



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

رحمن سیفی¹، کاوه عباسی²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
* همدان، صندوق پستی 65175-4161 rseifi@basu.ac.ir

چکیده

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 می‌گیرد. 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 طولی است که دیگر اجزاء ماشین بر روی آن سوار می‌گردند. بنابراین 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 فرآیند 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 نحوی که استحکام اتصال در قطعات ترمیم شده معادل و حتی بیش از اتصال اولیه بود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 خرداد 1395
پذیرش: 14 مرداد 1395
ارائه در سایت: 21 شهریور 1395

کلید واژگان:

اتصال تداخلی
تحلیل اجزاء محدود
استحکام استخراج
آبکاری کروم سخت

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

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. Repeated 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 joints.

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 لایه برای استوانه‌های جدار ضخیم و با فرض قطعات متقارن محوری بدون عیوب سطح است [1]. با استفاده از مقادیر تنش‌های عمود بر سطح، مقدار نیروهای عمود بر سطح تداخل نیز قابل محاسبه است. همچنین با استفاده از مقادیر پیش فرض برای ضریب اصطکاک در سطح تداخل و مقدار

اتصالات تداخلی به صورت گسترده در صنعت برای ایجاد اتصالاتی محکم و متعادل بین شفت و بوش مورد استفاده قرار می‌گیرند. 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قرار می‌گیرد. در ادامه میزان سایش ایجاد شده در سطح تماس تداخل و در خلال فرآیند دمونتاز 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 میلی‌متر ساخته شدند. "شکل 1" نشان دهنده ابعاد و هندسه قطعات شفت است. همچنین از کنس داخلی یاتاقان‌های استاندارد غلتکی به شماره استاندارد NA6906 نیز 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 ترتیب 30، 35 و 30 میلی‌متر است. بوش‌ها از فولاد استاندارد AISI 52100 ساخته شده‌اند. با توجه به ابعاد منتخب میزان تداخل شعاعی اسمی در اتصال 15 میکرومتر خواهد بود. دقت ابعادی و عدم وجود عیوب فرم در قطعه بوش، پس از اندازه‌گیری قطر داخلی کنس داخلی یاتاقان‌های غلتکی، توسط ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات¹ اعتبارسنجی شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها 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 اندازه‌گیری ابعاد بوش‌ها توسط ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری 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، می‌باشد. 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 تفرانس ابعادی دلخواه بر آن اعمال شد. این روش تولید برای ساخت قطعات شفت دقیق، کاملاً معمول می‌باشد. 6 عدد شفت تولید

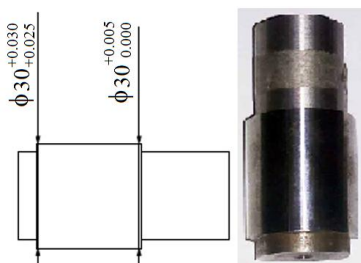


Fig. 1 Dimension and geometry of shaft part

شکل 1 ابعاد و هندسه قطعه شفت

نیروی عمودی در سطح تداخل، ظرفیت انتقال گشتاور این اتصالات را نیز می‌توان تخمین زد [2]. بوکر و همکارانش تلاش نمودند تا اعتبار حل لانه 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 پیش‌بینی 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 می‌گردد [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 بدون توجه به کیفیت سطح در محاسبات لحاظ شده است. در این پژوهش‌ها [6-8] تلاش شده است تا اثر زبری سطح، با تغییر در تعریف مقدار تداخل در محاسبات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر بسیاری از پژوهشگرها، اثر زبری بر ضریب اصطکاک را گزارش نموده‌اند [9,10]. همچنین روشن است که مقدار زبری سطح تداخل، می‌تواند بر مقدار تخریب و سایش در سطح تداخل و در خلال فرآیند دمونتاز 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 و برای اهداف مهندسی می‌توان ضریب اصطکاک را به صورت خاصیت 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، مبتنی بر شرایط آن سطح تخمین زد و 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 راتو 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 کرات دمونتاز گردند. دمونتاز 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 می‌گردد. اما عضو شفت، در بسیاری از موارد دارای شکلی پیچیده و در برگزیده قطعات بسیاری است. ترمیم سطح اجزا اتصال و بازیابی آنها می‌تواند محل بررسی‌های 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 می‌دهند و اغلب زبری حاصل از این روش تولید در محدوده دو مقدار مفروض

¹ Coordinate Measurement Machine

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ شفت

Ti%	Cu%	Al%	Mo%	Ni%	S%	P%	Cr%	Mn%	Si%	C%	Fe %	ترکیبات
0.006	0.054	0.02	0.21	0.08	0.007	0.012	1.02	0.89	0.27	0.38	پایه	درصد ترکیبات آلیاژ

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ بوش

Co%	Cu%	Al%	Mo%	Ni%	S%	P%	Cr%	Mn%	Si%	C%	Fe %	ترکیبات
0	0.1	0.01	0	0.02	<0.003	0.013	1.53	0.45	0.31	0.94	پایه	درصد ترکیبات آلیاژ

در ادامه با استفاده از نرم افزار ژئو مجیک استودیو¹ بر مدل ابر نقاط شفت و در سطح تداخل آن، صفحاتی برآزش شده و فایل سه بعدی قطعه شفت ایجاد گردید. بررسی دقت حاصل از فرآیند برآزش صفحات بر نقاط مدل، انحراف-های زیر یک میکرومتر را نشان داد. با توجه به این مطلب می توان ادعا نمود که دقت ابعادی مدل حاصل از فرآیند برآزش 1 میکرومتر است. مدل های 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 صورت اعمال دقیق خواص مواد، در تحلیل اجزاء محدود، می توان از صحت میدان تنش حاصل از تحلیل اجزاء محدود مطمئن بود. البته در بسیاری از پژوهش ها نیز استفاده موفق از تحلیل اجزاء محدود در تخمین مقادیر میدان تنش گزارش شده است [8,7]. تحلیل اجزاء محدود در این پژوهش با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام گرفت.

3-اندازه گیری خواص مکانیکی شفت و بوش

با توجه به اهمیت خواص مکانیکی مواد در نتیجه تحلیل ها، 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 نرم افزار وارد گردد. صحت خواص مکانیکی مورد استفاده در تحلیل ها مستقیماً بر خروجی ها 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 نمونه هایی 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 نمونه های 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 تست های تجربی، مبنای بررسی های تحلیلی و عددی قرار گرفت.

جدول 3 خواص مکانیکی اندازه گیری شده مواد شفت و بوش

استحکام تسلیم (MPa)	ضریب کشسانی (GPa)	ضریب پواسون	جرم حجمی (kg/m ³)	
420	205	0.29	7850	شفت
700	210	0.3	7810	بوش

¹ Geomagic studio



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 $Ra=0.25\mu m$ و $Ra=0.16\mu m$ بودند و دو مورد از شفت ها به نحوی تولید شد که قطر آن ها در حدود 50 میکرون پایین تر از قطر اسمی منتخب بود.

سطح شفت های با قطر کمتر، آبکاری کروم سخت شد تا قطر آن ها 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 شفت ها 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. در "شکل 3" یک نمونه از مدل ابر نقاط استحصال شده از دوربین اسکن 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، لنز منتخب دستگاه دارای دقت اندازه گیری ابعاد تا 0.1 میکرومتر بود.

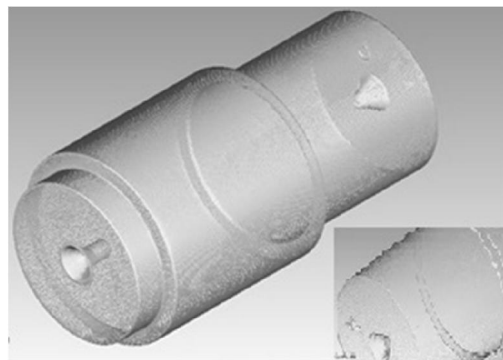


Fig. 3 Extracted point cloud images by optic camera

شکل 3 مدل ابر نقاط استحصال شده از دوربین اسکن نوری

"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 در حدود 37 کیلونیوتن ثبت کرده‌اند.

همچنین "شکل 6" نمودار استحکام استخراج قطعات با زبری 0.25 میکرومتر را در حدود 44 کیلونیوتن نشان می‌دهد. در نهایت برای قطعات آبرکاری 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 آبرکاری، عدم بروز قله مشخص در نمودار استحکام استخراج این قطعات است. برای تشخیص استحکام استخراج در این قطعات، به صورت دقیق‌تر به روند تغییر در نرخ تغییرات نیروی استخراج با لغزش پرداخته می‌شود. بخش‌های سمت راست نمودارها، محل وقوع استحکام استخراج بر روی نمودارهای نیرو-جابجایی را نشان می‌دهند. 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 آبرکاری کروم، دقت بیشتر در بخش سمت راست نمودارها، دریافت تغییر شیب و استحکام استخراج را ساده‌تر می‌نماید.

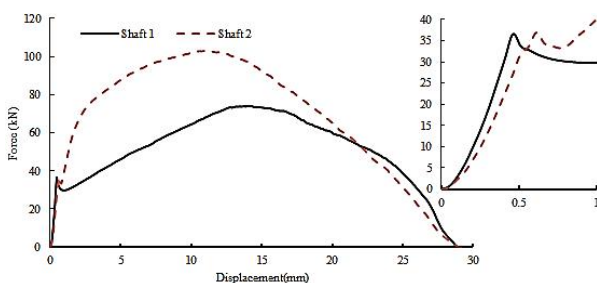


Fig. 5 Experimental extraction force for two joints with $Ra=0.16$
شکل 5 نمودار نیروی استخراج تجربی اتصال دو شفت با زبری 0.16 میکرومتر

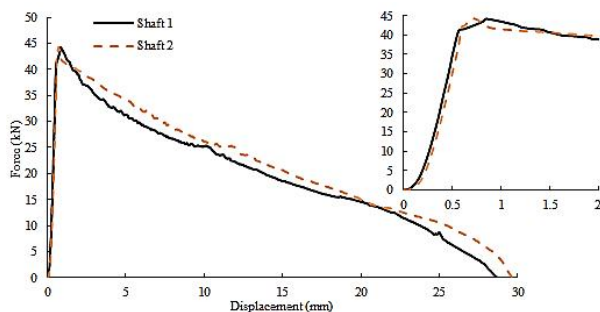


Fig. 6 Experimental extraction force for two joints with $Ra=0.25$
شکل 6 نمودار نیروی استخراج تجربی اتصال دو شفت با زبری 0.25 میکرومتر

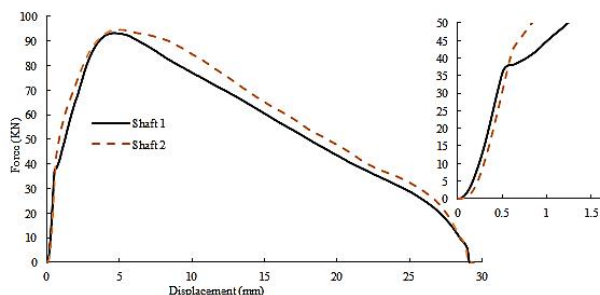


Fig. 7 Experimental extraction force for two joints of the plated shafts.
شکل 7 نمودار نیروی استخراج تجربی اتصال دو شفت آبرکاری شده.

همچنین برای سرهم کردن اجزاء اتصال، بدون ایجاد تخریب در سطح تداخلی، 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 این‌که در فرآیند تجربی سرهم کردن اتصال، قطعات بوش گرم شدند، پیش از انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های بوش، این قطعات تحت دمای مشابه با آنچه که در فرآیند سرهم کردن رخ می‌دهد قرار گرفتند و در ادامه تست کشش بر روی نمونه‌های گرم‌آماده انجام گردید. همچنین متذکر می‌گردیم 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 مدل‌سازی رفتار پلاستیک قطعات، در تحلیل اجزاء محدود استفاده شدند.

4- استحصال نیروی استخراج تجربی

با استفاده از ماشین تست یونیورسال سنتام¹ و فیکسچر طراحی شده، شفت‌ها از بوش‌ها خارج شده و نیروی مورد نیاز برای استخراج آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نیرو و نمودارهای حاصل را نمودار استحکام استخراج اتصالات تداخلی می‌نامند که معیاری پذیرفته شده و فراگیر برای سنجش استحکام اتصالات به صورت تجربی است. همان‌طور که بیان شد برای هر کدام از مقادیر زبری 0.16 و 0.25 میکرومتر دو نمونه ساخته شده و به همراه نمونه‌های آبرکاری شده با کروم سخت مورد بررسی تجربی قرار گرفتند. تجهیزات مورد استفاده برای استحصال نیروی استخراج در "شکل 4" نشان داده شده است. بررسی‌های تجربی نشان داد که نمونه‌های مشابه دارای استحکام استخراج مشابه هستند. نمودار نیروی استخراج هر جفت از قطعات با زبری متفاوت و قطعات آبرکاری شده، در نمودارهای "شکل‌های 5، 6 و 7" 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

شکل 4 فرآیند استخراج با فیکسچر و ماشین تست یونیورسال. (الف) ماشین تست یونیورسال. (ب) فیکسچر طراحی شده برای استخراج اتصالات سرهم شده. (پ) قطعات سرهم شده و فیکسچر طراحی شده بر روی ماشین تست یونیورسال

¹ Santam

شفت در حدود 70000 المان بوده است. "شکل های 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 استحکام نیروی استخراج می‌بایست قیدهایی بر قطعات اعمال گردد. این مهم پس از ایجاد تداخل در گام نخست تحلیل انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی استخراج تلاش می‌گردد تا قیود مشابه آنچه که در فرآیند تجربی اعمال می‌گردد، شبیه‌سازی 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 امکان‌پذیر 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 مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس است. با توجه به اعمال این نوع لغزش، حرکت شفت در خلال شبیه‌سازی فرآیند استخراج، مقدار محدود یک میلی‌متر انتخاب گردید. "شکل 10" نحوه اعمال قیود به مدل اجزاء محدود، جهت مدل‌سازی استخراج اتصال را نشان می‌دهد. مقدار ضریب اصطکاک اولیه در مدل‌سازی معادل 0.2 اعمال گردید. روشن است که استحکام استخراج حاصل از تحلیل اجزاء محدود کاملاً

در این بخش یک نتیجه کلی نشان می‌دهد که افزایش زبری در سطح تداخل قطعات می‌تواند منجر به افزایش استحکام استخراج اتصالات تداخلی گردد. همچنین مقایسه بین استحکام استخراج قطعات آبیاری شده با استفاده از کروم سخت، نمایانگر این مطلب است که فرآیند ترمیم، باعث حفظ استحکام استخراج در محدوده‌های بینابین قطعات با زبری 0.16 و 0.25 میکرومتر است. نکته قابل ذکر دیگر این که محدوده زبری معمول حاصل، پس از عملیات سنگ‌زنی قطعات عددی در محدوده زیر یک میکرومتر خواهد بود. این مطلب نشان از منطقی بودن عدد زبری قطعات آزمایشی و نزدیکی بودن زبری سطح آن‌ها به موارد صنعتی و کاربردی است.

5- مدل‌سازی اجزاء محدود

5-1- مدل‌سازی تداخل اجزاء اتصال

استفاده از تحلیل اجزاء محدود برای بررسی میدان تنش در اتصالات تداخلی در بسیاری از پژوهش‌های 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 می‌گردد 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 اندازه‌گیری 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.

- بوش‌ها به صورت قطعات استوانه‌ای با هندسه بدون عیب مدل شدند.
- اثرات حرارتی 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.
- همان‌طور که بیان گردید، خواص مواد، مبتنی بر تست‌های تجربی اندازه‌گیری و به تحلیل اجزاء محدود اعمال گردید. همچنین، رفتار پلاستیک مواد، پیش از فرآیند گلوبی شدن نیز، اندازه‌گیری و به تحلیل اعمال گردید.
- رفتار اصطکاک 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

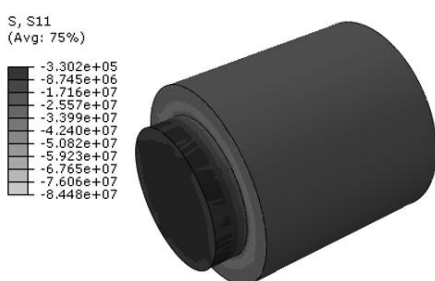


Fig. 8 Radial stress (Pa) on interference surfaces of the perfect shaft
شکل 8 تنش شعاعی (پاسکال) روی سطوح تداخل در شفت بدون عیب

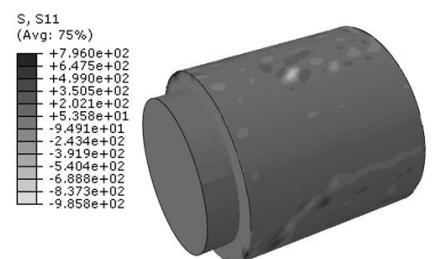


Fig. 9 Radial stress (MPa) on interference surfaces of the shaft with form defects
شکل 9 تنش شعاعی (مگاپاسکال) روی سطوح تداخل در شفت با وجود عیوب فرم

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

$$F_N = \int \sigma_r dA = \frac{ES}{f} \quad (1)$$

که در رابطه فوق ES بیانگر استحکام استخراج حاصل از تحلیل اجزاء محدود و f ضریب اصطکاک سطح تداخل است. F_N معادل انتگرال نیروهای عمود بر سطح تداخل است. با توجه به اعمال خواص مکانیکی به صورت تجربی و 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 تقسیم استحکام استخراج تجربی بر نیروهای عمود بر سطح، می‌توان تخمینی اولیه از مقدار ضریب اصطکاک به‌دست آورد. پس از جای‌گذاری این مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اجزاء محدود، مجدداً می‌توان مقدار ضریب اصطکاک را اصلاح نمود. فرآیند مذکور تا جایی تکرار می‌گردد که مقدار ضریب اصطکاک، به یک 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 دقیق‌تر مقادیر نیروی عمودی سطح تداخل حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای قطعات با زبری 0.25 و آبکاری شده، می‌توان این‌گونه استنباط نمود که سطح تماس و مقدار تداخل در قطعه آبکاری شده بیش از قطعه با زبری بالاتر است. البته با توجه به این‌که مقدار تداخل متوسط در قطعات معادل 15 میکرومتر تنظیم شده است به نظر می‌رسد که دلیل اصلی این افزایش در مقدار نیروی عمود بر سطح، همان افزایش در سطح تماس تداخل می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب اصطکاک در قطعه با زبری 0.25 میکرومتر بیش از قطعه آبکاری شده است، در حالی‌که استحکام استخراج تجربی قطعه آبکاری شده، اندکی بیش از قطعه زیر است. این مهم نیز، به دلیل بیشتر بودن مقدار نیروی عمودی در قطعه آبکاری شده است، که البته امکان بیشتر بودن سطح تماس در قطعه آبکاری شده به نسبت قطعه با زبری 0.25 را تقویت می‌کند. با توجه به کیفیت سطح بالای حاصل از آبکاری کروم سخت، به نظر می‌رسد 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	$Ra=0.25$	$Ra=0.16$	سطح شفت
34355.3	33095.1	30977.9	نیروی استخراج اجزاء محدود اولیه (N)
171777	165476	154890	نیروی عمودی سطح (N)
0.253	0.261	0.234	ضریب اصطکاک تخمینی
44197.5	44008.8	36457.4	استحکام استخراج اجزاء محدود تنظیم شده (N)
44331	44194	36572	استحکام استخراج تجربی (N)



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 تنش‌ها در سطح تماس و پیش از استخراج مستقل از ضریب اصطکاک است [5]. "شکل 11" اطلاعات حاصل از تحلیل اجزاء محدود استخراج سه شفت با زبری 0.16 و 0.25 و آبکاری شده از بوش را در قالب نمودار نیرو-جابجایی ارائه می‌دهد. مقادیر استحکام استخراج حاصل از مدل‌سازی اولیه برای قطعات با زبری 0.16 و 0.25 و آبکاری شده به ترتیب 30977.9، 33095.1 و 34355.3 نیوتن است. همان‌طور که در نمودار "شکل 11" ملاحظه می‌شود، با توجه به استفاده از لغزش کوچک در مدل‌سازی استخراج، مقدار حرکت شفت در بوش محدود به 1 میلی‌متر است.

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

6- تخمین ضریب اصطکاک 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.

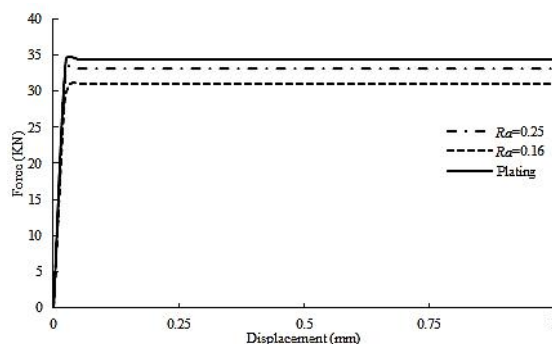


Fig. 11 Variation of numerical extraction force versus displacement

شکل 11 تغییرات نیروی استخراج عددی برحسب جابجایی

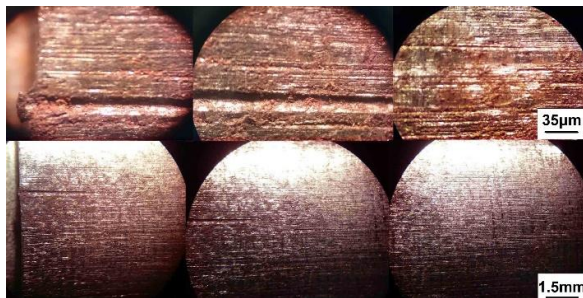


Fig. 13 Contact surface of decoupled shaft with $Ra=0.25$

شکل 13 سطح تماس شفت دمونتاز 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 این‌گونه 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 پایین‌تر به نظر می‌رسد که سطح تداخل پلاستیک نمی‌گردد و در خلال 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 آبرکاری شده، به نظر می‌رسد که سطح دارای زبری کوچکتر باشد که البته در صورت وجود نامنظمی در سطح نیز، دامنه زبری‌ها کمتر از دیگر قطعات خواهد بود. بنابراین سایش در سطح قطعات آبرکاری کمتر از قطعات زیر است و سایش در قطعات با زبری 0.25 به دلیل پلاستیک شدن زبری‌ها کمتر از سایش موجود در سطح قطعات با زبری 0.16 خواهد بود.

8- بحث و نتیجه گیری

به عنوان نتیجه اصلی این پژوهش می‌توان به امکان استفاده موفق از آبرکاری کروم سخت برای ترمیم سطح تداخل اجزاء اتصالات تداخلی اشاره نمود. این مهم در بررسی تجربی به اثبات رسید و مشاهده شد که قطعات آبرکاری شده، استحکامی معادل با قطعات تولید شده و بدون عیب ارائه کردند. معمولاً در ماشین‌ها اتصالات تداخلی برای انتقال گشتاور به صورت 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 در خلال فرآیند دمونتاز نمودن اجزاء اتصال، تعویض آن‌ها منجر به تحمیل هزینه‌های بالا می‌گردد. بنابراین در این موارد استفاده از آبرکاری 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 آن‌ها 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 آبرکاری شده، به نسبت دیگر قطعات است. به نظر می‌رسد که منشأ این

تا به این‌جا به نظر می‌رسد که استفاده از آبرکاری کروم سخت شده برای ترمیم سطح تداخل، به نحو موفقی در حفظ استحکام اتصال عمل نموده است. همچنین استفاده از آبرکاری کروم سخت باعث افزایش کیفیت سطح تداخل شده است. البته آبرکاری 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 آبرکاری 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 آبرکاری کروم سخت در مقدار سایش مطالعه شده است.

7- سایش در سطح تماس

در خلال 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 به صورت مجزا تعویض می‌گردد. بنابراین در ادامه تخریب در سطح شفت‌ها بررسی گردید. "شکل‌های 12 و 13"، به ترتیب، سطح تداخل شفت‌های با زبری 0.16 و 0.25 میکرومتر را نشان می‌دهد. نکته قابل ذکر دیگر این‌که سطح شفت دارای آبرکاری کروم سخت، پس از استخراج، هیچ‌گونه 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 آبرکاری را مطرح نمود.

با توجه به "شکل‌های 12 و 13" روشن است که افزایش زبری نه تنها باعث بالا رفتن استحکام اتصال می‌گردد بلکه موجب کاهش سایش در سطح شفت نیز خواهد شد. این مشاهدات در بررسی سطح تداخل دو نمونه دیگر قطعات با زبری 0.16 و 0.25 نیز تکرار گردید. در توجیه این مطلب می‌توان به این نکته توجه نمود که در قطعات زبری بالاتر، وجود قله‌های منفرد در سطح تداخل محتمل‌تر 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].

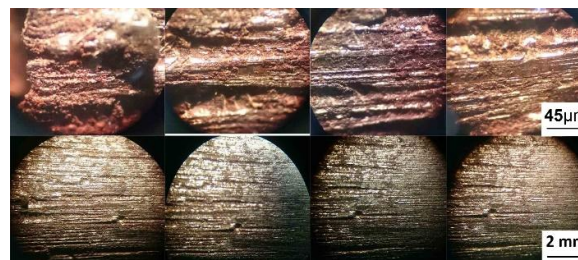


Fig. 12 Contact surface of decoupled shaft with roughness $Ra=0.16$

شکل 12 سطح تماس شفت دمونتاز شده با زبری 0.16 میکرومتر

- 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. Lamberton, 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. Beschoner, 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, Effect of plating and temperature 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 آبرکاری باشد. به هر حال قطعات آبرکاری 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 دمونتازژ کردن در سطح تداخل را نیز کاهش داد.

لازم به ذکر است که روش آبرکاری 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.

9-فهرست علائم

A	مساحت (m ²)
ES	استحکام استخراج (kgms ⁻²)
f	ضریب اصطکاک
F	نیرو (kgms ⁻²)

علائم یونانی

σ	تنش (kgm ⁻¹ s ⁻²)
---	--

زیر نویس‌ها

N	عمودی
r	شعاعی

10-مراجع

- [1] 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.