



بررسی تجربی تأثیر جنس، اندازه، زاویه و فشار پاشش ماسه بر روی رفتار سایشی فولاد AISI H13 در فرآیند قالب‌گیری ماهیچه

محمدرضا شهبگرد^{1*}، هادی همت‌جو²

1- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
2- دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
* تبریز، صندوق پستی 51664-16471، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

چکیده

با توجه به این‌که در فرآیند قالب‌گیری ماهیچه، سایش فرسایشی (Erosion) جعبه ماهیچه در اثر برخورد ذرات ماسه به بدنه فلزی قالب از چالش‌های مهم صنایع ریخته‌گری است، هدف این مقاله بررسی تأثیر جنس، اندازه، زاویه برخورد و فشار پاشش ذرات ماسه و همچنین نوع عملیات حرارتی بر روی میزان سایش فرسایشی فولاد ابزارگرم‌کار AISI H13 که به طور عمده در ساخت قالب ماهیچه مورد استفاده قرار می‌گیرد، است. جنس نمونه‌ها همانند جنس قالب از فولاد AISI H13 انتخاب شد. جهت انجام تست‌های سایش نمونه‌ها از دستگاه پرتاب‌کننده ماسه که فرآیند قالب‌گیری ماشینی جعبه ماهیچه را شبیه‌سازی تجربی می‌نمود، استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد میزان سایش فرسایشی نمونه‌ها تابعی از نوع عملیات حرارتی، زاویه برخورد و میزان فشار پاشش ذرات ماسه است، به طوری که نمونه‌های کوئنچ تمپر شده بیش‌ترین و نمونه‌های نیتراسیون شده کمترین میزان سایش فرسایشی را دارند. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) سطح نمونه‌ها نشان می‌دهند با تغییر زاویه برخورد از 20 درجه به 90 درجه، به صورت تدریجی نوع برداشت ماده از مکانیزم برش به شکست تبدیل می‌شود و با افزایش فشار از یک مقدار مشخص، ذرات ماسه پس از برخورد با سطح قطعه‌کار، در روی آن گیر کرده و با ایجاد لایه مخلوط شده مکانیکی (Mechanically Mixed layer) موجب کاهش میزان سایش فرسایشی سطح آن می‌گردند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان سایش هنگام استفاده از ماسه سیلیسی بیشتر از ماسه کرومیتی بوده و با افزایش اندازه ذرات ماسه میزان آن افزایش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 تیر 1393
پذیرش: 12 شهریور 1393
ارائه در سایت: 30 مهر 1393
کلید واژگان:
سایش فرسایشی
زاویه برخورد
عملیات حرارتی
فشار پاشش
لایه مخلوط شده مکانیکی

Experimental study of the influence of material, size, angle and spraying pressure of sand on the erosive behavior of AISI H13 steel in core molding process

Mohammad Reza Shabgard*, Hadi Hemmatjou

Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
* P.O.B. 51664-16471 Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 July 2014
Accepted 03 September 2014
Available Online 22 October 2014

Keywords:
Erosion
impact angle
blasting pressure
heat treatment
mechanically mixed layer

ABSTRACT

The erosion of core boxes caused due to sand shooting in core molding process is one of major concerns of foundry industry. This paper study the effect of impact angle, blasting pressure of sand particles and the type of heat treatment on erosion of AISI H13 tool steel that is widely used in producing core dies. The workpiece material used in this study was AISI H13 tool steel. The tests were performed on a sand shooting machine which simulated the core molding process experimentally. The results show that the erosion of samples is a function of impact angle, shooting pressure and heat treatment as the erosion increases with the increase in shooting pressure. Among the heat treated samples the highest level of erosion has been observed for quench tempered, martempered, carburized and nitrated samples respectively. The Scanning Electron Microscopy (SEM) of surface of templates show that by changing the impact angle from 20 to 90 degrees, the material removal type changes from cutting mechanism to fracture. Further analyses revealed that with increase in shooting pressure from a threshold value abrasive particles trap on the surface of the samples that makes the Mechanically Mixed Layer (MML) and so that decreases the erosion rate. Results express that silica sand causes more erosion than chromite sand; also the erosion increases with increase in size of sand particles.

1- مقدمه

بودن در بعضی از فرآیندها از جمله سندبلاست¹ و برش با جت آب همراه با مواد ساینده، در اکثر صنایع از جمله صنعت ریخته‌گری مضر است [1]. در

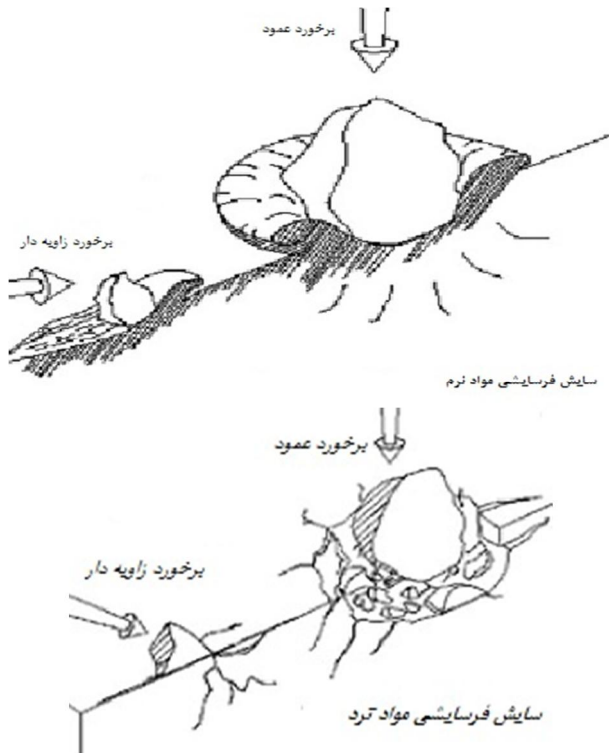
سایش فرسایشی، برداشت تدریجی ماده از سطح قطعه‌کار به سبب وارد شدن ضربات متعدد توسط ذرات جامد به سطح آن است. این پدیده با وجود مفید

1- Sandblast

Please cite this article using:

M.R. Shabgard, H. Hemmatjou, Experimental study of the influence of material, size, angle and spraying pressure of sand on the erosive behavior of AISI H13 steel in core molding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 249-256, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 مکانیزم‌های برداشت ماده در مواد ترد و نرم [4]

در پژوهش حاضر تأثیر نوع عملیات حرارتی، زاویه برخورد و فشار پاشش ذرات ماسه سیلیسی بر روی میزان سایش فرسایشی فولاد ابزار AISI H13 بررسی شده و امکان تشکیل لایه مخلوط شده مکانیکی (MML) در دمای اتاق و تأثیر آن بر روی عوامل خروجی مذکور تحلیل و ارزیابی خواهد شد. همچنین تأثیر جنس و اندازه ذرات ماسه نیز بر روی میزان سایش فرسایشی بررسی خواهد شد.

2- مکانیزم سایش فرسایشی

فرآیند سایش فرسایشی را بر اساس معیار عددی سایش⁵ (E_{cv}) که مطابق رابطه (1) تعریف می‌شود، به سایش نوع نرم، ترد و نرم-ترد تقسیم‌بندی می‌کنند [3].

$$E_{cv} = \frac{E_{450}}{E_{900}} \quad (1)$$

این معیار نسبت میزان سایش در زاویه برخورد 45 به 90 درجه است. مطابق جدول 1 در سایش نوع نرم مکانیزم غالب برداشت ماده از سطح قطعه‌کار از نوع برش، در برداشت ترد از نوع شکست است. در بقیه حالات هر دو مکانیزم با توجه به شرایط آزمایش فعال بوده و موجب سایش سطح قطعه‌کار می‌شوند.

بر اساس نتایج تحقیقات هاچینگز⁶ در تمامی شرایط آزمایش مقدار سایش (E) وابسته به مقادیر سرعت پاشش ذرات (v)، شعاع متوسط ذرات (r)، سختی ماده (H)، تانفس شکست ماده (Kc) و چگالی ذرات ساینده (ρ) بوده و از رابطه (2) تبعیت می‌کند [10].

$$E/\rho \propto r^{0.7} v^{2.4} \frac{\sigma^{0.2} H^{0.1}}{K_{2.3}^{0.3}} \quad (2)$$

همچنین با توجه به شکل 2 که توسط کلیس⁷ و همکارانش ارائه شده است، می‌توان گفت میزان سرعت ذرات ماسه با فشار پاشش آن، که پارامتر تنظیمی آزمایش‌های این پژوهش است، رابطه خطی دارد.

فرآیند ریخته‌گری جهت ایجاد راه‌گاه‌ها و حفره‌ها از اجزایی به نام ماهیچه استفاده می‌شود [2]. در فرآیند قالب‌گیری و تهیه ماهیچه، برخورد ذرات ماسه به سطوح داخلی جعبه ماهیچه که اغلب از جنس فولاد گرم‌کار می‌باشند، موجب کاهش دقت ابعادی قالب شده و عمر قالب را کاهش می‌دهد. این امر سبب افزایش هزینه‌های تولید ماهیچه در کارخانه‌های ریخته‌گری می‌شود.

در کل دو نوع مکانیزم ترد و نرم برای برداشت ماده از سطح قطعه کار در فرآیند سایش فرسایشی معرفی شده است (شکل 1). در برداشت ترد مکانیزم غالب سایش ماده تشکیل و اشاعه میکروتکرک‌هاست، درحالی‌که در برداشت نرم مکانیزم غالب برداشت ماده توسط پدیده‌های برش و شخم‌زنی است [4,3].

در فرآیند ساخت ماهیچه، نوع و مقدار سایش فرسایشی قالب ماهیچه به عوامل مختلفی از جمله خواص ذرات ماسه (اندازه، شکل، جرم و سختی)، جنس فولاد قالب ماهیچه (میکروساختار و سختی) و جریان سیال حامل ماسه (زاویه برخورد، سرعت جریان و نوع سیال) بستگی دارد [5].

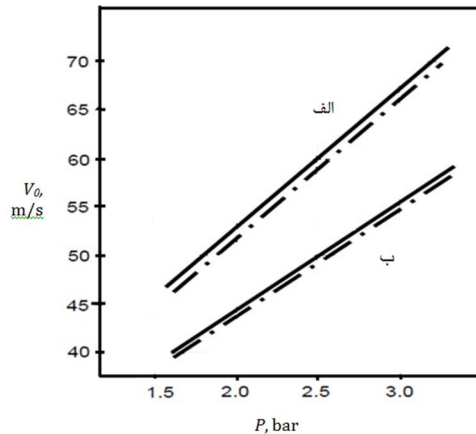
تحقیقات محدودی در ارتباط با تأثیر عوامل مختلف بر میزان سایش فرسایشی مواد مختلف به عمل آمده است. سوچانک¹ و همکارانش تأثیر میکروساختارهای مختلف بر روی میزان مقاومت به سایش فرسایشی فولادهای مختلف را بررسی کرده‌اند. ایشان با پاشش ذرات ماسه سیلیسی (SiO_2) با سرعت 20 متر بر ثانیه بر روی سطوح فولادهای عملیات حرارتی شده، فولاد کروم‌دار با فاز لیدوریتی² را دارای بیش‌ترین میزان مقاومت به سایش معرفی کرده‌اند. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش میزان سختی همواره دلیلی بر افزایش میزان مقاومت به سایش نبوده، به طوری که در آزمایش‌های ایشان فولاد ابزار HS11-0-4 با وجود داشتن سختی بیشتر از فولاد کروم‌دار لیدوریتی مقاومت به سایش کمتری از خود نشان داد [6]. بادیش³ و همکارانش در بررسی فرسایش فولاد سخت‌کاری شده با ذرات سیلیسی در دمای بالای 500 درجه سانتی‌گراد به وجود ذرات سیلیس در سطح نمونه‌ها پی برده و لایه ایجاد شده در سطح قطعه کار را لایه مخلوط شده مکانیکی (MML) نامیده‌اند. ایشان دلیل تشکیل این لایه را نرم شدن فولاد در دمای بالا به خصوص در زوایای برخورد کم گزارش کرده‌اند [7]. رودریگز⁴ و همکارانش با استفاده از دستگاهی شبیه به دستگاه سندبلاست تأثیرات عملیات حرارتی و زاویه برخورد را بر روی میزان سایش و زبری سطح فولادهای AISI H13 و P20 بررسی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مکانیزم‌های نرم و ترد را عامل سایش ماده در زوایای مختلف معرفی کرده‌اند، به طوری که تغییر در میزان سایش در سختی‌های مختلف را به تغییر در مکانیزم برداشت ماده در زوایای مختلف نسبت داده‌اند [8]. همچنین ایشان در پژوهش دیگری به بررسی رفتار فرسایشی فولادهای ابزار مورد استفاده جهت ریخته‌گری قطعات خودرو پرداخته و با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مکانیزم‌های برداشت ترد و نرم در زوایای برخورد مختلف را مشخص کرده‌اند [5]. شبنگرد و قاسم‌زاده به بررسی تأثیر فشار پاشش ذرات ماسه بر رفتار سایش فرسایشی فولاد AISI H13 پس از انجام عملیات حرارتی مختلف، از جمله نیتراسیون، کربن‌دهی و مارتمپر پرداخته‌اند. ایشان در تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) سطح نمونه‌ها، با توجه به اعمال بیشینه فشار 3 بار، لایه مخلوط شده مکانیکی را مشاهده نکرده‌اند [9].

1- Suchanek
2- Ledeburite
3- Badisch
4- Rodriguez

5- Erosion classification value
6- Hutchings
7- Kleis

جدول 2 آنالیز شیمیایی فولاد AISI H13 مورد استفاده

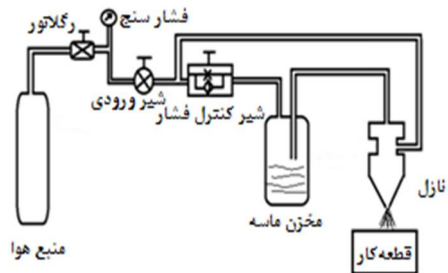
عنصر	درصد
Fe	89/7
C	0/372
Mo	1/12
V	1/07
Mn	0/477
Si	0/998
Cr	5/23
P	0/024
S	0/0256
Cu	0/221
Ni	0/121



شکل 2 رابطه فشار پاشش و سرعت ذرات ساینده (الف) اندازه ذرات ساینده ما بین 0/4-0/6 mm (ب) اندازه ذرات ساینده ما بین 0/6-1 mm [11]

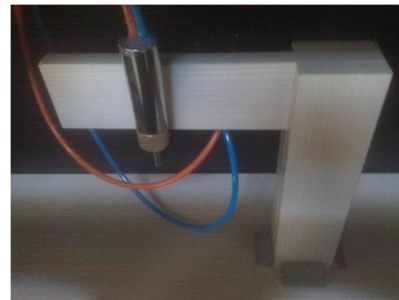
3- مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی دستگاهی جهت انجام تست سایش فرسایشی طراحی و ساخته شد. شکل 3 شماتیک دستگاه مذکور را نشان می‌دهد. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، در این دستگاه از جریان هوای فشرده برای حمل ذرات ماسه استفاده شده است. طرز کار دستگاه بدین طریق است که هوا پس از عبور از شیر کنترل سرعت در مخزن ماسه ایجاد تلاطم می‌کند. این تلاطم و خلأ نسبی ایجاد شده توسط جریان هوا در نازل سبب مکیده شدن ماسه به داخل نازل شده و موجب پرتاب آن به سمت قطعه کار می‌شود.



شکل 3 شماتیک دستگاه تست سایش فرسایشی

برای نگهداری قطعات و تنظیم زوایا از گیره مدرج قابل تنظیم استفاده شد. به منظور جلوگیری از تغییرات آبی زاویه، نازل و قطعه کار توسط نگهدارنده مخصوصی نسبت به هم ثابت و محکم نگهداشته شدند. در شکل 4 نحوه گیرش نازل نمایش داده شده است.



شکل 4 قید نگهدارنده نازل پاشش ماسه

جهت انجام آزمایش‌ها، با توجه به محدودیت فضای کاری دستگاه، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 40 mm و ارتفاع 10 mm از جنس فولاد ابزار AISI H13 آماده و ماشین‌کاری شدند. نتایج آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده در جدول 2 آمده است. نمونه‌ها قبل از انجام تست‌های عملی تحت عملیات حرارتی مختلف قرار گرفتند و سختی نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی مورد سنجش قرار گرفت. جدول 3 عملیات حرارتی به عمل آمده و سختی متوسط قطعات را بعد از عملیات مذکور نمایش می‌دهد.

جدول 1 طبقه‌بندی نوع سایش بر اساس مقادیر معیار عددی سایش (Ecv) [3]

نوع سایش	مقدار Ecv
سایش نرم	$Ecv > 1$
سایش ترد	$Ecv \approx 0/45$
تلفیقی از 2 حالت ترد و نرم	$1 > Ecv > 0/45$

جهت تعیین میزان سایش فرسایشی، نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش با ترازویی با دقت 0/1 میلی گرم توزین شدند. میزان سایش فرسایشی قطعه کار (E_r) با استفاده از رابطه (1) محاسبه گردید. طبق رابطه (3) داریم:

$$E_r = (M_{W1} - M_{W2}) / (M_p) \quad (3)$$

که در رابطه فوق M_{W1} و M_{W2} وزن قطعه کار قبل و بعد از انجام تست سایش و M_p وزن ذرات ساینده (SiC) مورد استفاده است.

جهت بررسی بهتر نتایج مربوط به تأثیر عملیات حرارتی، فشار پاشش و زاویه برخورد، آزمایش‌ها به صورت عاملی کامل (زاویه برخورد در 4 سطح، فشار پاشش در 3 سطح و نوع عملیات حرارتی در 4 سطح) طراحی شدند. جهت اطمینان از درستی نتایج آزمایش‌ها، هر کدام از آن‌ها 3 مرتبه تکرار که با ملاحظه موارد مذکور برای 3 متغیر فوق، تعداد 144 آزمایش انجام شد.

جدول 4 پارامترهای ثابت و متغیر در انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جهت تعیین عدد ریزی ماسه‌ها مقداری از آن غربال شده و جدا گردید و سپس با استفاده از استاندارد AFS عدد ریزی هر گروه محاسبه شد.

بنابراین، رابطه مستقیم میزان سایش فرسایشی با سرعت ذرات در معادله (2) برای فشار پاشش نیز صادق است.

در مورد علائم برش و شکست به طور کلی می‌توان گفت برش موجب پوسته‌پوسته شدن¹ و انفصال² مناطق مختلف نسبت به هم می‌شود. ایجاد لبه³ نیز در زوایای برخورد کم و مکانیزم برش مشاهده می‌گردد. درحالی‌که ایجاد براده⁴ و چاله‌های به صورت دهانه آتش‌فشان⁵ مشخصه اصلی ضربات با زاویه عمود است که در این حالت در نتیجه ایجاد میکروتکرک‌ها و به هم پیوستن آن‌ها ماده از سطح جدا می‌شود [12].

- 1- Flake formation
- 2- separation
- 3- lip
- 4- chipping
- 5- crater

جدول 5 نتایج تأثیر فشار پاشش، زاویه برخورد و نوع عملیات حرارتی بر روی نرخ سایش

ردیف	فشار پاشش (بار)	زاویه برخورد (درجه)	نوع عملیات حرارتی	نرخ سایش (g/kg)
1	5/5	90	کوئنچ - تمپر	0/1694
2	5/5	90	مار تمپر	0/1651
3	5/5	90	کربن دهی	0/1548
4	5/5	90	نیتراسیون	0/1279
5	5/5	65	کوئنچ - تمپر	0/1919
6	5/5	65	مار تمپر	0/1754
7	5/5	65	کربن دهی	0/1632
8	5/5	65	نیتراسیون	0/1247
9	5/5	45	کوئنچ - تمپر	0/2015
10	5/5	45	مار تمپر	0/1884
11	5/5	45	کربن دهی	0/1578
12	5/5	45	نیتراسیون	0/1220
13	5/5	20	کوئنچ - تمپر	0/1540
14	5/5	20	مار تمپر	0/1270
15	5/5	20	کربن دهی	0/1184
16	5/5	20	نیتراسیون	0/1025
17	4	90	کوئنچ - تمپر	0/0826
18	4	90	مار تمپر	0/0737
19	4	90	کربن دهی	0/0766
20	4	90	نیتراسیون	0/0596
21	4	65	کوئنچ - تمپر	0/0925
22	4	65	مار تمپر	0/0711
23	4	65	کربن دهی	0/0743
24	4	65	نیتراسیون	0/0580
25	4	45	کوئنچ - تمپر	0/1032
26	4	45	مار تمپر	0/0822
27	4	45	کربن دهی	0/0682
28	4	45	نیتراسیون	0/0512
29	4	20	کوئنچ - تمپر	0/0892
30	4	20	مار تمپر	0/0844
31	4	20	کربن دهی	0/0622
32	4	20	نیتراسیون	0/0491
33	2/5	90	کوئنچ - تمپر	0/0281
34	2/5	90	مار تمپر	0/0268
35	2/5	90	کربن دهی	0/0280
36	2/5	90	نیتراسیون	0/0259
37	2/5	65	کوئنچ - تمپر	0/0298
38	2/5	65	مار تمپر	0/0274
39	2/5	65	کربن دهی	0/0285
40	2/5	65	نیتراسیون	0/0255
41	2/5	45	کوئنچ - تمپر	0/0295
42	2/5	45	مار تمپر	0/0278
43	2/5	45	کربن دهی	0/0271
44	2/5	45	نیتراسیون	0/0251
45	2/5	20	کوئنچ - تمپر	0/0306
46	2/5	20	مار تمپر	0/0270
47	2/5	20	کربن دهی	0/0263
48	2/5	20	نیتراسیون	0/0239

جدول 3 سختی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی مختلف

نوع عملیات حرارتی	سختی حاصل شده (راکول C)
نیتروژن دهی مایع	56/5
کربن دهی	54/6
مار تمپر	53/4
کوئنچ تمپر	52/1

جدول 4 پارامترهای ثابت و متغیر در انجام آزمایش‌ها

پارامتر	مقدار
وزن ذرات ساینده (kg)	1
طول و قطر نازل (mm)	5 و 30
فاصله نازل تا قطعه (mm)	20±1
جنس نازل	سرامیک
جنس ساینده	ماسه سیلیسی و کرومیتی
زاویه (درجه)	90 65 45 20±2
فشار (bar)	2/5 4 5/5 ±0/1
نوع عملیات حرارتی	نیتراسیون، کربن دهی، مار تمپر و کوئنچ تمپر

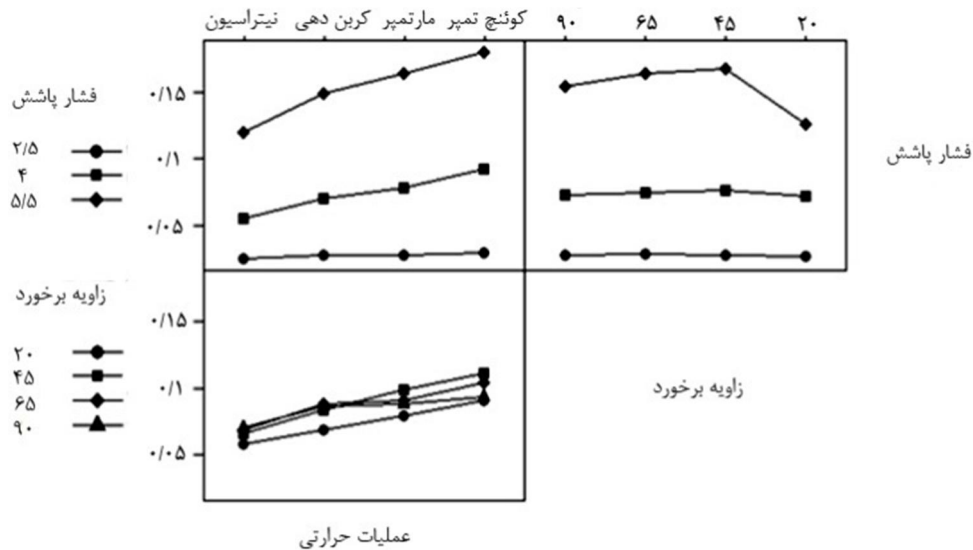
قبل و بعد از هر آزمایش قطعات در دستگاه پاک‌کننده مافوق صوت¹ با ترکیب آب و استون تمیز کاری شده و با هوای پر فشار خشک گردیدند.

4- نتایج و بحث

4-1- تأثیر میزان فشار بر روی نرخ سایش فرسایشی در عملیات

حرارتی مختلف

جدول 5 نتایج تأثیر نوع عملیات حرارتی نمونه‌ها، زاویه برخورد و فشار پاشش ماسه با عدد ریزی معادل 52 بر روی نرخ سایش در زوایای برخورد مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که این جدول نشان می‌دهد در تمامی شرایط آزمایش با افزایش میزان فشار، میزان سایش فرسایشی افزایش می‌یابد و با تغییر نوع عملیات حرارتی نیز میزان سایش به طور محسوس تغییر می‌کند. به طوری که نمونه‌های نیتراسیون شده کمترین و نمونه‌های کوئنچ تمپر شده بیشترین میزان سایش را دارند. بنابراین عملیات حرارتی نیتراسیون مناسب‌ترین گزینه برای سخت کاری قالب‌های ماهیچه است. همچنین در تمامی نمودارها دامنه تغییرات نرخ سایش با افزایش فشار بیشتر شده، به طوری که در فشار 2/5 بار اختلاف میزان سایش برای عملیات حرارتی مختلف خیلی کمتر از فشار 5/5 بار است. این پدیده را توسط رابطه (2) می‌توان توجیه کرد. با توجه به این رابطه مشخص است که از بین پارامترهای مؤثر بر میزان سایش فرسایشی، فشار پاشش یا سرعت برخورد ذرات ماسه با داشتن توان 2/4 در معادله بیشترین تأثیر را دارد. درحالی که توان سختی 0/1 بوده و در نتیجه تغییر عملیات حرارتی تأثیر به مراتب کمتری بر روی میزان سایش فرسایشی دارد. این امر را با استفاده از روش آنالیز واریانس برای نتایج تجربی نیز می‌توان اثبات کرد. نتایج آنالیز واریانس داده‌های تجربی در جدول 6 و نمودار تعامل اثر فاکتورهای مختلف بر روی نرخ سایش در شکل 5 نشان داده شده است. همان گونه که این نتایج نشان می‌دهند، فشار پاشش ذرات ماسه با داشتن بیشترین مقدار برای پارامتر F و به تبع آن کمترین مقدار برای P value، مؤثرترین عامل در میزان سایش فرسایشی است. تأثیر نوع عملیات حرارتی و زاویه برخورد ذرات ماسه نیز به ترتیب پس از فشار پاشش قرار می‌گیرند. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که اثرات متقابل این سه پارامتر متغیر تأثیر چندانی بر میزان سایش فرسایشی نداشته و اثر هر یک از آن‌ها از اثر تک تک عوامل اصلی کمتر است.



شکل 5 نتایج تعامل اثر فشار پاشش، زاویه برخورد و نوع عملیات حرارتی بر روی نرخ سایش قطعه کار

شده‌اند، مکانیزم سایش تردتر بوده و مکانیزم‌های ترک و شکست در برداشت ماده فعال‌تر خواهند بود.

علت این امر را با توجه به سختی نمونه‌های مذکور که در جدول 3 آمده است نیز می‌توان توجیه کرد. نمونه‌های دارای سختی سطح کمتر به هنگام اعمال ضربه با تغییر شکل پلاستیک در مقابل آن مقاومت می‌کنند ولی با توجه به نرمی بالا در مقابل برش مقاومت کمتری دارند. درحالی‌که در مواد سخت‌تر به دلیل عدم انعطاف و نداشتن تغییر شکل پلاستیک به هنگام اعمال ضربات دارای انرژی جنبشی بالا، میکروتورک به وجود آمده و با به هم پیوستن این میکروتورک‌ها قسمت‌هایی از سطح به صورت چاله جدا می‌شوند [3].

با توجه به نتایج جدول 5 و نمودارهای شکل 5، نمونه‌ها بر حسب نوع عملیات حرارتی رفتار سایشی متفاوتی از خود نشان می‌دهند، به طوری که نمونه‌های نیتراسیون و کربن‌دهی شده بیش‌ترین میزان سایش را در زوایای برخورد 65 و 90 درجه و نمونه‌های کوئنچ‌تمپر و مارتیمپر شده بیش‌ترین میزان سایش را در 20 و 45 درجه دارند. به نظر می‌رسد نتایج مذکور بر اساس نوع مکانیزم سایش در عملیات حرارتی مختلف قابل توجیه است. همان‌طور که بحث شد، با توجه به معیار عددی نوع سایش (E_{CV}) نمونه‌های کوئنچ‌تمپر و مارتیمپر شده دارای سایش نرم بوده و مکانیزم غالب برداشت ماده در آن‌ها برش و شخم‌زنی است. با توجه به فعال بودن برش در زوایای برخورد کم، این نمونه‌ها باید در زوایای برخورد 20 و 45 درجه بیش‌ترین میزان سایش را داشته باشند که این امر با نتایج تجربی در تطابق کامل است. همچنین گفته شد که با توجه به همان معیار، نوع سایش برای نمونه‌های کربن‌دهی و نیتراسیون شده تردتر بوده و مکانیزم‌های ترک و شکست فعال‌تر هستند. با توجه به برداشت بیشتر ماده به روش شکست در زوایای بالا، این نمونه‌ها باید در زوایای برخورد 65 و 90 درجه بیش‌ترین میزان سایش را داشته باشند که این امر نیز با توجه به نمودارهای شکل 7 تأیید می‌شود.

جدول 7 مقادیر میانگین E_{CV} به ازای فشارهای پاشش مختلف

میانگین	عملیات حرارتی
1/16	کوئنچ‌تمپر
1/1	مارتیمپر
0/93	کربن‌دهی
0/91	نیتراسیون

جدول 6 نتایج آنالیز واریانس فشار پاشش، نوع عملیات حرارتی و زاویه برخورد ذرات ماسه

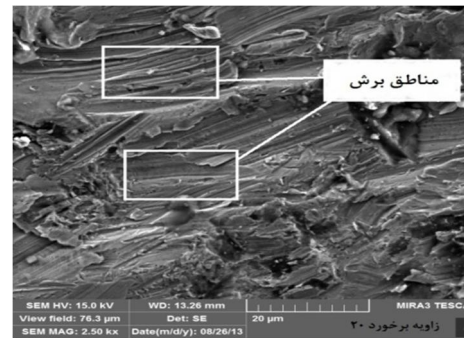
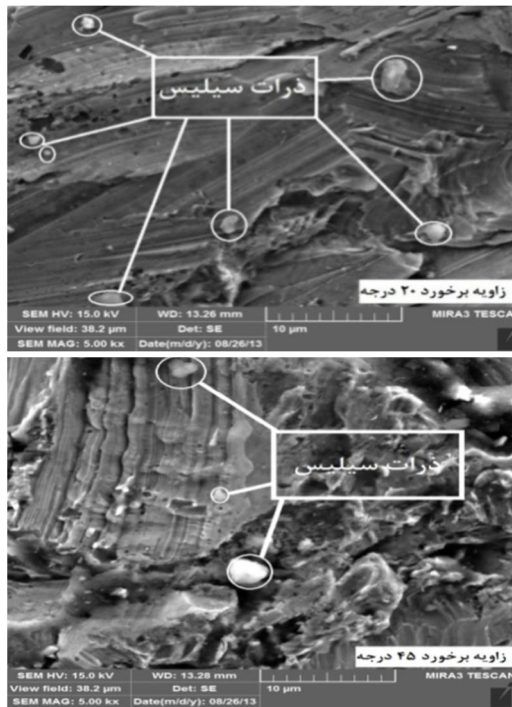
P	F	MS	SS	Df	Source
0/000	11039/60	0/19302	0/38604	2	فشار
0/000	418/65	0/00732	0/02197	3	عملیات حرارتی
0/000	103/66	0/00181	0/00544	3	زاویه
0/000	99/78	0/00174	0/01047	6	فشار * عملیات حرارتی
0/000	73/84	0/00129	0/00775	6	فشار * زاویه
0/000	11/75	0/00020	0/00185	9	عملیات حرارتی * زاویه
		0/00002	0/00199	114	خطا
			0/43550	143	مجموع

2-4- تأثیر نوع عملیات حرارتی و زاویه برخورد بر روی مکانیزم و

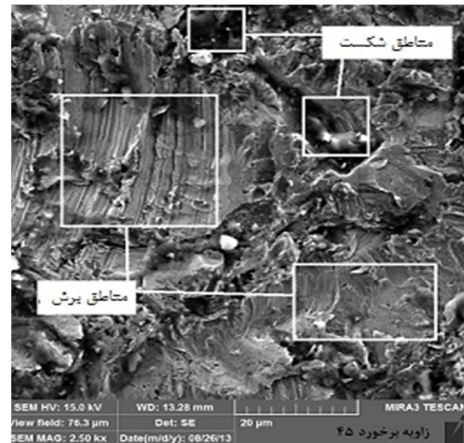
میزان سایش فرسایشی

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های نیتراسیون شده را در فشار پاشش 5/5 بار و زوایای برخورد مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که تصاویر مذکور نشان می‌دهند، در زاویه برخورد 20 درجه در روی سطح نمونه‌هایی که تحت سایش قرار گرفته‌اند، اثری از چاله که از مشخصه‌های شکست ترد است، دیده نمی‌شود و سطح به صورت پوسته‌ای و مناطق منفک از یکدیگر درآمده است. بنابراین مکانیزم برداشت ماده تنها برش است (شکل 6-الف). به تدریج با افزایش زاویه برخورد، نوع مکانیزم برداشت ماده از حالت برش به شکست تبدیل می‌شود. به طوری که در زوایای برخورد 45 و 65 درجه در سطح نمونه‌ها آثار ناشی از هر دو مکانیزم شکست و برش به ترتیب به صورت چاله‌ها و براده‌ها در کنار مناطق برش به صورت جدا از هم قابل مشاهده است (شکل 6-ب و ج). درحالی‌که در زاویه برخورد 90 درجه اثری از علائم ناشی از برش دیده نمی‌شود و نوع مکانیزم مؤثر و غالب که موجب سایش قطعه کار می‌گردد، تنها شکست است. وجود چاله‌های به شکل دهانه آتش‌فشان در روی سطح دلیل این ادعا است (شکل 6-د).

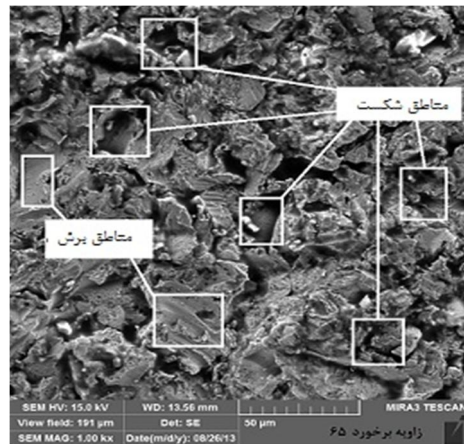
جدول 7 معیار عددی نوع سایش را در عملیات حرارتی و فشارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مطابق معیار عددی نوع سایش که در جدول 1 نشان داده شد، در نمونه‌هایی که تحت عملیات حرارتی کوئنچ‌تمپر و مارتیمپر قرار گرفته‌اند، سایش فرسایشی از نوع نرم بوده و مکانیزم غالب برداشت ماده به صورت برش و شخم‌زنی است. درحالی‌که در نمونه‌هایی که توسط عملیات حرارتی کربن‌دهی و نیتراسیون سخت‌کاری



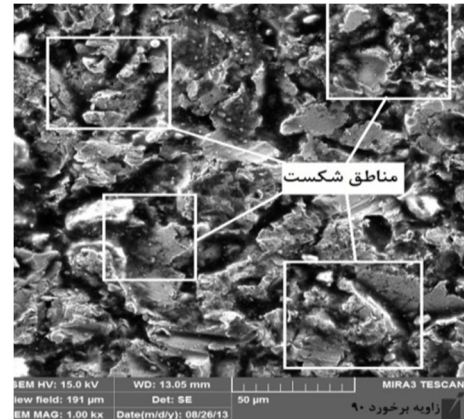
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 7 وجود ذرات سیلیس در سطح نمونه نیتراسیون شده در دمای اتاق و فشار 5/5 bar همچنین با توجه به شکل 5 و جدول 5، میزان سایش نمونه‌های نیتراسیون شده در زوایای برخورد کم به خصوص زاویه برخورد 20 درجه کاهش قابل توجهی دارد [13]. به نظر می‌رسد علت این کاهش، تشکیل لایه مخلوط شده مکانیکی توسط ذرات ساییده سیلیسی در سطح نمونه‌های فولادی بوده و در این حالت ذرات ماسه به دلیل فشار بالا به سطح نمونه‌ها نفوذ کرده و در آن گیر می‌افتند و به این طریق یک پوشش خیلی سخت و مقاوم به سایش در سطح نمونه‌های مذکور تشکیل می‌شود که این امر سبب کاهش میزان سایش فرسایشی نمونه‌های نیتراسیون شده می‌شود. تشکیل لایه مذکور توسط بادش و همکارانش [7] نیز در دمای بالای 550° گزارش گردیده است. شکل 7 ذرات سیلیسی گیر کرده در سطح نمونه نیتراسیون شده را پس از انجام آزمایش با فشار پاشش 5/5 بار نشان می‌دهد.

4-3- تأثیر اندازه و جنس ماسه بر روی نرخ فرسایش

نتایج تأثیر جنس ماسه بر روی نرخ سایش فرسایشی فولاد ابزار AISI H13 در فشار پاشش 3 بار در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در فشار پاشش 3 بار، به هنگام عملیات حرارتی‌های سطحی بدون تغییر در ترکیب شیمیایی، مقدار نرخ سایش فرسایشی در هر دو حالت استفاده از ماسه کرومیتی و سیلیسی تقریباً پایدار است که میانگین مقدار نرخ فرسایش برای ماسه کرومیتی 0/02 گرم بر کیلوگرم و برای ماسه سیلیسی 0/03 گرم بر کیلوگرم است. ولی زمانی که از عملیات سطحی با تغییر در ترکیب شیمیایی استفاده می‌شود نرخ سایش فرسایشی بسته به نوع فرآیند و ساختارهای ایجاد شده متفاوت می‌باشد.

همان‌گونه که شکل 8 نشان می‌دهد، مقدار نرخ سایش فرسایشی در ماسه کرومیتی کمتر از ماسه سیلیسی است. دلیل اصلی این موضوع، به شکل ذرات ساییده و سختی آن‌ها بر می‌گردد. به طوری که بالا بودن میزان سختی ذرات ماسه سیلیسی موجب ایجاد خراش‌های بزرگ‌تر بر روی قطعه‌کار به هنگام برخورد با آن گردیده و میزان برداشت ماده از سطح را افزایش می‌دهد. [10,14].

شکل 6 مکانیزم برداشت ماده در زوایای برخورد مختلف. زاویه برخورد الف) 20 (ب) 45 (ج) 65 (د) 90 درجه

شکل 9 و شکل 10 به ترتیب، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات ماسه‌های کرومیتی و سیلیسی را نشان می‌دهند. همان‌گونه که از تصاویر مذکور مشخص است، ذرات ماسه کرومیتی کروی‌تر بوده و سطوح صاف‌تری نسبت به ماسه سیلیسی دارند. این امر نیز می‌تواند دلیل دیگری برای کمتر بودن سایش فرسایشی با ذرات کرومیتی نسبت به ماسه سیلیسی باشد.

همچنین جدول 8 نتایج تأثیر اندازه ذرات ماسه بر روی نرخ سایش فرسایشی در فشار پاشش 4 بار را نشان می‌دهد. همان طوری که جدول مذکور نشان می‌دهد با افزایش عدد ریزی (AFS¹)، اندازه ذرات ساییده و برخورد کننده که موجب سایش فرسایشی می‌شوند، کوچک‌تر شده و حجم کوچک‌تری از ماده به ازای هر برخورد، سیلان می‌یابد. بنابراین با کاهش حجم ماده جابجا شده، میزان تحرک نایجابی‌ها کندتر شده و امکان جوانه زنی مجدد کاهش می‌یابد، این عامل سبب افزایش موضعی تنش سیلان قطعه‌کار گردیده و بدین طریق میزان تغییر شکل ماده و فرسایش آن کمتر می‌شود.

5- نتیجه‌گیری

1. میزان سایش فرسایشی همواره با افزایش فشار پاشش ذرات افزایش می‌یابد.
2. نمونه‌های نیتراسیون شده کمترین و نمونه‌های کوئنچ‌تمپر شده بیش‌ترین میزان سایش فرسایشی را دارند.
3. با افزایش فشار پاشش ماسه لایه مخلوط شده مکانیکی در سطح قطعه‌کار ایجاد می‌شود و این امر سبب کاهش میزان سایش فرسایشی قطعه‌کار می‌شود.
4. نمونه‌های نیتراسیون و کربن‌دهی شده بیش‌ترین میزان برداشت ماده را در زوایای نزدیک به 90 درجه و نمونه‌های کوئنچ‌تمپر و مارتمپر شده بیش‌ترین میزان سایش را در زوایای برخورد کم دارند.
5. با افزایش اندازه ذرات ماسه میزان سایش فرسایشی کاهش می‌یابد.
6. میزان سایش فرسایشی هنگام سایش با ماسه سیلیسی به دلیل سختی بالاتر و شکل هندسی ذرات، بیشتر از ماسه کرومیتی است.

6- پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود با توجه به اهمیت موضوع در تحقیقات آتی، تأثیر فشار پاشش و دمای قطعه‌کار در میزان و نحوه تشکیل لایه مخلوط شده مکانیکی بررسی شود.

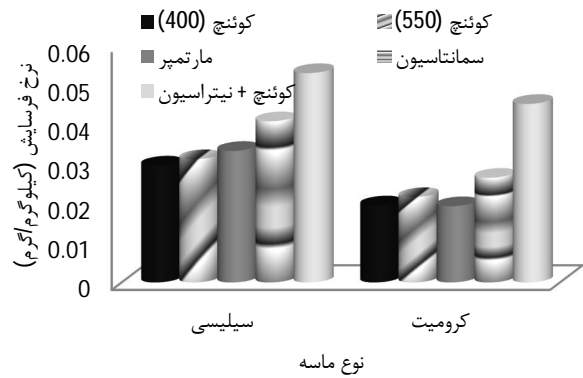
7- تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان مقاله از مدیریت و مسئولین محترم شرکت ریخته‌گری تراکتورسازی تبریز و کارشناسان محترم کارگاه‌های ماشین ابزار و تولید مخصوص دانشگاه تبریز که در انجام پژوهش حاضر و ساخت دستگاه تست سایش نویسندگان را حمایت نمودند، صمیمانه تشکر می‌نمایند.

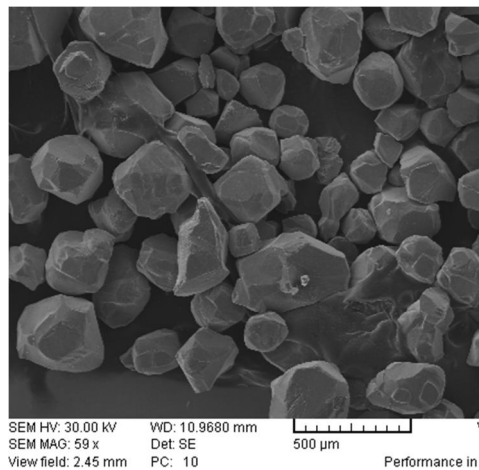
8- منابع

- [1] K. C. Ludema, *Introduction to wear, ASM Metals Handbook Volume 18. Friction, Lubrication and Wear*, pp. 320-321, University of Michigan, 1992.
- [2] C. W. Ammen, *The Complete Handbook of Sand Casting*, pp. 80-85, TAB Books, 1979.
- [3] H. Wensink, M. C. Elwenspoek, A closer look at the ductile-brittle transition in solid particle erosion, *Wear*, Vol. 253, No. 9-10, pp. 1035-1043, 2002.
- [4] Y.-F. Wang, Z.-G. Yang, Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials, *Wear*, Vol. 265, No. 5-6, pp. 871-878, 2008.

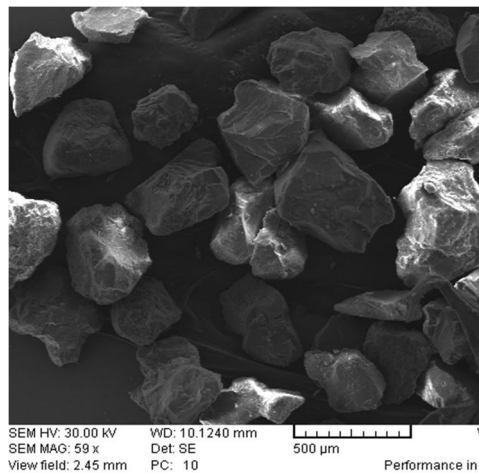
1- American Foundry Society



شکل 8 نرخ سایش فرسایشی فولاد AISI H13 با انواع ماسه ماهیچه در فشار پاشش 3 بار



شکل 9 دانه‌بندی و توزیع ذرات ماسه کرومیتی



شکل 10 دانه‌بندی و توزیع ذرات ماسه سیلیسی

جدول 8 تأثیر اندازه ذرات ماسه بر روی نرخ سایش فرسایشی در فشار 4 بار

نوع عملیات حرارتی	عدد ریزی	نرخ سایش (g/kg)
نیتراسیون	49	0/0613
	55	0/0581
کربن دهی	49	0/0779
	55	0/0756
مارتمپر	49	0/0742
	55	0/0731
کوئنچ تمپر	49	0/0839
	55	0/0815

- [10] I. M. Hutchings, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, pp. 22-58, Edward Arnold, 1992.
- [11] I. Kleis, P. Kulu, *Solid Particle Erosion*, pp. 9-19, London, Springer, 2008.
- [12] C. K. Fang, T. H. Chuang, Surface morphologies and erosion rates of metallic building materials after sandblasting, *Wear*, Vol. 230, pp. 156-164, 1999.
- [13] F. Ashrafzadeh, H. Hajinazari, M. MonirVaghefi, Evaluation of the tribological behavior of piston rings and the effect of nitration plasma, *The 7th National Seminar on Surface Engineering and Heat Treatment*, Isfahan, Iran, 2006. (In Persian)
- [14] Bingley, M.S., and O'Flynn, D.J., Examination and comparison of various erosive wear models, *Wear*, Vol. 258, pp. 511-525, 2005.
- [5] J. Rodriguez, D. Martinez, A. Perez, R. Gonzalez, E. Rodriguez, S. Valtierra, Erosion wear in heat treated tool steels used in core boxes at automotive foundries, *Wear*, Vol. 263, No. 1-6, pp. 301-308, 2007.
- [6] J. Suchánek, V. Kuklík, E. Zdravecká, Influence of microstructure on erosion resistance of steels, *Wear*, Vol. 267, No. 11, pp. 2092-2099, 2009.
- [7] C. Katsich, E. Badisch, M. Roy, G. R. Heath, F. Franek, Erosive wear of hardfaced Fe-Cr-C alloys at elevated temperature, *Wear*, Vol. 267, No. 11, pp. 1856-1864, 2009.
- [8] E. Rodriguez, M. Flores, A. Pérez, R. D. Mercado-Solis, R. González, J. Rodriguez, S. Valtierra, Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels, *Wear*, Vol. 267, No. 11, pp. 2109-2115, 2009.
- [9] H. Qasem Zade, *Experimental study of effect of blasting pressure, size of sand particles and heat treatment on the erosion behavior of AISI H13 tool steel*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, 2011. (in persian)