) ۱h، (b) ۴h، (c) ۱۵h، (d) ۲۸h [17]. ۲۴
شکل2-17. تغییر ضخامت لایه ترکیبی به صورت تابعی از زمان نیتروژن دهی [17]. 25
شکل2-18.تصاویر SEM لایه سطحی نمونه های نیتروژن دهی شده در دماهای مختلف (a)350،
(b)450 و (c) $550^{o}C$[19]. 27
شکل 2-19. ضخامت لایه ترکیبی و لایه نفوذی به صورت تابعی از دمای نیتروژن دهی [19]. 28
شکل 2-20. نمودار (a) سختی سطحی و (b) پروفیل سختی در عمق نمونه های نیتروژن دهی شده
در دماهای مختلف [19]. 29
شکل 2-21 . زبری سطحی (Ra) نمونه های نیتروژن دهی شده در دماهای مختلف [19]. 29
شکل 2-22. تصاویر SEM سطح نمونه های نیتروژن دهی شده در دماهای (a) 450 و (b) 550
درجه سانتیگراد [19]. 30
شکل 2-23. الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر گازی
$75\%N_2+25\%H_2$ به مدت 5 ساعت و در دماهای (a)350، (b)450 و (c) 550 درجه سانتیگراد [19]. 31
شکل 2-24. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده در مخلوط گازی
$90\%N_2+10\%H_2$ (a) و $90\%N_2$ +10%Ar (b) [23]. 32
شکل2-25. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده در مخلوط گازی (a)
$10\%N_2$ +90%Ar (b) $10\%N_2+90\%H_2$[23]. 33

شکل 2-26. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده در مخلوط های گازی
(a) 10%Ar + 10%H_2 + 80%N_2، (b) 80%Ar + 10%H_2 + 10%N_2، (c) 10%Ar + 80%H_2 + 10%N_2 [23].
33

شکل 2-27. تصویر SEM نمونه نیتروژن دهی شده در 450 ^oC و به مدت 4 ساعت (4 .450.20) [26]. 35

شکل 2-28. پروفیل ریز سختی سنجی نمونه ها را به صورت تابعی از فاصله از سطح نمونه ها [26]. 36

شکل 2-29 . الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده در شرایط مختلف [26]. 37

شکل 2-30. منحنی های سایش نمونه خام ونمونه های نیتروژن دهی شده در شرایط مختلف [26]. 38

شکل 2-31. تصاویر SEM سطح نمونه ها بعد از فاصله لغزشی 400m. (a) فولاد نیتروژن دهی نشده AISI5140 ; (b) فولاد AISI5140 نیتروژن دهی شده در شرایط 4.500.20 ; (c) فولاد AISI5140 نیتروژن دهی شده در شرایط 4.550.20 [26]. 40

شکل 2-32. تصاویر میکروسکوپ نوری سطوح سائیده شده بعد از 2000m فاصله لغزشی. (a) فولاد AISI 5140 نیتروژن دهی نشده; (b) فولاد AISI 5140 نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر ۲H_2%۸۰+ ۲۰%N_2 به مدت 4 ساعت در 500 ^oC [26]. 41

شکل 2-33. مورفولوژی براده های سایشی. (a) فولاد AISI5140 نیتروژن دهی نشده; (b) فولاد AISI5140 نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر ۲H_2%۸۰+ ۲۰%N_2 به مدت 4 ساعت در 500 ^oC [26]. 42

شکل 2-34. تصاویر SEM فولاد 4140 نیتروژن دهی در اتمسفر گازی ۲H_2%۹۹/۴+ ۲N_2%۰/۶ و

به مدت 17 ساعت و در دمای $550^{o}C$ [31]. 44

شکل 2-35. منحنی ریز سختی سنجی فولادهای عملیاتی در فرآیندهای مختلف [31]. 45

شکل 2-36. توزیع تنش باقیمانده برای سطوح عملیاتی مواد مختلف [31]. 46

شکل 2-37. توپوگرافی سطحی سه بعدی و تصاویر SEM الکترون های برگشتی از سطح فولاد 4140 نیترید شده [31]. 46

شکل 2-38. طرح شمایی از دستگاه انجام تست [31]. 47

شکل 2-39. میانگین ضریب اصطکاک به صورت تابعی از بار و سرعت لغزش برای شرایط لغزش (a) خشک و (b) روانکاری شده [31]. 48

شکل 2-40 .سایش خطی پین را در ناحیه سایش پایدار را به صورت تابعی از بار و سرعت لغزشی برای شرایط (a) خشک و (b) روانکاری شده[31]. 49

شکل 2-41. سرعت سایش سطح پین های عملیاتی در ناحیه پایدار برای لغزش (a) خشک و (b) روانکاری شده [31]. 50

شکل 2-42. تصاویر سطح مقطع پین فولادی 4140 نیتروژن دهی شده بعد از آزمایش سایش لغزشی خشک در بار 100N و سرعت لغزش 1m/s [31]. 50

شکل 2-43. مورفولوژی سطحی پین فولادی A355 (a) سخت شده و (b) نیتروژن دهی پلاسمایی شده بعد از آزمایش سایش روان کاری شده در بار 100N، سرعت لغزش 1m/s و فاصله لغزشی 2000m [31]. 51

شکل 3-1. شمایی از تجهیزات نیتروژن دهی مورد استفاده. 54

شکل 4-1. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های نیتروژن دهی شده در شرایط مختلف:

(a) S1، (b) S2، (c) S3، (d)S4، (e) S5، (f) S6. 60

شکل 4-2. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های نیتروژن دهی شده در شرایط مختلف:

(a) S13، (b)S14 ، (c) S15، (d)S16 ، (e) S17، (f) S18. 62

شکل 4-3. تصویر سطح مقطع نمونه نیتروژن دهی شده در بزرگنمایی 2000x. 65

شکل 4-4. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$. 66

شکل 4-5. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $75\%N_2+25\%H_2$. 67

شکل 4-6. سختی سطحی نمونه های نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$. 68

شکل 4-7. سختی سطحی نمونه های نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $50\%N_2+50\%H_2$. 68

شکل 4-8. سختی سطحی نمونه های نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $75\%N_2+25\%H_2$. 69

شکل 4-9. مقایسه سختی سطحی نمونه های نیتروژن دهی شده در شرایط مختلف. 69

شکل 4-10. تصاویر SEM سطح نمونه های نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $75\%N_2+25\%H_2$ و شرایط مختلف دمایی و زمانی; (a) دمای $500\ ^oC$ و زمان 5 ساعت ، (b) دمای $500\ ^oC$ و زمان 7 ساعت ، (c) دمای $540\ ^oC$ و زمان 5 ساعت ، (d) دمای $540\ ^oC$ و زمان 7 ساعت، (e) دمای $580\ ^oC$ و زمان 5 ساعت، (f) دمای $580\ ^oC$ و زمان 7 ساعت. 71

شکل 4-11. تصاویر SEM سطح نمونه های نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و شرایط مختلف دمایی و زمانی; (a) دمای $500\ ^oC$ و زمان 5 ساعت ، (b) دمای $500\ ^oC$ و زمان 7 ساعت ، (c) دمای $540\ ^oC$ و زمان 5 ساعت ، (d) دمای $540\ ^oC$ و زمان 7 ساعت، (e) دمای $580\ ^oC$ و زمان 5 ساعت، (f) دمای $580\ ^oC$ و زمان 7 ساعت. 73

شکل 4-12. تصویر AFM سه بعدی سطح نمونه ی نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $25\%H_2 + 75\%N_2$، دمای 500 درجه سانتیگراد و زمان 5 ساعت. 74

شکل 4-13. تابع توزیع اندازه ذرات در روی سطح نمونه ی نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $25\%H_2 + 75\%N_2$، دمای 500 درجه سانتیگراد و زمان 5 ساعت. 74

شکل 4-14. برآورد اندازه ذرات تشکیل شده برروی سطح در جهات مختلف. 75

شکل 4-15. تصویر AFM سطح نمونه نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $75\%H_2 + 25\%N_2$، دمای 540 درجه سانتیگراد و زمان 7 ساعت. 76

شکل 4-16.تابع توزیع اندازه ذرات در روی سطح نیتروژن دهی شده در ترکیب اتمسفر $75\%H_2 + 25\%N_2$، دمای 540 درجه سانتیگراد و زمان 7 ساعت. 76

شکل 4-17. پروفیل سختی در عمق نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $75\%H_2+25\%N_2$. 78

شکل 4-18. پروفیل سختی در عمق نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $50\%H_2+50\%N_2$. 78

شکل 4-19. پروفیل سختی در عمق نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $25\%H_2+75\%N_2$. 79

شکل 4-20. نرخ سایش نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و زمان ها و دماهای متفاوت تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s و مسافت لغزش 2000 متر در دمای محیط. 80

شکل 4-21 نرخ سایش نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $75\%N_2+25\%H_2$ و زمان ها و دماهای متفاوت تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s و مسافت لغزش 2000 متر در دمای محیط. 82

شکل 4-22. میزان کاهش وزن بر حسب فاصله لغزشی برای نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و زمان ها و دماهای متفاوت تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s و مسافت لغزش 2000 متر. 84

شکل 4-23. میزان کاهش وزن بر حسب فاصله لغزشی برای نمونه های نیتروژن دهی شده در اتمسفر $75\%N_2+25\%H_2$ و زمان ها و دماهای متفاوت تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s و مسافت لغزش 2000 متر. 84

شکل 4-24. تصاویر سطوح سایشی نمونه فولادی قبل از عملیات نیتروژن دهی تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s و مسافت لغزش 2000 متر. 86

شکل 4-25. شیارهای سایشی عمیق در سطح نمونه های سایشی قبل از عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی. 87

شکل 4-26. تصویر سطح سایش نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s و بعد از مسافت لغزش: (a) 250 ، (b) 750، (c) 2000 متر و آنالیز EDS نقاط a در سطح نمونه سائیده شده در: (d) 250، (e) 750 و (f) 2000متر. 89

شکل 4-27. تصویر سطح مقطع از نمونه سایشی نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s بعد از مسافت لغزش 750 متر. 89

شکل 4-28. تصویر SEM ذرات سایشی در نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s و مسافت لغزش 750 متر. 91

شکل 4-29. (a) کندگی سطحی و (b) شیار های سایشی برروی نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s بعد از مسافت لغزش 750 متر. 91

شکل 4-30. تصویر SEM شیارهای سایشی و ذرات سایشی داخل شیارها در نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ بعد از مسافت لغزش 2000 متر. 92

شکل 4-31. تصویر SEM براده های سایشی در نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 500^oC، زمان 7 ساعت و ترکیب اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ بعد از مسافت لغزش 2000 متر. 93

شکل 4-32. تصویر سطح سایش نمونه نیتروژن دهی شده در دمای 580^oC، زمان 7 ساعت و اتمسفر $25\%N_2+75\%H_2$ و تحت بار اعمالی 80N، سرعت لغزش 1m/s بعد از مسافت لغزشی، (a) 250، (b) 750 و (c) 2000 متر. 95