



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Society of
Manufacturing
Engineering of
Iran

Numerical and Experimental Investigation of Fracture Fatigue and Resistance of Coating in Abrasion due to the Thermal Spray Method

Research Article

Mostafa Baran Pour¹, Meisam Mohammadi² , Afshin Iranmanesh³

 [10.22067/jacsm.2025.90568.1295](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.90568.1295)

Abstract : Fracture toughness is one of the important variables in engineering designs. For repair and maintenance of tools operating in corrosive, abrasive, oxidation or thermal environment, thermal spray method is used to increase the toughness. Depending on the loading conditions and material properties, various methods are used for determining the toughness. In the present study, ASTM standard is used for experimental tests and determination of K_{IC} . Latter, finite element software is applied for simulating and toughness analysis. Finally, the results of experimental and finite element methods are compared. Also, the method of thermal spray is determined based on the working conditions in addition to increasing the toughness.

Keywords: ASTM Standard, Thermal spray method, Fracture toughness, Finite element solution, Abrasion, Corrosion.

1. Introduction

Fracture toughness is an important issue in engineering designs with special importance due to the working situation [1]. Hence, in engineering applications, surface quality of the tools is important. Thermal spray method is one the usual methods for increasing the surface strength [2]. It is shown high strength parts have low fracture toughness [3]. In order to determine the toughness of the coated parts, and depending on the type of loading and material, different methods are used. In this study, the effect of various factors on the quality of the surface coating and the toughness of the parts hardened by thermal spray has been investigated experimentally and by numerical modeling.

2- Drop test simulation (Numerical solution) both experimentally and by numerical modeling.

In order to numerically investigate the effect of effective parameters on toughness, ANSYS software has been used. Considering that the experimental tests are of the impact type, the collision has been modeled in ANSYS finite element software with the help of the Structural and Ls Dyna modules.

3- Experimental Tests

Materials

In this study, Stainless Steel of grade 304 is used.

Preparing samples

Sample preparation was done at Razi Laboratory and tests were done in the reference laboratory of Vali Asr University of Rafsanjan. In order to perform the thermal spraying process and determine the desired mechanical properties, samples were prepared according to ASTM standards in dimensions of 2.5 x 48 x 146 mm with an increase of 92.3% using a laser cutting machine from a 2.5 mm sheet. For spraying, the samples must have a certain roughness and the surface of the samples must be cleaned to be free from any external contamination.

Spraying process

In order to investigate various parameters, laboratory conditions were determined and specified for the samples. The factors investigated included spray angle, number of spray passes, spray temperature, speed of the coating particle launcher, etc., which were investigated at each stage depending on the experience of the laboratory operator and the design of the experiments.

Determination of spraying conditions

In this study, considering the capabilities of the devices and the practical experiences of the laboratory user, the test conditions were selected and four conditions were selected as simultaneous examination conditions [4]. Then, in order to examine the spray distance and the effect of the spray angle individually on the toughness, spraying was carried out at two different angles and two different distances, considering the same conditions.

* Manuscript received 2024 November 2, Revised 2025 April 6, Accepted 2025 July 11.

¹ M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

² Corresponding author: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. **Email:** meisam.mohammadi@vru.ac.ir

³ M.Sc., Department of Civil Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Table 1. Spraying characteristics

Test Number	Angle of spraying (In degrees)	Spraying distance	Speed of projectile (m/s)
1	30	35	1.5
2	0	30	1.5
3	40	40	1.3
4	15	20	1
5	30	20	2
6	30	35	2
7	40	20	2
8	10	20	2

In all cases, the air pressure is 5 bars and the oxygen pressure is 6.8 bars [5].

For preparation, metallographic polishing and etching methods are sufficient for electrically conductive materials. Non-conductive materials are usually coated with a thin layer of carbon, gold, or gold alloys. In this study, Stellite 6 powder, a cobalt-based alloy, was used as a coating under high-speed conditions. Stellite 6 powders have high corrosion and wear resistance due to the presence of materials such as chromium and cobalt. In Table 2., some characteristics of Stellite 6 is tabulated.

Table 2. Constituent elements of Stellite 6 powder

Element	W	Ni	Mn	Si	Fe	C	Mo	Co	Cr
Weight percentage	4.5	3	2	1.5	3	1.2	1.5	Bal	29

4- Results

After preparing the samples and fixing them with clamps on the table inside the acoustic chamber, the spraying process was performed. A selection of the spraying results is presented in the tables below.

Table 3. Results of test 1.

Passes No.	Pass temperature (In Celsius)	Thickness increment in each pass (In Micron)
1-2	100	25
3	160	47
4	158	60
5-6	140	100-130

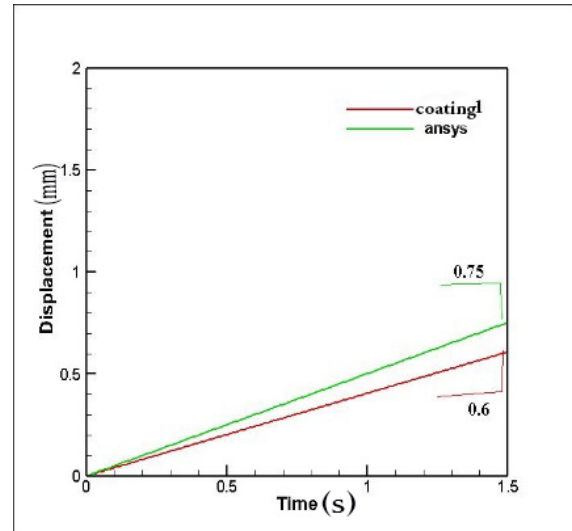
Table 4. Results of test 2.

Passes No.	Pass temperature (In Celsius)	Thickness increment in each pass (In Micron)
1-2	170	60-65
3-4	173	90-130

Drop weight test in 1 meter height

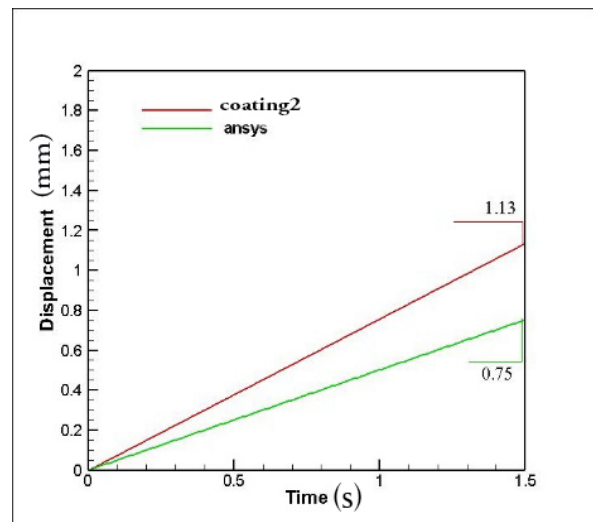
The drop weight test device available in the composite materials laboratory of Vali-e- Asr University of

Rafsanjan was used to conduct the experiment. The operation of this device is based on two displacement sensors and a contact load sensor. The contact load sensor is made of piezoelectric material and can withstand impacts up to 1200 kilo Newtons. The displacement sensor is also capable of storing 800 data sets during the test. Depending on the type of fixtures in the device, samples with dimensions of 10*10 to 25*25 can be used with four-sided clamping boundary conditions.

**Figure 1. Impact test of sample 1, spray distance 35 cm, spray angle 30, spray gun speed 1.5**

As conclusion, the following results can be mentioned:

- ✓ The results of the impact test show that, considering that these coatings are used against factors such as corrosion and abrasion, for parts that are in impact environments and need to be coated, paying attention to the type of coating and coating conditions can provide optimal impact resistance and, as a result, increase the life of the coating.

**Figure 2: Impact test of sample 2, spray distance 35 cm, spray angle 0 degrees, spray gun speed 1.5**

- ✓ The result is that by increasing the spray angle, the fracture toughness increases by 42%.
- ✓ By increasing the spray distance, the fracture toughness decreases by 8%.
- ✓ In the case of the maximum distance of 40 centimeters and the spray angle of 40 degrees, the amount of powder consumption and the time of working with the machine are the highest due to the increase in the spraying stages, and a fracture toughness value of 217 was obtained in this case.

Reference

- [1] [Drilling Industry Magazine](#), No 12 and 13, p. 164, 2017.
 - [2] Saini, H. D. Kumar and V.N. Shukla, "Hot Corrosion behaviour of Nanostructured Cermet based Coatings Deposited by Different Thermal Spray Techniques: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, 2017.
 - [3] J.A. Joyce, D. Wells, B. Stoltz, L. Shelton, P. Jacobs and R.E. Link, "Evaluating the Fracture Toughness of Layered Pressure Vessel Steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 207, 2018.
 - [4] S. Matthews, and L.M. Berger, "Inter-diffusion between thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings and an Alloy 625 substrate during long-term exposure at 500 °C, 700 °C and 900 °C," *Journal of Alloys and Compounds*, vol 770. 2019.
 - [5] R. Ahadi, H. Harati Zadeh and M. Mohammadi, "Investigation of mechanical properties and abrasion resistance of titanium-based ceramic nanocoatings," M.Sc. Thesis, *Shahrood Univesrity*, Iran, 2019.
-



بررسی عددی و تجربی چقرمگی شکست و مقاومت به سایش سطوح پوشش داده شده به روش پاشش حرارتی*

مقاله پژوهشی

مصطفی باران پور^(۱) میثم محمدی^(۲) افشین ایرانمنش^(۳)

doi 10.22067/jacsm.2025.90568.1295

چکیده چقرمگی شکست به عنوان یک متغیر مهم در طراحی های مهندسی از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردار است. بدین منظور برای طراحی، تعمیر و نگهداری قطعاتی که در محیط های تحت سایش، خوردگی، اکسیداسیون و حرارت قرار می گیرند، به منظور افزایش چقرمگی و مقاومت آن ها در برابر عوامل ذکر شده از پوشش های مقاوم سطحی به روش پاشش حرارتی استفاده می شود. به منظور تعیین چقرمگی قطعات پوشش داده شده و بسته به نوع بارگذاری و ماده، از روش های مختلفی استفاده می شود. در این پژوهش از استاندارد ASTM برای تعیین ابعاد و اندازه قطعات آزمایش تجربی و محاسبه KIC به عنوان متغیر چقرمگی استفاده شده است. سپس با استفاده از نرم افزارهای اجزای محدود به شبیه سازی و تحلیل چقرمگی شکست قطعه پوشش داده شده پرداخته شده است و در انتها دو روش تجربی و اجزای محدود مقایسه گردیده است. همچنین انتخاب نوع پوشش و روش پوشش دهی مناسب با توجه به محیط کارکرد قطعه (خوردگی، سایش، اکسیداسیون) به منظور افزایش چقرمگی قطعات از دیگر اهداف این پژوهش است.

واژه های کلیدی استاندارد ASTM، روش پاشش حرارتی، چقرمگی شکست، حل اجزای محدود، سایش، خوردگی.

مقدمه

شیرآلات هستند. در محیط های دارای خوردگی، سایش، حرارت و اکسیداسیون اتصالات ممکن است کارایی مناسبی نسبت به اهداف تعیین شده نداشته باشند یا در محیط های پرفشار دچار شکست یا ترک گردند. و خطرات جبران ناپذیری به بار آورند [1]. با توجه به موارد ذکر شده، در نظر گرفتن چقرمگی شکست (Fracture toughness) به عنوان عامل مهمی در کارایی قطعات می باشد. از آنجایی که معمولاً قطعات با استحکام بالا مقدار چقرمگی شکست پایینی دارند. با استفاده از پوشش های مناسب می توان به مواد با استحکام و چقرمگی بالایی دست یافت [2,3]. پژوهشگران مختلفی به بررسی انواع روش های پوشش دهی و همچنین متغیرهای موثر در این امر پرداختند. در این پژوهش ها تحلیل و بررسی ترک خوردگی ها و میزان چسبندگی پوشش های فلزات به تحلیل چقرمگی شکست مورد بررسی قرار گرفت [4]

مسائلی نظیر سایش و خوردگی از عوامل تأثیرگذار بر روی تولید مداوم می باشد و می تواند در برخی شرایط کاری باعث کاهش کیفیت محصولات صنعتی و یا باعث ایجاد و رشد ترک یا شکست در قطعات شود. به عبارت دیگر با توجه به پیشینه صنعت نفت و گاز، راهبردی بودن اکثر قطعات صنعت نفت و گاز، همچنین قدیمی بودن فناوری اکثر قطعات و با توجه به محدودیت تامین قطعات، باید به دنبال روش های جدیدی برای افزایش عمر و مقاومت قطعات به غیر از مرحله ساخت و طراحی بود. در صنایع، از خطوط لوله برای انتقال محصولات به دلیل هزینه پایین، امن بودن و تسریع در فرآیند انتقال استفاده می شود. اتصالات بکار رفته در خطوط لوله با توجه به نوع کارایی انواع مختلفی دارند، که یکی از اتصالات مهم در فرآیندهای انتقال،

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۱ می باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. Email: meisam.mohammadi@vru.ac.ir

(۳) مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

مطابقت بسیار خوبی نشان دادند. بر اساس نتایج این پژوهش روش نمونه‌های دیسک برزیلی با ترک مرکزی شون که یکی از روش‌های استاندارد پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ می‌باشد. هم در حالت کشش و هم در حالت برش مناسب‌ترین روش بوده است.

هاشمی و همکارانش به تعیین تجربی و عددی چقرمگی شکست با استفاده از اطلاعات آزمایش ضربه شاری در فولاد لوله‌های انتقال گاز با گرید APIX65 پرداختند [10]. در این پژوهش از یک روش نیمه-تجربی جهت محاسبه چقرمگی شکست لوله‌های فولادی (با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی‌متر) با توجه به اطلاعات موجود در آزمایش ضربه شاری استفاده شد. از نتایج حاصله مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط چقرمگی شکست برای فولاد مورد آزمایش بدست آمد. همچنین از حل المان محدود نمونه آزمایش C(T) با استفاده از تئوری اصلاح شده گرسون جهت محاسبه میزان گشودگی نوک ترک (در حالت بحرانی) با سه ضخامت مختلف نمونه انجام گردید. که نشان دهنده مطابقت مناسب مقادیر بدست آمده برای این فولاد در دمای محیط است.

آشنای قاسمی و همکارانش به بررسی تجربی اثر دما روی پاسخ ضربه‌ای سرعت پایین صفحات آلومینیوم شیاردار تعمیر شده توسط وصله‌های کامپوزیتی چند لایه دارای لایه فلزی پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد دما تاثیر بسیار بر روی رفتار ضربه‌ای و استحکام ضربه‌ای وصله‌ها و نمونه تعمیر شده دارد به‌طوری‌که باعث کاهش ۲۰ درصدی مقاومت به ضربه در دماهای بالاتر و پایین‌تر محیط می‌شود. [11]

شبیه‌سازی آزمایش ضربه (حل عددی)

به منظور شبیه‌سازی برخورد در نرم افزار اجزای محدود انسیس ماژول‌های structural و Ls Dyna فعال گردیده است. سپس با توجه به سه بعدی بودن قطعه از گروه LS-DYNA Explicit المان 3D Solid 164 انتخاب شده است. در ادامه، با توجه به اینکه قطعه پایه و پرتابه هر دو از جنس فولاد و دارای خواص یکسان هستند اما ماده پوشش دارای خواص متفاوت است، باید در انتخاب مواد دو نوع ماده انتخاب گردد که در زمان ایجاد شبکه با انتخاب نوع ماده برای هر کدام خواص ماده انتخابی اعمال گردد. به منظور شبیه‌سازی قطعه و پوشش از قسمت Create-

[6]. خوش نژاد به بررسی و تعیین خواص مکانیکی پوشش‌های مقاوم حرارتی پلاسما اسپری، تحت بارگذاری‌های حرارتی به روش تست فرورونده بر روی بستر از جنس سوپر آلیاژ GTD111 پرداخت [7]. مقدار تخلخل نمونه‌ها با استفاده از نفوذ آب بدست آمد. مقدار سختی و مدول الاستیک لایه‌های پوشش را با استفاده از آزمون نانوفروروندگی محاسبه و همچنین مقدار سختی لایه‌های پوشش با استفاده از روش میکروسختی سنجی بدست آمد. مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر تعیین شده همپوشانی خوبی با مقادیر تجربی دارد.

شریفی مدل‌سازی برخورد ذرات مذاب به لایه را مورد بررسی قرار داد [8]. بدین منظور پوشش تحت تاثیر شکل، میزان پخش شدن ذره و یا قطره برخورد یافته می‌تواند از پیوستگی و انجام مناسب‌تر برخوردار باشد و کمتر تخلخل داشته باشد. از نشان دادن این پوشش‌ها بر روی قطعات مکانیکی در راستای تقویت خصوصیات سایش و خوردگی این قطعات استفاده می‌شود. در این پژوهش مدل‌سازی قطره برخورد یافته به یک سطح صلب با سرعت بالا در لحظه برخورد (یک متر بر ثانیه) در نرم افزار Ls-Dyna و در حالت برخورد عمودی با زیر لایه مدل انجام شده است. و بعد از اطمینان از صحت نتایج با توجه به مقایسه آن با نتایج مرجع، مدل تعمیم داده شده است. همچنین به محاسبه ضرابی همچون پهن شدگی، ارتفاع حداکثر قطره، فشار گذاری داخلی قطره با استفاده از تغییر در میزان ضرایب اصطکاک زیر لایه، سرعت قطره و زاویه برخورد پرداخته شد.

منصوری به ارزیابی دقت روش‌های مختلف اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ در شرایط کشش و برش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی پرداخت [9]. این پایان نامه تلاشی برای مقایسه‌ای بین شش روش تعیین چقرمگی مود کششی و سه روش تعیین چقرمگی شکست مود برشی سنگ‌ها بر اساس میزان حساسیت نتایج آن‌ها به تغییر اندازه نمونه‌ها و تغییر طول ترک در نمونه‌هاست. در ابتدا نمونه ترک‌دار لازم، بلور مصنوعی با مصالح گچ ساخته شد. سپس نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف به طور جدا تجزیه و تحلیل کردند. میزان حساسیت نتایج به تغییر اندازه طول ترک مشخص شد. و سپس با نرم افزار Abaqus نحوه توزیع تنش و جابه جایی‌ها در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار و نیم دیسکی ترک‌دار بررسی شد. رفتار شکست نمونه‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه و نتایج



(الف) نمونه های آزمایش



(ب) برش نمونه های آزمایش

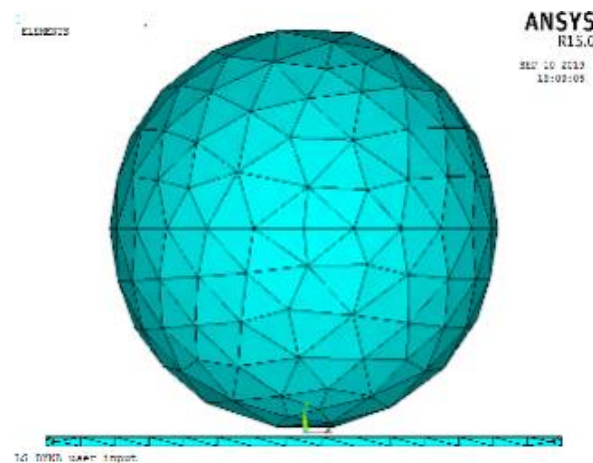
شکل ۲ نمونه های آماده شده

به جهت اینکه در عملیات پوشش دهی نمونه ها ثابت نگه داشته شوند، به فاصله ۲۴ mm در عرض نمونه و ۲/۵ mm از لبه، سوراخ هایی ایجاد شد تا نمونه ها در هنگام عملیات پوشش دهی بر روی سطح به وسیله پرچ به میز کار ثابت گردند. در این عملیات از دستگاه فرز fp4mk.f ساخت ماشین سازی تبریز مستقر در آزمایشگاه مرجع دانشگاه ولی عصر رفسنجان استفاده شد. همچنین به منظور کنترل فرایند پاشش برای ثابت نگه داشتن نمونه ها، از پروفیل فولادی با مقطع مربع جهت پیچ کردن نمونه ها در محل های سوراخ شده استفاده شده است. به علاوه، به منظور جلوگیری از افزایش مصرف پودر مخصوص پوشش دهی، نمونه ها در فاصله بسیاری نزدیکی از هم قرار داده شدند.



شکل ۳ نمونه های آماده شده جهت فرایند پوشش دهی

Volumes-Block-By Dimension ابعاد مورد نظر وارد و برای رسم گلوله از قسمت Sphere Create-Volumes-Sphere-Solid استفاده شده است. همچنین جهت ایجاد شبکه پرتابه و پوشش دادن گوشه های کروی آن از قالب tetrahedral و برای ایجاد شبکه سطح پایه و پوشش اعمال شده بر روی آن از قالب Quadrilateral استفاده شده است. همچنین جهت تعریف تماس بین گوی و سطح از LS Surface to surface-Automatic و جهت تعریف تماس بین سطح پایه و پوشش مسیر LS DYNA options-Contact-Define Contact LS DYNA options-Contact-Define Contact- Surface to surface-TSTS استفاده شده است. همچنین برای اینکه در آزمایش برخورد مقدار جابجایی به صورت واقعی نمایش داده شود، قطعه از چهار طرف مقید گردیده است. سپس سرعت پرتابه و زمان حل اعمال و نتایج بدست آمده است.



شکل ۱ مدل سازی انجام شده در نرم افزار انسیس

آزمایش تجربی

مواد و تجهیزات

در این پژوهش از فولاد ضدزنگ ۳۰۴ استفاده شده است.

آماده سازی نمونه ها

به منظور انجام فرایند پاشش حرارتی و تعیین خواص مکانیکی مورد نظر، نمونه ها طبق استاندارد در ابعاد $۱۴۶ \times ۴۸ \times ۲/۵$ میلی متر با درصد افزایش ۹۲/۳٪ با استفاده از دستگاه برش لیزری از ورق ۲/۵ میلی متر تهیه شدند.

بر روی حالت خودکار درب اتاقک بسته شد و ابتدا شیر اکسیژن ورودی و ازت را باز و پودر درون دستگاه پاشش پودر (Feed Powder) ریخته شد. قبل از شروع فرآیند پاشش، تفنگ پاشش را پاک‌سازی و با زدن دکمه تزریق پودر و شروع فرآیند پاشش به صورت خودکار انجام می‌شود. تمامی شرایط نظیر نسبت سوخت، آب ورودی و خروجی به تفنگ پاشش و غیره را در لحظه می‌توان مشاهده و ثبت نمود. همچنین اگر دمای قطعه کار در پاس اول بیشتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس باشد باعث ایجاد تخلخل زیاد می‌گردد و باید فرآیند پاشش قطع گردد. بعد از هر مرحله پاشش بلافاصله با استفاده از ترمومتر دستی دمای قطعه اندازه‌گیری شده و بعد از سرد شدن با استفاده از کولیس ضخامت پوشش اندازه‌گیری می‌شود. توجه شود که دمای قطعه در هنگام خنک کاری نباید کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس شود. زیرا مقدار مصرف پودر را برای پاس‌های بعدی افزایش می‌دهد و ممکن است تخلخل ایجاد شود. میزان تخلخل مجاز متناسب با استاندارد مورد استفاده نباید بیشتر شود.

نحوه و انتخاب شرایط پاشش

در این پژوهش با توجه به قابلیت دستگاه‌ها و تجارب عملی کاربر آزمایشگاه، شرایط آزمایش انتخاب و چهار شرط به عنوان شرایط بررسی همزمان انتخاب گردید. سپس به منظور بررسی فاصله پاشش و تأثیر زاویه پاشش به صورت منفرد بر روی میزان چقرمگی، با در نظر گرفتن شرایط یکسان و در دو زاویه مختلف و دو فاصله مختلف پاشش انجام شد [13].

در تمامی مراحل فشار هوا ۵ bar و فشار اکسیژن ۶/۸ bar در نظر گرفته شد.

ابتدا با توجه به محدودیت اندازه نمونه‌ها و محفظه میکروسکوپ، نمونه‌ها توسط دستگاه وایر کات (Wire cut) برش داده شده‌اند [13]. به منظور آماده‌سازی، روش‌های صیقلی و حکاکی متالوگرافی برای مواد هادی الکتریسته کافی هستند. مواد غیرهادی معمولاً با لایه نازکی از کربن، طلا یا آلیاژهای طلا پوشش داده می‌شوند. در نمونه‌هایی که دارای پوشش هستند با توجه به نوع فرآیند پاشش حرارتی، تخلخل ایجاد شده در نمونه‌ها متفاوت است. اساساً در فرایندهای پاشش حرارتی میزان تخلخل نسبت به سایر روش‌های پوشش‌دهی بالاست. به همین دلیل در هنگام بررسی چقرمگی شکست با توجه به اینکه شکل

سپس قبل از عملیات پوشش‌دهی و به منظور ایجاد قفل‌شدگی مکانیکی لازم بین ذرات پاشش شده و سطح پایه، بر روی سطح نمونه‌ها باید به اندازه کافی زبری سطح R_a مناسب ایجاد گردد و سطح نمونه‌های مونتاژ شده را جهت فرآیند پوشش دهی متالورژیکی آماده کرد. تا فرآیندهایی نظیر نفوذ، جوش خوردگی سطوح و چسبندگی مناسب ایجاد گردند و ذرات پوشش داده‌شده درون پستی و بلندی‌های ایجاد شده قرار گیرند. در نتیجه چسبندگی مناسب ایجاد نمایند. [12] برای این هدف، از دستگاه بلاست دستی استفاده شده است. یک نازل پاشش درون دستگاه وجود دارد که فشار هوای فشرده را روی ۵ تا ۶ بار قرار داده و ذرات اکسید آلومینیوم با دانه‌بندی ۲۴-۲۰ میکرون از درون نازل بر روی سطح قطعه پاشش می‌شوند. سپس سطح آماده‌سازی شده و قبل از انجام پاشش با استفاده از نازل کمپرسور هوا برای ایجاد سطح قطعه عاری از هرگونه گرد و خاک باشد تمیزکاری صورت می‌گیرد.



شکل ۴ دستگاه سند بلاست

فرایند پاشش

بدین منظور ابتدا برای تنظیم زاویه پاشش از یک ابزار اندازه‌گیری زاویه استفاده گردید. سپس از تنظیم‌کننده شعله پرتاب گر که طول آن ۳۶ سانتی‌متر است و همراه با برل دستگاه که با توجه نوع پودر متفاوت است (در این پژوهش از برل با طول ۸ سانتی‌متر) استفاده شده است. فاصله پرتاب گر تا قطعه متناسب با شرایط مدنظر تنظیم گردید. سپس با کد نویسی سرعت پرتاب گر و تنظیمات مربوط به پاشش و تعداد پاس‌های پاشش تنظیم و یک مرحله به صورت دستی نحوه پاشش بررسی شد. با تنظیم

استفاده نمی‌شوند. که در این پژوهش از پودر با کد تولید ۴۲۰۰۶ و مقدار سختی HRC ۴۰-۴۶ با دانه‌بندی ۲۰ تا ۵۳ میکرون استفاده گردید.

جدول ۱ خصوصیات پاشش

شماره آزمایش	فاصله پاشش	زاویه پاشش (درجه)	سرعت پرتاب گر
۱	۳۵	۳۰	۱/۵
۲	۳۰	۰	۱/۵
۳	۴۰	۴۰	۱/۳
۴	۲۰	۱۵	۱
۵	۲۰	۳۰	۲
۶	۳۵	۳۰	۲
۷	۲۰	۴۰	۲
۸	۲۰	۱۰	۲

نتایج

بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها و ثابت نمودن آن‌ها به وسیله گیره بر روی میز درون محفظه آکوستیک، فرآیند پاشش انجام شد. با توجه به مقدار حرارت و رنگ قطعه در هنگام پاشش برای جلوگیری از خمش نمونه‌ها در اثر حرارت زیاد جذب شده توسط نمونه‌ها و با توجه به شرایط مختلف در نظر گرفته شده برای آزمایش‌ها، نتایج مربوط به پاشش در جداول (۲) تا (۷) ارائه شده است.

جدول ۲ عناصر تشکیل دهنده پودر استلایت ۶

عصر	Co	Mo	C	Fe	Si	Mn	Ni	W	Cr
درصد وزنی	Bal	۱/۵	۱/۲	۳	۱/۵	۱	۳	۴/۵	۲۹

جدول ۳ نتایج مربوط به شرایط آزمایش شماره ۱

تعداد پاس	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱-۲	۱۰۰	۲۵
۳	۱۶۰	۴۷
۴	۱۵۸	۶۰
۵-۶	۱۴۰	۱۰۰-۱۳۰

حاصل از میکروسختی جهت بدست آوردن متغیر چقرمگی مهم است ممکن است در اثر برخورد میکرو سختی در اطراف تخلخل‌ها شکل مناسبی مشاهده نگردد. لذا بدین منظور ابتدا نمونه‌ها در آزمایشگاه متالورژی رازی با استفاده از پوشش طلا آماده‌سازی شده است.



شکل ۵ پوشش دهی نمونه‌ها با طلا

در این پژوهش از پودر با نام تجاری استلایت ۶ به عنوان یکی از آلیاژهای پایه کبالت تحت شرایط سرعت بالا به عنوان پوشش استفاده شد. پودرهای استلایت ۶ به دلیل وجود موادی همچون کروم و کبالت مقاومت به خوردگی و سایش بالایی دارند. این پودرها با توجه به نحوه استفاده در اندازه‌های مختلفی در بازار عرضه می‌شوند که محققان و صنعتگران با توجه به محیط کارکرد قطعه و شرایطی که از تحلیل‌ها و محاسبات مهندسی برای سازه‌ها و قطعات به دست می‌آورند، برای ایجاد خواص دلخواه از آن‌ها استفاده می‌نمایند. برخی از ویژگی‌های این پودر در جدول (۱) ارائه شده است. اندازه پودر در تعیین روش پوشش دهی مؤثر است. به همین منظور برای انجام فرآیند از روش اسپری سوخت و اکسیژن با سرعت زیاد HVOF که یکی از پیشرفته ترین روش‌های پاشش می باشد، استفاده شده است. در این روش پودر با اندازه متغیر بین ۲۰ میکرون تا ۵۳ میکرون را با سرعت ۱۲۰۰ متر بر ثانیه بر روی سطح پاشش می شود که در فرایند پاشش، ترکیب دانه‌بندی ریز و درشت باعث چسبندگی بهتر در این پوشش خواهد شد. پودرهای با اندازه بزرگ‌تر به دلیل آسیب رساندن به تفنگ دستگاه پاشش و اینکه ذرات در حین فرایند پاشش ممکن است به ۷۵٪ نقطه ذوب خود نرسند و به دلیل عدم ذوب مناسب ذرات، پوشش مناسبی به دست نیاید به تنهایی

پاشش در پاس‌های کاری بیشتر انجام شود. اما به دلیل افزایش فاصله پاشش، دمای قطعه امکان ایجاد سه مرحله پاشش به صورت هم‌زمان را ایجاد می‌کند، که در این سه مرحله مقدار پاشش در محدوده دو آزمایش شماره ۱ و ۲ است. که نشان‌دهنده تأثیر سرعت پرتاب‌گر بر فرآیندهای پاشش حرارتی است. با توجه به این نکته که هزینه کار کردن با دستگاه‌های پاشش حرارتی به نوع سوخت، قیمت بالای دستگاه، نیروی انسانی، هدر رفت پودر و ... بستگی دارد، زمان انجام پاشش حرارت در این آزمایش از سایر روش‌ها کمتر است.

جدول ۶ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۴

تعداد پاس	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱	۱۳۰	۴۰
۲-۳	۲۲۰	۹۰-۱۰۰

در آزمایش شماره ۴ به دلیل فاصله بسیار کم پاشش نسبت به سایر روش‌ها در اولین پاس‌کاری دمای نمونه به بالاترین حد خود رسیده و امکان استفاده از پاس‌های بعدی به دلیل تغییر شکل دادن ورق نبود. به همین دلیل بعد از سرد شدن تا محدوده دمای ۴۰ درجه سلسیوس، دوباره فرآیند پاشش انجام شده و به همین دلیل دمای نمونه بعد از اتمام پاس ۳ به حدود ۲۲۰ درجه سلسیوس رسیده است. این حالت از نمونه آزمایش شماره ۳ که هر ۳ پاس به صورت هم‌زمان انجام شده نیز بیشتر است.

جدول ۷ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۵-۶

ضخامت پوشش	دمای پاس	تعداد پاس	
۵۲	۲۴۳	۳	زاویه ۱
۷۳	۳۰۰	۳	زاویه ۲

این آزمایش در شرایط کاملاً یکسان و با دو زاویه متفاوت انجام شده است و نشان‌دهنده این است که با اعمال ۳ پاس بر روی هر کدام از نمونه‌ها به دلیل زاویه کمتر در نمونه آزمایش با زاویه شماره ۲ مقدار دما بسیار بیشتر از نمونه شماره ۱ است.

در آزمایش شمار ۱ با توجه به شرایط آزمایش نمونه‌ها در هر مرحله از حرکت ربات که از قسمت بالای قطعه شروع به حرکت و تا انتهای قطعه رسیده و به اندازه ۴ میلی‌متر پایین‌تر رفته و دوباره در جهت عکس عملیات پاشش را انجام داده به طور متوسط در هر مرحله ۳۲/۵ میکرون را در ۶ مرحله حرکت ربات که پاس کاری نامیده می‌شود را لایه نشانی کرده است. با توجه به نتایج تجربی کار با دستگاه پاشش حرارتی (HVOF)، در هر پاس کاری باید حدود ۲۵ میکرون پاشش شود که پس از انجام ۶ مرحله باید حدود ۱۵۰ میکرون پاشش شده باشد. دلیل این اختلاف با توجه به اینکه در ۴ پاس کاری اول به طور متوسط بین ۱۵ میکرون لایه نشانی انجام شده است. به دلیل دمای بالای قطعه و تخلخل ذاتی نمونه‌های پوشش در پاس‌کاری ۵-۶ در حدود ۷۰ میکرون لایه نشانی می‌شود؛ که نشان‌دهنده‌ی این است، که با افزایش دمای قطعه مقدار لایه نشانی افزایش یافته، اما ساختارهای متخلخل ایجاد می‌نماید.

جدول ۴ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۲

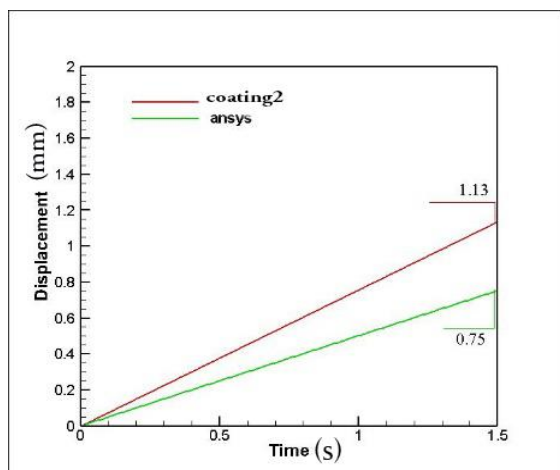
تعداد پاس	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱-۲	۱۷۰	۶۰-۶۵
۳-۴	۱۷۳	۹۰-۱۳۰

به دلیل زاویه عمود پاشش بر سطح نمونه‌ها و فاصله پاشش کمتر نسبت به آزمایش شماره ۱ در ۴ پاس‌کاری به صورت دو مرحله هم‌زمان مقدار پاشش مشابه حالت آزمایش شماره ۱ است. که نتیجه می‌شود هر چه زاویه پاشش به حالت عمود نزدیک‌تر باشد مقدار لایه نشانی افزایش می‌یابد. و به دلیل نزدیک‌تر شدن فاصله پاشش دمای نمونه نسبت به آزمایش شماره ۱ افزایش پیدا کرده است.

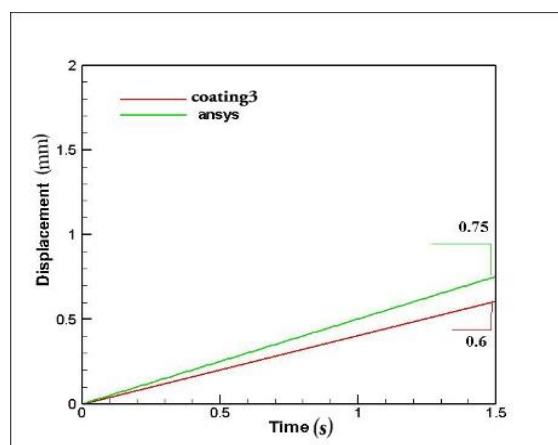
جدول ۵ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۳

پاس پوشش	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱-۲-۳	۱۸۰	۱۱۰-۱۱۵

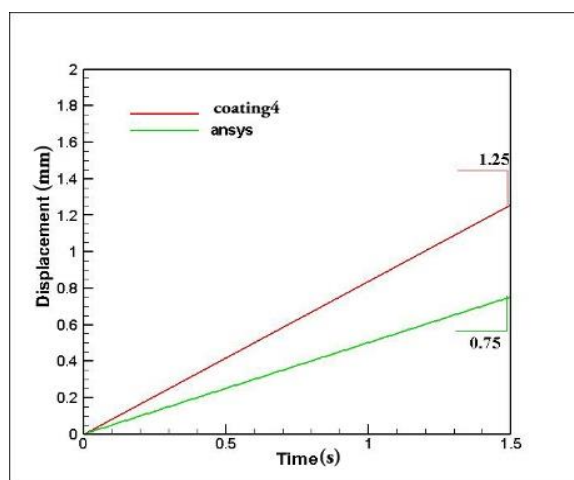
در آزمایش شماره ۳ به دلیل افزایش زاویه پاشش باید مقدار



شکل ۷ آزمایش ضربه نمونه ۲، فاصله پاشش ۳۵cm، زاویه پاشش صفر درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۵



شکل ۸ آزمایش ضربه نمونه ۳، فاصله پاشش ۴۰cm، زاویه پاشش ۴۰ درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۳



شکل ۹ آزمایش ضربه نمونه ۴، فاصله پاشش ۲۰cm، زاویه پاشش ۱۵ درجه، سرعت تفنگ پاشش

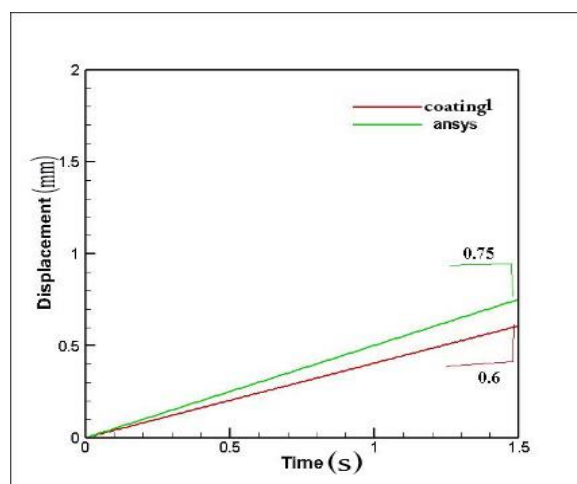
جدول ۸ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۷-۸

فاصله مختلف	تعداد پاس	دمای پاس	ضخامت پوشش
فاصله ۱	۳	۲۰۰	۶۵
فاصله ۲	۳	۲۷۸/۵	۱۰۰

این آزمایش در شرایط کاملاً یکسان با دو فاصله متفاوت با اعمال ۳ پاس کاری انجام شد. که نشان دهنده افزایش دما در نمونه آزمایش با فاصله کمتر است. همچنین مقدار لایه نشانی نیز با کمتر شدن فاصله افزایش یافته است. اما به دلیل افزایش دما، سطوح متخلخل تری نسبت به نمونه شماره ۱ ایجاد می نماید. که در محیط های خورنده مواد درون حفره ها قرار گرفته و کارایی قطعه و میزان عمر پوشش را کاهش می دهد.

آزمایش ضربه در ارتفاع ۱ متر

از دستگاه تست سقوط وزنه موجود در آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه ولی عصر رفسنجان برای انجام این آزمایش استفاده گردید. عملکرد این دستگاه بر پایه دو حسگر جابجایی و نیروسنج تماسی است. که حسگر نیروسنج تماسی از جنس پیزو الکتریک و امکان تحمل ضربه تا ۱۲۰۰ کیلو نیوتن را دارد. همچنین سنسور جابجایی نیز قابلیت ذخیره ۸۰۰ داده را در حین انجام تست دارد که با توجه به نوع فیکسچرهای دستگاه می توان از قطعات در ابعاد ۱۰*۱۰ تا ۲۵*۲۵ با شرایط مرزی چهار طرف گیردار استفاده نمود.



شکل ۶ آزمایش ضربه نمونه ۱، فاصله پاشش ۳۵cm، زاویه پاشش ۳۰ درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۵

جدول ۹ نتایج سختی برای نمونه با شرایط یکسان و فواصل مختلف

نام آزمایش	عدد سختی در نقاط اندازه‌گیری شده (HV)			سختی میانگین
فاصله پاشش ۳۵ cm	۷۷۸	۸۰۷	۸۲۵	۸۰۳
فاصله پاشش ۲۵ cm	۶۷۳	۷۰۵	۶۹۵	۶۹۱

از نتایج بالا نتیجه می‌شود در شرایط یکسان با افزایش فاصله پاشش مقدار سختی پوشش افزایش یافته است از آنجایی که در فرآیندهای پاشش حرارتی دمای جذب‌شده توسط سطح زیر لایه در میزان تخلخل و سختی سطح بسیار مؤثر است. هر چه فاصله پاشش کمتر باشد میزان دمای جذب‌شده توسط قطعه افزایش می‌یابد. در نتیجه مقدار سختی کمتری نسبت به حالت با فاصله بیشتر دارد.

جدول ۱۰ نتایج پاشش در زاویه‌های متفاوت

نام آزمایش	عدد سختی در نقاط اندازه‌گیری شده (HV)			سختی میانگین
زاویه پاشش ۴۰ درجه	۸۴۰	۸۱۹	۸۲۷	۸۲۹
زاویه پاشش ۱۰ درجه	۷۶۴	۷۶۴	۷۲۹	۷۵۲

از مقایسه نتایج پاشش در زاویه‌های متفاوت نتیجه می‌شود، با افزایش زاویه پاشش مقدار سختی پوشش نیز افزایش می‌یابد. هر چه زاویه پاشش بیشتر باشد ضخامت پوشش اعمال‌شده کمتر می‌شود و لایه نشانی در پاس‌های کاری بیشتر انجام می‌شود.

نتایج چقرمگی شکست

با استفاده از نتایج میکروسختی و در اختیار داشتن طول ترک، با کمک رابطه زیر مقادیر چقرمگی شکست برای نمونه‌ها تعیین می‌شود [14].

$$K_{IC} = 0.016 \left[\frac{E}{H} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{P}{C^2} \right] \quad (1)$$

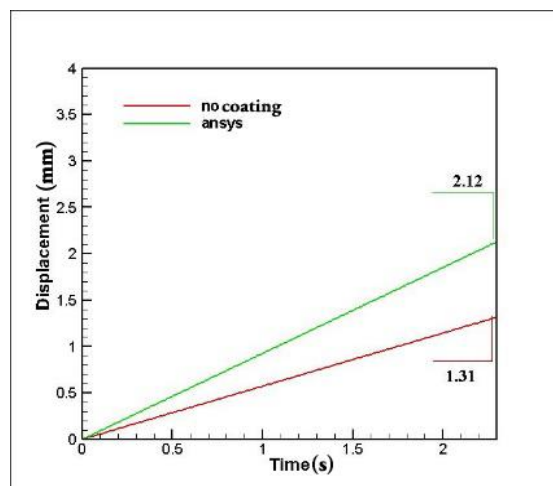
L: مقدار طول ترک از انتهای نقطه اثر

A: مرکز فرورونده تا انتهای نقطه اثر

C: فاصله مرکز فرورونده تا انتهای ترک

E: مدول الاستیسته پوشش

H: سختی پوشش



شکل ۱۰ آزمایش نمونه بدون پوشش ۱

آزمایش سختی

آزمایش سختی سنجی به منظور بررسی سختی پوشش‌های اعمال‌شده در شرایط دمایی ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۴۱٪ انجام شد. به منظور استخراج دقیق مقدار سختی مطابق با استاندارد بر روی هر نمونه در ۳ نقطه با فاصله ذکر شده در استاندارد مقادیر سختی به دست آمده سپس برای هر نمونه مقدار سختی میانگین به عنوان سختی پوشش به دست آمده است.

جدول ۸ نتایج آزمایش سختی در بررسی شرایط پاشش به صورت هم‌زمان

شماره آزمایش	عدد سختی در نقاط اندازه‌گیری شده (HV)			سختی میانگین
آزمایش ۱	۷۱۰	۷۰۸	۷۱۲	۷۱۰
آزمایش ۲	۶۹۰	۷۰۳	۷۱۱	۷۰۱
آزمایش ۳	۸۵۶	۸۱۶	۸۰۷	۸۲۶
آزمایش ۴	۸۰۸	۸۵۹	۷۸۰	۷۸۲

نتایج آزمایش سختی بر روی پوشش‌ها نشان می‌دهد، که نمونه با شرایط پاشش شماره ۳ بیشتر مقدار سختی و نمونه با شرایط پاشش شماره ۲ کم‌ترین مقدار سختی را دارد که نشان‌دهنده این است با افزایش مقدار زاویه پاشش و فاصله پاشش و کاهش سرعت تفنگ پاشش، نمونه‌های با سختی بیشتر می‌توان به دست آورد. همچنین با مقایسه آزمایش با شرایط پاشش ۱ و ۴ نتیجه می‌شود که، سرعت تفنگ انفجاری مهم‌ترین عامل افزایش سختی است.

جدول ۱۳ تاثیر زاویه پاشش بر چقرمگی شکست

K _c	H	E	C	A	L	زاویه پاشش
۱۳۹	۸۲۹	۲۱۳	۱۴/۷۶۱	۶/۹۳۱	۷/۸۳	۴۰
۹۸	۷۵۲	۲۱۳	۱۹/۶۶	۹/۵۲۷	۱۰/۱۳۳	۱۰

نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی عوامل مختلف بر کیفیت پوشش سطح در روش پاشش حرارتی و تاثیر آنها بر مقدار چقرمگی سطح بررسی شد. در پایان نتایج زیر قابل بیان است:

۱. نتایج آزمایش ضربه نشان می‌دهد با توجه به اینکه از این پوشش‌ها در برابر عواملی همچون خوردگی، سایش استفاده شده است، برای قطعاتی که در محیط‌های تحت ضربه قرار دارند و نیاز به پوشش دهی دارند توجه به نوع پوشش و شرایط پوشش دهی می‌تواند مقاومت به ضربه‌های بهینه و در نتیجه افزایش عمر پوشش را به همراه داشته باشد.

۲. نتیجه می‌شود با افزایش زاویه پاشش مقدار چقرمگی شکست ۴۲٪ افزایش می‌یابد.

۳. با افزایش فاصله پاشش مقدار چقرمگی شکست ۸٪ کاهش می‌یابد.

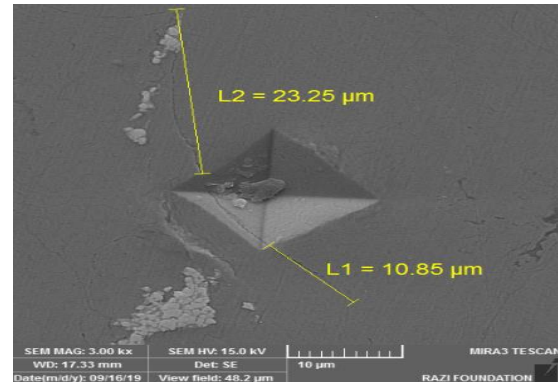
۴. در حالت بیشترین مقدار فاصله ۴۰ سانتی‌متر و زاویه پاشش ۴۰ درجه میزان مصرف پودر و زمان کار با دستگاه با توجه به افزایش مراحل پاشش بیشترین مقدار است و مقدار چقرمگی شکست ۲۱۷ در این حالت به دست آمده است.

واژه نامه

پیشنهادی ویراستار	واژه لاتین	پیشنهادی نویسنده
	Fracture toughness	چقرمگی شکست
	Finite element	اجزای محدود
	Valves	شیر آلات
	Coating adhesion	چسبندگی پوشش
افشانک پلازما	Plasma spray	اسپری پلازما

K_c: چقرمگی شکست

جهت بدست آوردن متغیر طول ترک (C) از میکروسکوپ الکترونی روشی استفاده شده و همچنین جهت مشخص نمودن مقدار دقیق طول ترک از نرم افزار دیجی مایزر بر پایه پردازش تصویر استفاده گردیده است.



شکل ۱۱ ترک های سطحی نمونه ها

یکی از علل عدم کارایی مناسب پوشش‌ها وجود تخلخل در نمونه است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است میزان تخلخل نمونه بسیار زیاد است از طرف دیگر ذوب ناقص ذرات نیز باعث ایجاد پوشش‌های متخلخل می‌گردد و این تخلخل‌ها در هنگام فعالیت قطعات محل قرارگیری مواد خورنده هستند و باعث کاهش عمر قطعات می‌گردند.

جدول ۱۱ چقرمگی شکست

شماره آزمایش	K _c	H	E	C	A	L
۱	۱۶۳	۷۱۰	۲۱۳	۱۴/۰۵	۸/۵۸	۵/۴۷۲
۲	۱۶۸	۷۰۱	۲۱۳	۱۳/۸۱	۸/۱۵	۵/۶۶
۳	۲۱۷	۸۲۶	۲۱۳	۱۱/۰۲	۵/۷۲	۵/۳۰۵
۴	۱۸۱	۷۸۲	۲۱۳	۱۲/۶۵	۷/۷۷	۴/۸۸۱

جدول ۱۲ تاثیر فاصله پاشش بر چقرمگی شکست

فاصله پاشش	K _c	H	E	C	A	L
۳۵	۱۶۹	۸۰۳	۲۱۳	۱۳/۱۳۹	۵/۹۰۵	۷/۲۳۴
۲۵	۱۸۲	۶۹۱	۲۱۳	۹/۹۷۶	۵/۳۳۷	۴/۶۳۹

	Acoustic enclosure	محفظه آکوستیک
یا "کارگیر" یا "گیراوار"	Fixture	فیکسچر
سوختیژن کوتاه شده سوخت و اکسیژن	High velocity oxy-fuel spraying HVOF	اسپری سوخت و اکسیژن با سرعت زیاد

تقدیر و تشکر

آزمون فروشدگی	Penetration test	تست فرو رونده
مدول یانگ؛ پیمون یانگ	Youngs moduls	مدول الاستیک
	Charpy impact test	آزمون ضربه شاریپی
ماشین شن پاش	Blast machine	دستگاه بلاست
	Feed powder	دستگاه پاشش پودر
	Thermometer	ترمومتر
"سیمبری"	Wire cut	دستگاه وایر کات

مراجع

- [1] "Drilling Industry Magazine," no 12 and 13, p. 164, 2017.
- [2] Saini, H. D. Kumar and V. N. Shukla, "Hot Corrosion behaviour of Nanostructured Cermet based Coatings Deposited by Different Thermal Spray Techniques: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.055>
- [3] J. A. Joyce , D. Wells, B. Stoltz, L. Shelton, P. Jacobs and R. E. Link, "Evaluating the Fracture Toughness of Layered Pressure Vessel Steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 207, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.039>
- [4] F. Fanicchia, X. Maeder, J. Ast, A. A. Taylor, Y. Guo, M. N. Polyakov, J. Michler and D. A. Axinte "Residual stress and adhesion of thermal spray coatings: Microscopic view by solidification and crystallisation analysis in the epitaxial CoNiCrAlY single splat," *Materials & Design*, vol. 153, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.040>
- [5] P. Lin, J. Guan, H. Peng and J. Shi, "Horizontal cracking and crack repair analysis of a super high arch dam based on fracture toughness," *Engineering Failure Analysis*, vol. 97, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.036>
- [6] H. F. Li, Q. Q. Duan, P. Zhang, X. H. Zhou, B. Wang and Z. F. Zhang "The quantitative relationship between fracture toughness and impact toughness in high-strength steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 211, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.03.003>
- [7] E. PourSaidi and M. KhoshNejhad, "Investigation and determination of changes in mechanical properties of plasma spray heat-resistant coatings under thermal loading using the indentation test method," Master Thesis, Zanjan Univesrity, Iran, 2017.
- [8] M. E. Alami, S. Feli and Gh. Sarifi, " Modeling the impact of molten particles on the substrate," Master Thesis, Razi Univesrity, Iran, 2012.

- [9] S. Mansouri, S. Mirzaei, M. Shariati and N. Ziari, "Evaluation of the accuracy of different methods for measuring rock fracture toughness in tension and shear conditions using laboratory studies and numerical modeling," Master Thesis, Shahrood Univesrity, Iran, 2013.
- [10] S. H. Hashemi, M. KimiaBakhsh and M. Rezai Yekta, "Experimental and numerical determination of fracture toughness using Charpy impact test data in API X65 grade gas transmission pipe steel," ISME 2011. <https://doi.org/10.22060/mej.2013.316>
- [11] F. Ashna Ghasemi, F. Ali Gholi Zade and A. Poor Kamali, "Experimental Investigation of the Effect of Temperature on the Low Velocity Impact Response of Grooved Aluminum Plates Repaired by Metal Laminated Composite Adhesives (FML)," *Modares Mechanical Engineering Journal*, vol. 14, no. 9, 2014.
- [12] R. Ahadi, H. Harati Zadeh and M. Mohammadi, "Investigation of mechanical properties and abrasion resistance of titanium-based ceramic nanocoatings," Master Thesis, Shahrood Univesrity, Iran, 2019.
- [13] S. Matthews, and L.M. Berger, "Inter-diffusion between thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings and an Alloy 625 substrate during long-term exposure at 500 °C, 700 °C and 900 °C," *Journal of Alloys and Compounds*, vol 770. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.189>
- [14] S. Nouroozi, R. Moharrami, H.R. Salimi and M. Jalali, "Evaluation of the effect of effective parameters of HVOF thermal spraying process on residual stress and bond strength of WC-12Co coating ," Master Thesis, Nooshirvani Babol Univesrity, Iran, 2013.

