ماهنامه علمی بژوهشی مهندسی مکانیک مدرس



mme modares ac ir

بازیابی سطوح تخریبی اتصال تداخلی شفت و یاتاقان با استفاده از آبکاری کروم سخت

رحمن سيفي^{1*}، كاوه عياسي²

1 - دانشیار ، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان 2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* همدان،صندوق پستى rseifi@basu.ac.ir 65175-4161

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل دريافت: 18 خرداد 1395 پذيرش: 14 مرداد 1395 ارائه در سایت: 21 شهریور 1395 کلید واژگان: اتصال تداخلى تحليل اجزاء محدود استحكام استخراج أبكارى كروم سخت

اتصالات تداخلی برای برقراری اتصال بوش به شفت در صنعت کاربرد زیادی داشته و اغلب در محل وجود تکیهگاهها و یاتاقانهای ماشینها از این نوع اتصالات برای حمل بار اجزاء ماشین استفاده میگردد. معمولاً برای انجام تعمیرات ماشینها فرآیند دمونتاژ نمودن بوش و شفت به دفعات انجام می گیرد. بسته به میزان زبری و کیفیت سطح اجزاء اتصال، ممکن است در زمان فرآیند تخریب در سطح قطعات رخ دهد. قطعه بوش معمولاً از نوع مصرفی است، اما قطعه شفت معمولاً قطعهای یکپارچه و طویل است که دیگر اجزاء ماشین بر روی آن سوار میگردند. بنابزاین ارائه روشی برای ترمیم سطح شفت میتواند بسیار ضروری و مفید باشد و منجر به بازیابی شفتهای تخریب شده و کاهش هزینهها گردد. در این پژوهش ابتدا تأثیر زبری سطح تداخل بر روی استحکام اتصال، ضریب اصطکاک در سطح تداخل و تخریب سطح اتصال، در حین فرایند دمونتاژ نمودن بررسی شده است. تحلیل اجزاء محدود و بررسیهای تجربی، برای تخمین ضریب اصطکاک در سطح اتصال، انجام گرفته است. همچنین برای بررسی میزان تخریب در سطح تداخل و در حین دمونتاژ نمودن اجزاء اتصال از تصاویر بزرگنمایی شده سطح تداخل پس از دمونتاژ نمودن اتصال استفاده شده است. در ادامه روش آبکاری کروم سخت برای ترمیم سطح شفت پیشنهاد گردید و به صورت تجربی تأثیر آبکاری کروم سخت بر روی استحکام اتصال بررسی شده است. نتایج نشان دهنده استفاده موفق از آبکاری کروم سخت برای ترمیم سطح شفت است به نحوى كه استحكام اتصال در قطعات ترميم شده معادل و حتى بيش از اتصال اوليه بود.

Restoring scraped surfaces of shaft and bearing in interference fit joints by hard chromium plating

Rahman Seifi*, Kaveh Abbasi

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran * P.O.B 65175-4161, Hamedan, Iran, rseifi@basu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 07 June 2016 Accepted 04 August 2016 Available Online 11 September 2016

Keywords: Interference fit joint Finite element analysis Extraction strength Hard chromium plating

S. 15

ABSTRACT

Interference fitting is widely used in the industry for connecting shafts and bushes. These types of joints are widely used as support of bearing machine parts. Rrepeated disassembling of shaft and bush interference fit, performed to repair and maintenance of machine parts, may cause serious damage to surface of joint parts depending on the roughness and surface quality of the contact surface of joint parts. Bushes are usually expendable parts, but the shaft parts are long integrated and complex parts which support other components of a machine. So providing a way to repair the shaft surface can be considered crucial and leads to restoration of damaged shaft and reduced costs. In this study, the effect of interference surface roughness on strength, friction coefficient of the contact surface and surface damage of interference fit joints during the disassembling procedure have been investigated. Finite element and experimental analysis were performed to estimate friction coefficient in contact surface of joint parts. Also, magnified pictures of contact surfaces were applied to evaluate the extent of damage in contact surface after disassembling of joints parts. Hard chromium plating was proposed to repair the shaft surface and the effect of hard chromium plating on strength of shaft and bush joints was measured experimentally. The results confirm successful use of hard chrome plating in repairing the shaft surface so that the strength of restored shaft joints was equal and in some instances even more than the initial

1-مقدمه

نگرانیهای مربوط به بالانس اجزا دوار در تجهیزات مکانیکی میگردد. روش سنتی برای محاسبه میدان تنش در سطح تداخل اتصالات تداخلی مبتنی بر حل ارائه شده لامه برای استوانههای جدار ضخیم و با فرض قطعات متقارن محوری بدون عیوب سطح است [1]. با استفاده از مقادیر تنش های عمود بر سطح، مقدار نیروهای عمود بر سطح تداخل نیز قابل محاسبه است. همچنین با استفاده از مقادیر پیشفرض برای ضریب اصطکاک در سطح تداخل و مقدار

اتصالات تداخلی به صورت گسترده در صنعت برای ایجاد اتصالی محکم و متعادل بین شفت و بوش مورد استفاده قرار می گیرند. چنین اتصالاتی نیروها و تنشهای تماسی بین سطوح ارائه میدهند و امکان انتقال نیرو و گشتاور را فراهم میآورند. اتصالات تداخلی میتوانند برای تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار گیرند. وجود این اتصالات باعث کم شدن

Please cite this article using: R. Seifi, K. Abbasi, Restoring scraped surfaces of shaft and bearing in interference fit joints by hard chromium plating, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 57-64, 2016 (in Persian)

حكيده

نیروی عمودی در سطح تداخل، ظرفیت انتقال گشتاور این اتصالات را نیز می توان تخمین زد [2]. بوکر و همکارانش تلاش نمودند تا اعتبار حل لامه برای تخمین فشار تداخل و ظرفیت انتقال گشتاور اتصال را بررسی نمایند [3]. اسنیزک و همکاران [4] تلاش نمودند تا ظرفیت انتقال گشتاور اتصالات تداخلی را با استفاده از روش اجزا محدود پیش بینی کنند.

روشن است که مقدار ضریب اصطکاک در سطح تداخل میتواند بر استحکام اتصال تداخلی تأثیر مستقیم بگذارد. در اغلب پژوهشهای پیشین مقدار این ضریب با توجه به تجربیات قبلی و بدون توجه به فرآیند تولید و کیفیت سطح تولید در محاسبات لحاظ می گردد [5]. یکی از عوامل مؤثر بر مقدار ضریب اصطکاک و استحکام اتصال، زبری سطح تداخل است. در بسیاری از پژوهشهای پیشین تلاش شده است تا تأثیر زبری سطح بر روی استحکام اتصال مورد بررسی قرار گیرد [6-8]. در تمامی این پژوهشها و اکثر پژوهشهای مشابه مقدار ضریب اصطکاک با توجه به تجربیات گذشته و اکثر پژوهشهای مشابه مقدار ضریب اصطکاک با توجه به تجربیات گذشته و بدون توجه به کیفیت سطح در محاسبات لحاظ شده است. در این پژوهشها محاسبات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر بسیاری از پژوهشگرها، اثر زبری محاسبات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر بسیاری از پژوهشگرها، اثر زبری محاسبات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر بسیاری از پژوهشگرها، اثر زبری محاسبات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر بسیاری از پژوهشگرها، اثر زبری محاسبات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر بسیاری از پژوهشگرها، اثر زبری مقدار زبری سطح تداخل، میتواند بر مقدار تخریب و سایش در سطح تداخل و درخلال فرآیند دمونتاژ کردن اتصال، تأثیر مستقیم داشته باشد.

بشورنر و همکارانش [11] با استفاده از یک مدل اجزا محدود میکروسکوپی تلاش نمودند تا تأثیر توپوگرافی سطح بر ضریب اصطکاک در سطح تماس را بررسی نمایند. همچنین کاتو [12] بیان نمود که سایش و ضریب اصطکاک حاصل پاسخ سطح تماس به شرایط تریبولوژیکی سطح است مکانیکی سطوح در تماس در نظر گرفت. یک دیدگاه جدید برای اعمال اثرات سطح در محاسبات، تغییر مقدار ضریب اصطکاک سطح تداخل با توجه به ویژگیهای آن سطوح خاص است. سیفی و عباسی [5] در پژوهش خود روشی ارائه نمودند تا بتوان ضریب اصطکاک سطح تماس اتصالات تداخلی را، دولشی ارائه نمودند تا بتوان ضریب اصطکاک سطح تماس اتصالات تداخلی را، دولشی ارائه نمودند تا بتوان ضریب اصطکاک سطح تماس اتصالات تداخلی را، دروشی ارائه نمود است سطح تر در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار داد.

آبکاری و عملیات حرارتی در سطح تماس اتصالات تداخلی میتواند باعث تغییر در شرایط و استحکام اتصال تداخلی گردد. اثر آبکاری و عملیات حرارتی در سطح تماس توسط رائو و همکارانش [13] مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر مثبت این فرآیندها بر استحکام اتصال گزارش شده است.

از سوی دیگر اتصالات در حین فرآیند تعمیرات و نگهداری صنعتی، ممکن است به کرآت دمونتاژ گردند. دمونتاژ نمودن این قطعات پس از مدتی منجر به تخریب سطوح تداخل میشود. معمولاً بخش بوش اتصالات تداخلی، عضوی مصرفی است و در خلال فرآیند تعمیرات تعویض می گردد. اما عضو شفت، در بسیاری از موارد دارای شکلی پیچیده و در برگیرنده قطعات بسیاری است. ترمیم سطح اجزا اتصال و بازیابی آنها می تواند محل بررسی های علمی بیشتر باشد.

در این پژوهش ابتدا تلاش شد تا با روش مطرح شده توسط سیفی و عباسی [5] اثر زبری بر ضریب اصطکاک سطح تماس بررسی گردد. برای نیل به این اهداف شفتهایی با دو مقدار زبری سطح معمول تولید شد. مقادیر زبری معمول، مقادیری هستند که معمولاً در فرآیند تولید سنگزنی رخ می-دهند و اغلب زبری حاصل از این روش تولید در محدوده دو مقدار مغروض

قرار میگیرد. در ادامه میزان سایش ایجاد شده در سطح تماس تداخل و درخلال فرآیند دمونتاژ نیز مورد توجه قرار گرفته است. سپس آبکاری کروم سخت، به عنوان روشی برای ترمیم تخریب سطوح تداخل استفاده شده است. تلاش شده است تا تأثیر آبکاری کروم سخت بر روی ضریب اصطکاک سطح تماس تخمین زده شود. در نهایت استفاده از این فرآیند به عنوان روشی برای بازیابی سطوح قطعات تخریب شده، توصیه میگردد.

2-ساخت اجزاء اتصال و مدلسازی هندسه دقیق آنها

در این پژوهش، ابتدا چند نمونه برای اجزاء اتصال انتخاب و تولید شد. از این قطعات برای مطالعه اثر زبری و آبکاری، بر ضریب اصطکاک و میزان سایش در سطح تداخل اتصالات تداخلی استفاده گردید. برای ساخت شفت از فولاد استاندارد AISI 4140 (VCN 150) استفاده گردید. شفتهای توپر با قطر و طول تداخل 30.03 و 30 ميلىمتر ساخته شدند. "شكل 1" نشان دهنده ابعاد و هندسه قطعات شفت است. همچنین از کنس داخلی یاتاقانهای استاندارد غلتكى به شماره استاندارد NA6906 نيز به عنوان بوش استفاده گردید. علت این انتخاب، دستیابی به مقدار خطای ساخت حداقل و نیز حداکثر اطمینان از دقت ابعادی قطعات بوش است. قطر داخلی و خارجی و طول تداخل قطعه بوش به ترتيب 30، 35 و 30 ميلىمتر است. بوشها از فولاد استاندارد AISI 52100 ساخته شدهاند. با توجه به ابعاد منتخب ميزان تداخل شعاعی اسمی در اتصال 15 میکرومتر خواهد بود. دقت ابعادی و عدم وجود عیوب فرم در قطعه بوش، پس از اندازه گیری قطر داخلی کنس داخلی ياتاقانهای غلتکی، توسط ماشين اندازهگيری سهبعدی مختصا ت اعتبارسنجی شد. نتایج اندازه گیریها با دقت 0.1 میکرون، روشن نمود که انحراف ابعادی بوش از استوانه کامل کمتر از یک میکرومتر است و میتوان هندسه آن را بدون عیب در نظر گرفت. با اطمینان از اندازه بوش و با توجه به دقت بالای تولید آنها، در تحلیلهای بعدی بوش به صورت استوانه کامل در نظر گرفته شد. "شکل 2" نمایی از فرآیند اندازه گیری ابعاد بوشها توسط ماشین اندازه گیری سهبعدی مختصات را نشان میدهد. اندازه گیری قطر داخلی بوش در 3 مقطع و در هر مقطع در 6 نقطه انجام گرفت. همچنین ترکیب شیمیایی فولادهای تشکیل دهنده شفت و بوش پس از انجام آزمایش اسپکترومتری مشخص گردید. پس از بررسی مشخص گردید که این ترکیبات مطابق با آلیاژهای استاندارد ذکر شده، می باشد. ترکیبات آلیاژهای شفت و بوش، به ترتیب، در جداول 1 و 2 ارائه گردیده است.

در ادامه نمونه تداخلی شفت با قسمت اضافی با استفاده از دستگاه تراش تولید و با سنگ محور تلرانس ابعادی دلخواه بر آن اعمال شد. این روش تولید برای ساخت قطعات شفت دقیق، کاملاً معمول میباشد. 6 عدد شفت تولید



Fig. 1 Dimension and geometry of shaft part

شکل 1 ابعاد و هندسه قطعه شفت

¹ Coordinate Measurement Machine

، آلياژ شفت	یب شیمیایے	1 ترک	جدول
-------------	------------	-------	------

Table 1 (Chemical co	omposition	n of the sh	aft								
Ti%	Cu%	Al%	Mo%	Ni%	S%	P%	Cr%	Mn%	Si%	C%	Fe %	تركيبات
0.006	0.054	0.02	0.21	0.08	0.007	0.012	1.02	0.89	0.27	0.38	پايە	درصد تركيبات آلياژ
جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ بوش Table 2 Chemical composition of the bush												

I dole I	chiefhitetai e	omposition	or the ot	ion -								
Co%	Cu%	Al%	Mo%	Ni%	S%	P%	Cr%	Mn%	Si%	C%	Fe %	تركيبات
0	0.1	0.01	0	0.02	< 0.003	0.013	1.53	0.45	0.31	0.94	پايە	درصد تركيبات آلياژ



Fig. 2 Dimension measurement of the bush by Coordinate Measurement Machine (CMM) شکل 2 اندازه گیری ابعاد بوش توسط ماشین اندازه گیری مختصات (CMM)

گردید که دو جفت آن دارای دو مقدار زبری Ra=0.16μm و Ra=0.25μm

بودند و دو مورد از شفتها به نحوی تولید شد که قطر آنها در حدود 50 میکرون پایین تر از قطر اسمی منتخب بود.

سطح شفتهای با قطر کمتر، آبکاری کروم سخت شد تا قطر آنها برابر قطر اسمی شود. این فرآیند در حقیقت مدلی از فرآیند ترمیم منتخب برای اصلاح سطوح تداخل قطعات و بازیابی قطعات تخریب شده است. در صورت انجام فرآیند آبکاری کروم سخت توسط افراد با تجربه و ماهر، امکان کنترل ابعاد حاصل با دقت بالا وجود دارد. در ادامه و با توجه به روش مطرح شده توسط سیفی و عباسی [5]، برای استحصال هندسه دقیق شفتها از ابزار اندازه گیری دقیق نوری استفاده گردید. در این گام از میان هر جفت از شفت-ها، تنها یک نمونه از آنها اسکن گردید و مدل ابر نقاط قطعه، استخراج شد. نوری مشاهده می گردد. این مدل ابر نقاط قطعه، استخراج شد. نوری مشاهده می گردد. این مدل نمونه از تعداد 104821 نقطه تشکیل شده است. همچنین در فرآیند استحصال مدل ابر نقاط با استفاده از اسکن نوری، اندز منتخب دستگاه دارای دقت اندازه گیری ابعاد تا 0.1 میکر ومتر بود.



Fig. 3 Extracted point cloud images by optic camera شکل3 مدل ابر نقاط استحصال شده از دوربین اسکن نوری

در ادامه با استفاده از نرمافزار ژئو مجیک استودیو¹ بر مدل ابر نقاط شفت و در سطح تداخل آن، صفحاتی برازش شده و فایل سهبعدی قطعه شفت ایجاد گردید. بررسی دقت حاصل از فرآیند برازش صفحات بر نقاط مدل، انحراف-های زیر یک میکرومتر را نشان داد. با توجه به این مطلب میتوان ادعا نمود که دقت ابعادی مدل حاصل از فرآیند برازش 1 میکرومتر است. مدلهای حاصل، آماده تحلیل اجزاء محدود هستند. با توجه به این که مقادیر میدان تنش در سطح تداخل تابع هندسه سطح تداخل و خواص مواد است، در مورت اعمال دقیق خواص مواد، در تحلیل اجزاء محدود، میتوان از صحت میدان تنش حاصل از تحلیل اجزاء محدود در تخمین مقادیر میدان پژوهشها نیز استفاده موفق از تحلیل اجزاء محدود در تخمین مقادیر میدان تش گزارش شده است [8,7]. تحلیل اجزاء محدود در این پژوهش با

3-اندازه گیری خواص مکانیکی شفت و بوش

با توجه به اهمیت خواص مکانیکی مواد در نتیجه تحلیلها، در این پژوهش تلاش گردید تا خواص مکانیکی شفت و بوش به صورت دقیق استخراج گردد. در حل تئوری و حل به روش اجزاء محدود، نیاز است تا خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده شفت و بوش در دسترس باشد و در روابط و نرمافزار وارد گردد. صحت خواص مکانیکی مورد استفاده در تحلیلها مستقیماً بر خروجیها تأثیر می گذارد. بنابراین بدون اطمینان از صحت این مقادیر، نمی توان با اطمینان به نتایج حاصل از حل اجزاء محدود تکیه نمود. در این راستا تست طیف-سنجی و کشش استاندارد بر روی نمونههایی از مواد شفت و بوش انجام گردید. نتایج حاصل جداول 1 و 2، پیش از این و در ادامه و در جدول 3 ارائه گردیده است.

یادآور می گردد که برای تعیین خواص مکانیکی مواد ابتدا آنالیز مواد صورت گرفت و لذا خواص مکانیکی ذکر شده در منابع مورد توجه قرار گرفت. -

در ادامه آزمایش کشش روی نمونههای استاندارد انجام شد و خواص مکانیکی استخراج گردید. مقایسه نتایج نشان داد که خواص حاصل از تست کشش تا حد زیادی مطابق با خواص مکانیکی ذکر شده در منابع برای مواد تشکیل دهنده شفت و بوش است. در ادامه کار، خواص حاصل از تستهای تجربی، مبنای بررسیهای تحلیلی و عددی قرار گرفت.

جدول 3 خواص مکانیکی اندازه گیری شده مواد شفت و بوش Table 3 Measured mechanical properties of shaft and bush materials

استحكام تسليم (MPa)	ضریب کشسانی (GPa)	ضر يب پواسون	جرم حجمی (kg/m ³)	
420	205	0.29	7850	شفت
700	210	0.3	7810	بوش

¹ Geomagic studio

همچنین برای سرهم کردن اجزاء اتصال، بدون ایجاد تخریب در سطح تداخل، شفتها در نیروژن مایع سرد گردید و بوشها نیز در یک کوره صنعتی گرم شدند و در نهایت بدون وجود نیروی خارجی قطعات سرهم شدند. با توجه به این که در فرآیند تجربی سرهم کردن اتصال، قطعات بوش گرم شدند، پیش از آنچه که در فرآیند سرهم کردن رخ می دهد قرار گرفتند و در ادامه تست آنچه که در فرآیند سرهم کردن رخ می دهد قرار گرفتند و در ادامه تست کشش بر روی نمونههای گرمادیده انجام گردید. همچنین متذکر می گردد که در هنگام انجام تست کشش بر روی قطعات، ناحیه پلاستیک نمودار تنش-کرنش نمونهها، پس از تبدیل مقادیر مهندسی به حقیقی مورد استفاده قرار گرفتند. بدین معنا که مقادیر تنش و کرنش پلاستیک نیز، جهت مدل سازی رفتار پلاستیک قطعات، در تحلیل اجزاء محدود استفاده شدند.

4-استحصال نيروى استخراج تجريي

با استفاده از ماشین تست یونیورسال سنتام¹ و فیکسچر طراحی شده، شفت-ها از بوشها خارج شده و نیروی مورد نیاز برای استخراج آنها اندازه گیری می شود. نیرو و نمودارهای حاصل را نمودار استخکام استخراج اتصالات تداخلی می نامند که معیاری پذیرفته شده و فراگیر برای سنجش استحکام اتصالات به صورت تجربی است. همان طور که بیان شد برای هر کدام از مقادیر زیری 0.16 و 20.5 میکرومتر دو نمونه ساخته شده و به همراه نمونههای آبکاری شده با کروم سخت مورد بررسی تجربی قرار گرفتند. تجهیزات مورد استفاده برای استحصال نیروی استخراج در "شکل 4" نشان داده شده است. مشابه هستند. نمودار نیروی استخراج هر جفت از قطعات با زبری متفاوت و قطعات آبکاری شده، در نمودارهای "شکلهای 5، 6 و7" نشان داده شده است.



Fig. 4 Extraction process with a fixture and universal machine test. (a) Universal testing machine. (b) Designed fixture for extraction of assembled part. (c) Assembled part and designed fixture on universal testing machine during extraction

شکل4 فرآیند استخراج با فیکسچر و ماشین تست یونیورسال. (الف) ماشین تست یونیورسال. (ب) فیسکچر طراحی شده برای استخراج اتصالات سرهم شده. (پ) قطعات سرهم شده و فیکسچر طراحی شده بر روی ماشین تست یونیورسال

¹ Santam

"شکل 5" نمودار استحکام استخراج برای دو قطعه با زبری 0.16 میکرومتر را نشان میدهد. این نمودارها مقدار استحکام استخراج برای این قطعات را درحدود 37 کیلونیوتن ثبت کردهاند.

0.25 همچنین "شکل 6" نمودار استحکام استخراج قطعات با زبری 0.25 میکرومتر را در حدود 44 کیلونیوتن نشان میدهد. در نهایت برای قطعات آبکاری شده مقدار استحکام استخراج برای دو قطعه به ترتیب حدود 38 کیلونیوتن و 42 کیلونیوتن ثبت گردید.

نکته قابل توجه در مورد نمودار مربوط به قطعات با سطح آبکاری، عدم بروز قله مشخص در نمودار استحکام استخراج این قطعات است. برای تشخیص استحکام استخراج در این قطعات، به صورت دقیق تر به روند تغییر در نرخ تغییرات نیروی استخراج با لغزش پرداخته می شود. بخش های سمت راست نمودارها، محل وقوع استحکام استخراج بر روی نمودارهای نیرو جابجایی را نشان می دهند. نقطه تغییر در شیب نمودار نیرو جابجایی، در ابتدای حرکت شفت در بوش، نشان دهنده استحکام استخراج اتصال خواهد بود. در مورد قطعات با سطح دارای آبکاری کروم، دقت بیشتر در بخش سمت راست نمودارها، دریافت تغییر شیب و استحکام استخراج را سادهتر می نماید.











Fig. 7 Experimental extraction force for two joints of the plated shafts. شكل7 نمودار نيروى استخراج تجربى اتصال دو شفت آبكارى شده.

در این بخش یک نتیجه کلی نشان می دهد که افزایش زبری در سطح تداخل قطعات می تواند منجر به افزایش استحکام استخراج اتصالات تداخلی گردد. همچنین مقایسه بین استحکام استخراج قطعات آبکاری شده با استفاده از کروم سخت، نمایانگر این مطلب است که فرآیند ترمیم، باعث حفظ استحکام استخراج در محدوده ای بینابین قطعات با زبری 0.16 و 0.25 میکرومتر است. نکته قابل ذکر دیگر این که محدوده زبری معمول حاصل، پس از عملیات سنگرزی قطعات عددی در محدوده زیر یک میکرومتر خواهد بود.

این مطلب نشان از منطقی بودن عدد زبری قطعات آزمایشی و نزدیک بودن زبری سطح آنها به موارد صنعتی و کاربردی است.

5-مدلسازی اجزاء محدود

1-5-مدلسازی تداخل اجزاء اتصال

استفاده از تحلیل اجزاء محدود برای بررسی میدان تنش در اتصالات تداخلی در بسیاری از پژوهش های پیشین مطرح بوده است. به عنوان نمونه جیانگ و همکارانش [14] اعتبار نتایج تحلیل اجزاء محدود اتصالات تداخلی را با استفاده از نتایج تجربی بررسی و تأیید نمودند. همچنین پاتیل و همکارانش [9] تلاش نمودند تا با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، اثر زبری در سطح تداخل را بر ضریب اصطکاک استاتیکی بررسی نمایند. روشن است که نتایج تحلیل اجزاء محدود بسیار وابسته به صحت پارامترهای ورودی تحلیل است. در این پژوهش نیز تلاش می گردد تا با تحلیل اجزاء محدود هندسه دقیق اجزاء اتصال تداخلی و با اعمال مقادیر دقیق خواص مکانیکی مواد، میدان تنش و نیروها در سطح تداخل محاسبه گردد. لازم به یادآوری است که اندازه گیری تجربی میدان تنش در سطح تداخل اتصالات تداخلی، هدفی سخت و حتی دور از دسترس است.

فرضیات مورد استفاده در مدلسازی تداخل اتصالات تداخلی را میتوان به صورت زیر بیان نمود.

- بوش ها به صورت قطعات استوانه ای با هندسه بدون عیب مدل شدند.
- اثرات حرارت اعمالی بر روی بوش و در خلال فرآیند سرهم کردن، در تحلیل وارد نشده است. اما در فرآیند استحصال خواص تجربی مواد تشکیل دهنده بوش، نمونههای تست کشش، پیش از آزمایش در شرایط حرارتی مشابهی قرار گرفتند. همچنین فرض گردید که تغییرات دما تأثیری بر هندسه بوش نخواهد گذاشت.
- برای مدلسازی اجزاء محدود تداخل، از تماس با لغزش کوچک استفاده گردید.
- همان طور که بیان گردید، خواص مواد، مبتنی بر تستهای تجربی اندازه گیری و به تحلیل اجزاء محدود اعمال گردید. همچنین، رفتار پلاستیک مواد، پیش از فرآیند گلویی شدن نیز، اندازه گیری و به تحلیل اعمال گردید.
- رفتار اصطکاکی در سطح تماس با مدل کولمب شبیهسازی گردید.
 فرض بر این قرار گرفت که ضریب اصطکاک مستقل از سرعت لغزش
 است. مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اولیه اجزاء محدود 0.2 در نظر
 گرفته شد.

شفت و بوش با استفاده از المانهای 10 گرهی چهاروجهی (C3D10M) شبکه بندی شدند. استقلال نتایج از اندازه شبکهبندی نیز بررسی گردید و اندازه مناسب برای شبکهبندی انتخاب شد. لازم به یادآوری است که قسمت انتهایی اضافه شده به مدل شفت، جهت اعمال قیدها و شرایط مرزی به سیستم مورد استفاده قرار گرفت. متوسط تعداد المانهای مورد استفاده برای شبکهبندی

شفت در حدود 70000 المان بوده است.

"شکلهای 8 و 9" تغییرات تنش شعاعی بر روی شفت استوانهای کامل و شفتی که هندسه دقیق آن مورد تحلیل اجزاء محدود قرار گرفته است را نشان میدهد. "شکل 9" تغییرات قابل توجه در مقادیر محلی تنشهای شعاعی را نشان میدهد. این تغییرات به واسطه، تغییر در هندسه شفتها رخ داده است. این دو شکل، به روشنی بیانگر توانایی استراتژی منتخب برای مدلسازی هندسه دقیق شفتها، در دریافت تغییرات محلی تنش سطح تماس است.

2-5- مدلسازی اجزاء محدود استخراج اتصال

برای مدلسازی اجزاء محدود استخراج شفت از بوش و استحصال استحکام و نیروی استخراج میبایست قیدهایی بر قطعات اعمال گردد. این مهم پس از ایجاد تداخل در گام نخست تحلیل انجام میگیرد. برای مدلسازی استخراج تلاش می گردد تا قیود مشابه آنچه که در فرآیند تجربی اعمال می گردد، شبیه سازی شود. سطح بالای بوش در راستای Z بدون حرکت گردید. تمامی نقاط سطح بالای بخش افزوده شفت با نقطه مرجعی در مرکز آن کوپل و قفل شدند. کوپل کردن سطح بالای بوش با نقطه مرجع، در بخش تعریف قیود و در مدول اندرکنش نرمافزار آباکوس امکان پذیر است.

سپس این نقطه در تمامی درجات آزادی بسته گردید و در گام دیگری در راستای Z به اندازه 1 میلیمتر حرکت داده شد. برای اعمال اصطکاک از مدل کولمب استفاده گردید. استفاده از لغزش کوچک در تحلیل تماس، ناشی از محدودیتهای مدل سازی در نرمافزار آباکوس است. با توجه به اعمال این نوع لغزش، حرکت شفت درخلال شبیه سازی فرآیند استخراج، مقدار محدود یک میلیمتر انتخاب گردید. "شکل 10" نحوه اعمال قیود به مدل اجزاء محدود، جهت مدل سازی استخراج اتصال را نشان می دهد.

مقدار ضریب اصطکاک اولیه در مدلسازی معادل 0.2 اعمال گردید. روشن است که استحکام استخراج حاصل از تحلیل اجزاء محدود کاملاً









شکل 9 تنش شعاعی (مگاپاسکال) روی سطوح تداخل در شفت با وجود عیوب فرم



Fig. 10 Applied constraints for modelling of the extraction strength شکل 10 قیود اعمالی برای مدلسازی استحکام استخراج

وابسته به خواص مکانیکی و ضریب اصطکاک است؛ اما فشار و تنشرها در سطح تماس و پیش از استخراج مستقل از ضریب اصطکاک است [5].

"شكل 11" اطلاعات حاصل از تحليل اجزاء محدود استخراج سه شفت با زبرى 0.16 و 20.5 و آبكارى شده از بوش را در قالب نمودار نيرو-جابجايى ارائه مىدهد. مقادير استحكام استخراج حاصل از مدلسازى اوليه براى قطعات با زبرى 0.16 و 20.5 و آبكارى شده به ترتيب 30977.9 ،30955 و 34355.3 نيوتن است. همانطور كه در نمودار "شكل 11" ملاحظه مىشود، با توجه به استفاده از لغزش كوچك در مدلسازى استخراج، مقدار حركت شفت در بوش محدود به 1 ميلى متر است.

با مقایسه مقادیر استحکام استخراج تجربی و اجزاء محدود، تفاوت بزرگی بین نمونههای متناظر مشاهده می گردد. با توجه به این که تلاش شده است تا هندسه اجزاء اتصال با حداکثر دقت مدل شود و همچنین با توجه به این که خواص مکانیکی مواد برابر با تستهای تجربی به تحلیل اجزاء محدود اعمال شده است، می توان نتیجه گرفت که ضریب اصطکاک تنها دلیل تفاوت بین مقادیر تجربی و تحلیلی استحکام استخراج است.

6-تخمين ضريب اصطكاك سطح تداخل

در ادامه و طی روش ارائه شده توسط سیفی و عباسی [5] تلاش میگردد تا ضریب اصطکاک سطح تداخل قطعات با استفاده از نتایج استحکام استخراج تجربی، تخمین زده شود.

از تقسیم استحکام استخراج اجزاء محدود بر ضریب اصطکاک اعمالی در مدل میتوان مقدار مجموع نیروهای عمودی اعمالی بر سطح تداخل را بدست آورد.



Fig. 11 Variation of numerical extraction force versus displacement شکل 11 تغییرات نیروی استخراج عددی برحسب جابجایی

به بیان ریاضی میتوان انتگرال نیروهای عمود بر سطح تداخل را با استفاده از رابطه (1) بسط داد.

$$F_{\rm N} = \int \sigma_r dA = \frac{ES}{f} \tag{1}$$

که در رابطه فوق ES بیانگر استحکام استخراج حاصل از تحلیل اجزاء محدود و f ضریب اصطکاک سطح تداخل است. $F_{\rm N}$ معادل انتگرال نیروهای عمود بر سطح تداخل است. $F_{\rm N}$ معادل انتگرال نیروهای عمود بر اعمال هندسه دقیق قطعات در تحلیل اجزاء محدود، میتوان تخمینی دقیق از مقدار نیروهای عمودی وارد بر سطح تداخل را محاسبه نمود. در ادامه با اولیه از مقدار نیروهای عمودی وارد بر سطح تداخل را محاسبه نمود. در ادامه با اولیه از مقدار ضریب اصطکاک بهدست آورد. پس از جایگذاری این مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اجزاء محدود، مجدداً میتوان تخمینی مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اجزاء محدود، مجدداً میتوان مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اجزاء محدود، محدود، میتوان مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اجزاء محدود، مجدداً میتوان مقدار ضریب اصطکاک را اصلاح نمود. که مقدار ثابت همگرا شود.

جدول 4 مقادیر نیروی عمود بر سطح حاصل از تحلیل اجزاء محدود، نیروی استخراج اجزاء محدود با استفاده از ضریب اصطکاک تنظیم شده و ضریب اصطکاک تخمینی را نشان میدهد.

با مقایسه دقیق تر مقادیر نیروی عمودی سطح تداخل حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای قطعات با زبری 0.25 و آبکاری شده، می توان این گونه استنباط نمود که سطح تماس و مقدار تداخل در قطعه آبکاری شده بیش از قطعه با زبری بالاتر است. البته با توجه به این که مقدار تداخل متوسط در این افزایش در مقدار نیروی عمود بر سطح، همان افزایش در سطح تماس این افزایش در مقدار نیروی عمود بر سطح، همان افزایش در سطح تماس قطعه با زبری 2.50 میکرومتر بیش از قطعه آبکاری شده است، در حالی که استحکام استخراج تجربی قطعه آبکاری شده، اندکی بیش از قطعه زبر است. این مهم نیز، به دلیل بیشتر بودن مقدار نیروی عمودی در قطعه آبکاری شده است. که البته امکان پیشتر بودن مقدار نیروی عمودی در قطعه آبکاری شده قطعه با زبری 2.00 را تقویت می کند. با توجه به کیفیت سطح بالای حاصل از آبکاری کروم سخت، به نظر می رسد که عامل اصلی افزایش نیروی عمودی در قطعه آبکاری، افزایش سطح تماس باشد.

جدول 4 مقایسه نتایج عددی و تجربی مقادیر استحکام استخراج و اندازه ضریب اصطکاک تخمینی برای شفت دارای عیوب فرم

 Table 4 Comparison of numerical and experimental values for the extraction strength and estimated friction coefficients for imperfect shaft

آبکاری	Ra=0.25	<i>Ra</i> =0.16	سطح شفت
34355.3	33095.1	30977.9	نيروى استخراج اجزاء محدود اوليه (N)
171777	165476	154890	نیروی عمودی سطح (N)
0.253	0.261	0.234	ضريب اصطكاك تخميني
44197.5	44008.8	36457.4	استحكام استخراج اجزاء محدود تنظيم شده (N)
44331	44194	36572	استحکام استخراج تجربی (N)

رحمن سیفی و کاوہ عباسی

تا به اینجا به نظر میرسد که استفاده از آبکاری کروم سخت شده برای ترمیم سطح تداخل، به نحو موفقی در حفظ استحکام اتصال عمل نموده است. همچنین استفاده از آبکاری کروم سخت باعث افزایش کیفیت سطح تداخل شده است. البته آبکاری کروم سخت باعث کاهش در ضریب اصطکاک نسبت به قطعه با زبری 0.25 میکرومتر و افزایش در ضریب اصطکاک به نسبت قطعه با زبری سطح 0.16 میکرومتر شده است. بنابراین به نظر میرسد که آبکاری کروم در سطح تداخل میتواند با افزایش سطح تماس، اثری مشابه به افزایش زبری در سطح تماس داشته باشد و در عین حال باعث کاهش ضریب اصطکاک در سطح تماس گردد.

در ادامه به بررسی وضعیت سطوح جدایش و میزان سایش در سطح قطعات پرداخته شده و تأثیر آبکاری کروم سخت در مقدار سایش مطالعه شده است.

7-سایش در سطح تماس

درخلال استخراج شفت از بوش ممکن است سطح شفت و بوش تخریب گردد. همانطور که پیش از این بیان گردید در تستهای انجام شده در این پژوهش، کنس داخلی یاتاقان به عنوان بوش در اتصال دخالت داده شد. روشن است که یاتاقانها معمولاً مقاومت به سایش بالایی دارند، بنابراین در خلال فرآیند استخراج سایش حاصل در سطح بوشها ملاحظه نشد. از طرف دیگر همانطور که بیان گردید، قطعه بوش معمولاً مصرفی است و در فرآیند تعمیرات صنعتی، اغلب این قطعه بهصورت مجزا تعویض می گردد. بنابراین در ادامه تخریب در سطح شفتها بررسی گردید. "شکلهای 12 و 13". به ترتیب، سطح تداخل شفتهای با زبری 16.6 و 200 میگرومتر را نشان می-دهد. نکته قابل ذکر دیگر این که سطح شفت دارای آبکاری کروم سخت، پس از استخراج، هیچ گونه سایشی نشان نداد و بنابراین بررسی میکروسکوپی این سطوح انجام نشد. بهطور کلی به عنوان اولین نتیجه بررسیهای سطح تداخل پس از استخراج میتوان عدم رخداد سایش در سطح قطعات دارای آبکاری را مطرح نمود.

با توجه به "شکلهای 12 و 13" روشن است که افزایش زبری نه تنها باعث بالا رفتن استحکام اتصال می گردد بلکه موجب کاهش سایش در سطح شفت نیز خواهد شد. این مشاهدات در بررسی سطح تداخل دو نمونه دیگر قطعات با زبری 20.6 و 20.5 نیز تکرار گردید. در توجیه این مطلب می توان به این نکته توجه نمود که در قطعات زبری بالاتر، وجود قلههای منفرد در سطح تداخل محتمل تر است. همچنین با توجه به میدان تنش در سطح تداخل، مقدار تنش شعاعی در قلههای منفرد سطح بیشینه خواهد بود و مقادیر تنشهای محیطی و محوری تقریباً صفر خواهد بود، بنابراین مقدار تنش مؤثر جهت بررسی پلاستیسیته در سطح تداخل و قلهها، معادل فشار تداخل خواهد بود (15].



Fig. 12 Contact surface of decoupled shaft with roughness *Ra*=0.16 شکل 12 سطح تماس شفت دمونتاژ شده با زبری 0.16 میکرومتر



Fig. 13 Contact surface of decoupled shaft with *Ra*=0.25 **میکروم**تر **13 سطح تماس شفت دمونتاژ شده با زبری 0.25 میکرومتر**

همچنین در سطح تداخلی که دارای برجستگیهای منفرد نیست، مقدار تنش معادل که معیار پلاستیسیته در سطح است، معادل نصف فشار تداخل خواهد بود [16]. با توجه به مطالب فوق میتوان این گونه بیان نمود که زبری و نامنظمیهای سطحی با دامنه بالاتر، منجر به مقادیر بالاتر تنش مؤثر خواهد شد [17]. مقادیر تنش بالای استحکام تسلیم منجر به تسطیح قلهها و رخداد تغییر شکل پلاستیک در سطح تداخل خواهد شد [18]. اما در قطعات با زبری پایین تر به نظر می سد که سطح تداخل پلاستیک نمی گردد و درخلال فرآیند استخراج بوش از شفت زبریهای سطح همواره با یکدیگر درگیر خواهند شد و تجمع این درگیریها منجر به سایش و خراشهای عمیق در سطح قطعات خواهد شد. در مورد قطعات آبکاری شده، به نظر می سد که سطح دارای زبری کوچکتر باشد که البته در صورت وجود نامنظمی در سطح قطعات آبکاری کمتر از دیگر قطعات خواهد بود. بنابراین سایش در سطح قطعات آبکاری کمتر از قطعات زبر است و سایش در قطعات با زبری 5.0 به دلیل پلاستیک شدن زبریها کمتر از سایش موجود در سطح قطعات با زبری دلیل پلاستیک شدن زبریها کمتر از سایش موجود در سطح قطعات با زبری دلیل پلاستیک شدن زبریها کمتر از سایش موجود در سطح قطعات با زبری 0.16

8-بحث و نتیجه گیری

به عنوان نتیجه اصلی این پژوهش میتوان به امکان استفاده موفق از آبکاری کروم سخت برای ترمیم سطح تداخل اجزاء اتصالات تداخلی اشاره نمود. این مهم در بررسی تجربی به اثبات رسید و مشاهده شد که قطعات آبکاری شده، استحکامی معادل با قطعات تولید شده و بدون عیب ارائه کردند. معمولاً در ماشینها اتصالات تداخلی برای انتقال گشتاور بهصورت گسترده مورد استفاده قرار میگیرند. اغلب اوقات یکی و یا هر دو جزء این اتصالات، قطعاتی پیچیده هستند و در صورت تخریب سطح تداخل آنها درخلال فرآیند دمونتاژ نمودن اجزاء اتصال، تعویض آنها منجر به تحمیل هزینههای بالا میگردد. بنابراین در این موارد استفاده از آبکاری کروم سخت میتواند به عنوان یک روش مؤثر ترمیم سطح تداخل در نظر گرفته شود.

همچنین بررسیها نشان داد که افزایش زبری در سطح تداخل میتواند منجر به افزایش استحکام و ضریب اصطکاک در اتصال گردد. از طرف دیگر، افزایش زبری منجر به کاهش سایش در سطح تداخل نیز خواهد شد. البته به نظر میرسد این کاهش سایش منجر به تسطیح سطح تداخل گردد. بنابراین در استفاده مجدد از این قطعات میبایست پیش از به کارگیری آنها، ابعاد آن-ها به دقت کنترل شود و بررسی گردد که آیا تغییر شکلهای پلاستیک در سطح قطعات باعث کاهش ابعاد آنها نشده است.

مطلب قابل توجه دیگر، افزایش نیروی عمودی در سطح تداخل قطعات آبکاری شده، به نسبت دیگر قطعات است. به نظر میرسد که منشأ این 914-925, 2010.

- [5] R. Seifi, K. Abbasi, Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating, *Engineering failure analysis*, Vol. 57, pp. 310-322, 2015.
- [6] G. M. Yang, J. C. Coquille, J. F. Fontaine, M. Lambertin, Influence of roughness on characteristics of tight interference fit of a shaft and a hub, *International journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 42-43, pp. 7691-7701, 2001.
- [7] R. H. Thornley, I. Elewa, The static and dynamic stiffness of interference shrink-fitted joints, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 28, No. 2, pp. 141–15, 1988.
- [8] H. Boutoutaou, M. Bouazi, J. F. Fontaine, Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3692–3701, 2011.
- [9] D. B. Patil, M. Eriten, Effects of interfacial strength and roughness on the static friction coefficient, *Tribology Letters*, Vol. 56, No. 2, pp. 355–374, 2014.
- [10] N. B. Demkin, V. V. Izmailov, The relation between the friction contact performance and the microgeometry of contacting surfaces, *Journal of Friction and Wear*, Vol. 31, No. 1, pp. 48-55, 2010.
- [11] S. R. M. Moghaddam, M. S. Redfern, K. E. Beschorner, A microscopic finite element model of shoe-floor hysteresis and adhesion friction, *Tribology letters*, Vol. 59, No. 3, pp. 1-10, 2015.
- [12] K. Kato, Wear in relation to friction a review, *Wear*, Vol. 241, No. 2, pp. 151–157, 2000.
- [13] P. V. Rao, B. Ramamootthy, V. Radhakrishnan, Effct of plating and temprature on the strength of shrink fitted assemblies, *International journal of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 33, No. 3, pp. 475-481, 1993.
- [14] J. Jiang, Y. Bi, H. Dong, Y. Ke, X. Fan, K. Du, Influence of stress in hi-lock bolt insertion, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, No. 18, pp. 3296-3305, 2014.
- [15] R. Buczkowski, M. Kleiber, A study of the surface roughness in elasto-plastic shrink fitted joint, *Tribology International*, Vol. 98, pp 125-132, 2016.
- [16] J.F. Fontaine, I. E. Siala, Form defect influence on the shrinkage fit characteristics, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 17, No. 1, pp. 107-119, 1998.
- [17] M. Masjedi, M. M. Khonsari, On the effect of surface roughness in point-contact EHL: Formulas for film thickness and asperity load, *Tribology International*, Vol. 82, Part A, pp. 228–244, 2015.
- [18] P. Todorovic, B. Tadic, D. Vukelic, M. Jeremic, S. Randjelovic, Analysis of the influence of loading and the plasticity index on variations in surface roughness between two flat surfaces, *Tribology International*, Vol. 81, pp. 276–282, 2015.

افزایش در افزایش سطح تماس در قطعات آبکاری باشد. به هرحال قطعات آبکاری شده، کیفیت سطح بهتری را ارائه خواهند نمود که البته منجر به کاهش ضریب اصطکاک نیز خواهد شد. اما در نهایت، میتوان با این روش ترمیم استحکام اتصال را حفظ و سایش ناشی از دمونتاژ کردن در سطح تداخل را نیز کاهش داد.

لازم به ذکر است که روش آبکاری کروم سخت در ترمیم سطح تداخل، پوشش یاتاقان کلاچ یک توربین، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفت و منجر به کاهش هزینههای تعمیراتی این توربین نیز گشت.



- 10-مراجع
- S. P. Timoshenko, Strength of materials part II: advanced theory and problems, third edition, pp. 213-214, Krieger Publication Co, 1956.
- [2] S. W. Lee, D. G. Lee, Torque transmission capability of composite-metal interference fit joints, *Composite Structures*, Vol. 78, No. 4, pp. 584–595, 2007.
- [3] J. D. Booker, C. E. Truman, S. Wittig, Z. Mohammed, A comparison of shrink-fit holding torque using probabilistic, micromechanical and experimental approaches, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, pp. 175-187, 2004.
- [4] L. Sniezekb, J. Zimmerman, A. Zimmerman, The carrying capacity of conical interference-fit joints with laser reinforcement zones, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 6-7, pp.