

# شبیه سازی اجزاء محدود پوشش WC-Co پاشش حرارتی بر غلتک پینچ رول نورد گرم

مهدی رضائی، محمود فرزین و فرشید احمدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهدی صالحی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

( دریافت مقاله : ۸۹/۱۲/۲۳ - پذیرش مقاله : ۹۰/۰۵/۲۲ )

## چکیده

در تحقیق حاضر ضخامت بهینه پوشش WC-Co پاشش شده به روش HVOF بر روی سطح غلتک پینچ رول نورد گرم به روش اجزای محدود بررسی شده است. وظیفه پینچ رول ورق گیری و هدایت ورق به طرف کویلرها است. محیط کاری این قطعات اسیدی است و در دما و رطوبت محیط کار می کنند. در اثر برخورد و حرکت ورق بر روی سطح این غلتکها، سایش حاصل می شود. ابتدا شرایط بحرانی عملکرد پینچ رول تعیین گردید. نتایج نشان داد وضعیت کاری پینچ رول در لحظه ضربه و برخورد اولیه ورق به آن سخت تر از غلتش بعدی ورق بر روی سطح این غلتک است. همچنین ورق های سخت و نازک برای پینچ رول وضعیت بحرانی تری را ایجاد می کنند. پس از اعمال پوشش بر پینچ رول، تحلیل ها نشان داد تحت ضربه، پوشش دچار تغییر شکل و شکست می شود. در این حالت بهترین ضخامت برای پوشش حدود ۶۰۰ میکرون حاصل شد که توزیع تنش برشی کمتری هم در سطح پوشش و هم در مرز پوشش با زیرلایه بوجود می آید.

واژه های کلیدی: غلتک پینچ رول، مدل اجزاء محدود، پوشش WC-Co، پاشش حرارتی HVOF، ضخامت پوشش.

## Finite element simulation of WC-Co coating sprayed on the surface of hot rolling pinch-roll

M. Rezaei, M. Farzin and F. Ahmadi

Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology

M. Salehi

Material Engineering Department, Isfahan University of Technology

(Received 13 March 2011, accepted 13 August 2011)

### Abstract

In this study optimal thickness of WC-Co spray coating by HVOF (High Velocity Oxy Fuel) method on the surface of hot rolling pinch-roll roller by utilizing finite element method were investigated. The task of pinch-roll was to get and guide sheets toward the coilers. The working environment of these components was acidic and they worked in temperature and humid ambient. The surface of these rollers was worn due to impact and movement of sheet on it. At first, the critical condition of pinch-roll was determined. Results showed that working condition of the pinch-roll at the initial impact was worse than other working times. Also hard and thin sheets made the more critical condition. After the surface of pinch-roll was coated analysis showed that deformation and failure were created in coating. In this condition the best thickness of coating was about 600 microns that caused minimum shear stress distribution both in the surface coating and in the interface of coating/substrate.

**Keywords:** Pinch roll, Finite element Method, WC-Co Coating, HVOF Thermal Spray, Coating Thickness.

**E-mail of corresponding author:** m.rezaei.me@gmail.com

## مقدمه

یکی از مهمترین قطعات بکار رفته در صنایع نورد، غلتک‌ها هستند که در بخش‌های مختلف دارای ابعاد، جنس و شرایط کاربرد متفاوت هستند. غلتک‌های کاری، پشتیبان، بریدل، مندریل، شارژ و دشارژ کننده کوره، رپرول و پینچ رول از آن جمله‌اند. بهینه‌سازی غلتک‌ها در صنعت و به‌خصوص غلتک‌های موجود در صنایع نورد که در تنش‌های بالایی کار می‌کنند همواره در دست انجام بوده است [۱]. پینچ رول‌ها دسته خاصی از غلتک‌ها هستند که بدون وارد آوردن تغییر یا صدمه در کیفیت هندسی یا سطحی محصول، در جابجایی یا هدایت ورق مورد استفاده قرار می‌گیرند. این غلتک‌ها را در صنایع مختلفی همچون صنعت فولاد، آلومینیوم، نساجی، کاغذسازی و نورد می‌توان یافت. پینچ رول مدنظر در این تحقیق در انتهای خط نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه در قسمت کوئل پیچی قرار دارد و وظیفه آن ورق‌گیری و هدایت ورق به طرف کوئلرها و یا همان کوئل پیچ‌ها است. غلتک‌های پینچ رول از جنس 2-DIN 20NiCrMo2 (SAE 8620) می‌باشند. جدول ۱ برخی خواص مکانیکی آن براساس استاندارد UNI و آزمایش‌های متالورژیکی صورت گرفته توسط واحد فنی نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه را نشان می‌دهد.

غلتک‌های پینچ رول پس از تولید با استفاده از روش کلادینگ<sup>۱</sup> تحت پوشش AISI 420 به ضخامت ۱۰ میلیمتر قرار می‌گیرند. میزان حرکت غلتک‌های پینچ رول و سرعت دورانی آنها متناسب با نوع و هندسه ورق نورد شده و سرعت خط تولید است. غلتک‌های پینچ رول در یک محیط کاری اسیدی و در دما و رطوبت محیط کار می‌کنند. در اثر برخورد و حرکت ورق‌ها بر روی سطح این غلتک‌ها، سایش در این قطعات بوجود می‌آید (مکانیزم اصلی سایش، سایش خراشان می‌باشد). ورق مورد نورد معمولاً سختی بسیار کمتری نسبت به پینچ رول دارد و نمی‌تواند موجب خرابی سطح غلتک پینچ رول شود. اما ذرات زاید خارجی (نظیر زایدات ناشی از نورد و ذرات سختی که همراه با خنک‌کار به سطح پینچ رول

پاشیده می‌شوند) می‌توانند سبب سایش سطح پینچ رول شوند. سطح پینچ رول بایستی نسبت به ترکیب و چسبیدن مواد خارجی هم مقاوم باشد (که در اثر بالا رفتن موضعی فشار و دما و گداخته شدن ورق رخ می‌دهد). این مساله باعث نفوذ مواد نامناسب در سطح و تضعیف و آسیب آن می‌گردد (در اصطلاح مقاومت به کنده شدن<sup>۲</sup> نامیده می‌شود). غلتک‌های پینچ رول به عنوان یکی از قطعات بحرانی در واحد نورد گرم می‌باشند که در کمتر از دو ماه تحت بازسازی قرار می‌گیرند. روش بازسازی آنها جوشکاری و اصلاح پوشش سایش یافته است [۲].

تاکنون بر روی پینچ رول تحقیقات چندانی صورت نگرفته و به نوعی می‌توان آنرا فراموش شده دانست. طبق نظر ژوزف [۳] با استفاده از برنامه ریزی صحیح تولید، توجه به درخواست و نیاز مشتریان، تقسیم‌بندی صحیح زمان کاری بین غلتک‌های مختلف، ساخت صحیح و مناسب غلتک‌ها و سیستم‌های نگهداری بهینه می‌توان عمر کاری را افزایش داد.

یکی از جنس‌های متداول پینچ رول با نام تجاری **Bemcalloy C-1** می‌باشد که نوعی چدن خاکستری هیپوئوتکتیک است. این ماده شامل عناصر سیلیکون، نیکل، کروم و مولیبدن است. این عناصر باعث ترکیبی از کاربید و گرافیت در چدن خاکستری خواهد شد که سبب دارا بودن خواص فوق تا حد زیادی برای پینچ رول خواهد شد [۴].

غلتک‌های پینچ رول پس از یک دوره عمر کاری مشخص، مورد بازسازی قرار می‌گیرند. سیکل اصلی بازسازی آنها شامل سنگ‌زنی و استفاده از فرآیند جوشکاری زیرپودری و کلادینگ می‌باشد. جهت افزایش عمر کاری و سختی غلتک‌های پینچ رول، برای اولین بار در کشور در مجتمع فولاد مبارکه ایده پوشش دهی سطح این غلتک‌ها از جنس کاربید تنگستن-کبالت<sup>۳</sup> مطرح گردید. هدف از تحقیق حاضر این بود که با استفاده از نرم‌افزار **ABAQUS**، پوشش ایجاد شده بر روی سطح غلتک پینچ رول شبیه‌سازی گردد و توزیع تنش و بارگذاری و ضخامت بهینه پوشش مورد ارزیابی واقع شود. در پوشش‌های ضخیم،

<sup>2</sup>. Pick-up

<sup>۳</sup>. WC-Co

<sup>1</sup>. Clading

جدول ۱. خواص مکانیکی فولاد غلتک پینچ رول

چگالی ( $\text{Kg/m}^3$ )	ضریب پواسون	مدول الاستیک (GPa)	کرنش نهایی (%)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
۷۸۶۰	۰/۲۹	۲۰۵	۰/۲۲	۷۸۶	۴۹۵

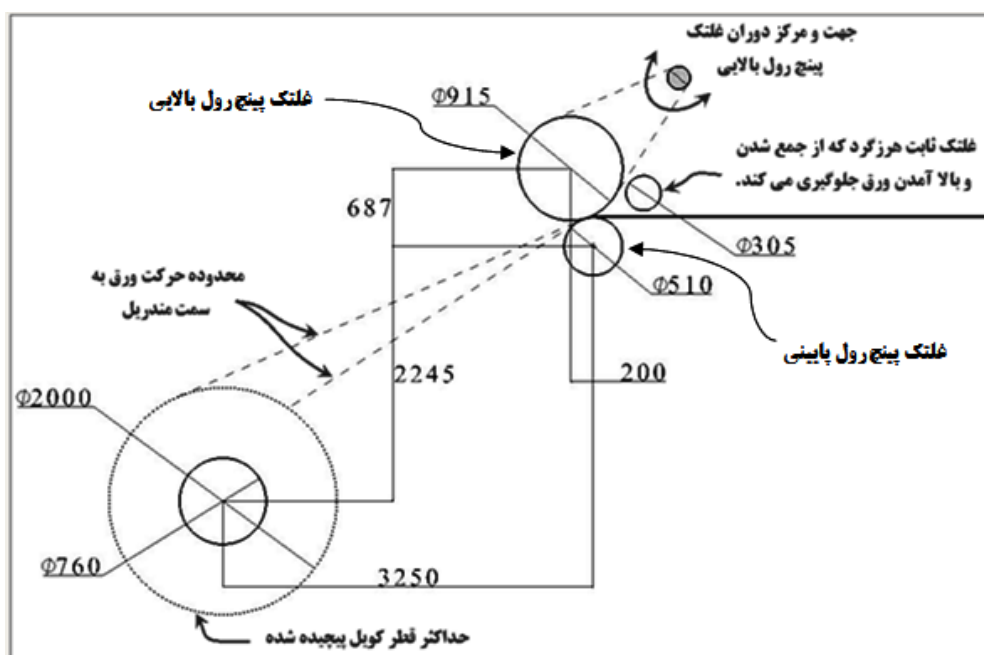
ضخیم را بطور استثنایی تولید کند به گونه‌ای که تنش‌های فشاری جایگزین تنش‌های کششی در پوشش نهایی شوند [۶]. این تنش فشاری به طور چشمگیری استحکام چسبندگی پوشش به زیر لایه را افزایش می‌دهد. همچنین خواص خستگی پوشش را هم بهبود می‌بخشد [۷]. صنعتگران بسیاری از کاربردهای جدید را برای این روش یافته‌اند که یکی از جالب توجه ترین آنها کاربرد پوشش‌های WC-Co است [۸].

#### مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر از نرم‌افزار تحلیل گر Abaqus 6.9 استفاده شد. این نرم‌افزار به دلیل قابلیت‌های بالا در تحلیل و شبیه‌سازی‌های شبه‌استاتیکی و دینامیکی، مورد توجه و کاربرد بسیاری از کاربران و مهندسان می‌باشد. شکل ۱ نمایی از ابعاد،

خواص اولیه و پایه زیرلایه و ماده پوشش به نوعی از هم مستقل بوده و پوشش به تنهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد و تامین کننده خواص مورد انتظار از آن است. اما در پوشش‌های نازک خواص زیرلایه اهمیت بالایی دارند و شرایطی از قبیل بارگذاری و شرایط مرزی (محیط اطراف) را برای پوشش القا می‌کند.

روش پاشش حرارتی پاشش با سرعت بالا با استفاده از مخلوط سوخت و اکسیژن<sup>۱</sup> یا HVOF به طور گسترده در صنایع مختلف کاربرد یافته است زیرا مقاومت به خوردگی، سایش و استحکام سایشی بالایی ایجاد می‌کند. پوشش ایجاد شده به روش HVOF در مقایسه با سایر روش‌های پوشش دهی دارای دانسیته بالا، سختی و استحکام باند پیوندی قابل توجهی است [۵]. در این روش علاوه بر اینکه باند پوشش ایجاد شده استحکام بالایی دارد، این امکان وجود دارد که پوشش‌های



شکل ۱. ابعاد و موقعیت هندسی قسمت‌های مرتبط با پینچ رول

<sup>1</sup> High Velocity Oxy Fuel = HVOF

تنگستن با شبکه پیوندی کبالت تشکیل شده است. این سرمت مقاومت به سایش فوق العاده بالایی دارد. در این تحلیل از پوشش با ترکیب WC-17Co با خواص مکانیکی داده شده در جدول ۳ استفاده شد [۹].

فرآیند کاری پینچرول را در حالت کلی می توان ۲ بخش دانست:

۱- ضربه اولیه ورق به غلتک های پینچرول

۲- قرارگیری ورق بین غلتک ها و غلتیدن بر روی آنها

زمان حل باید به اندازه ای تعیین شود که هر دو مرحله (تا زمان پایدار شدن شرایط توزیع تنش بر سطح غلتک ها) تامین شود و بتوان در مدل نتایج مربوطه را مشاهده کرد.

یکی از فاکتورهای موثر در کاهش زمان حل مساله در حل های صریح<sup>۴</sup> استفاده از ضریب جرمی<sup>۵</sup> است. براساس نوع حل و ابعاد مش انتخابی برای حل و سایر متغیرهای مربوطه، برای تعیین ضریب جرمی مناسب، با توجه به نزدیک بودن نوع شرایط مساله با تحقیق صورت گرفته توسط کاینز و همکارانش [۱۰]، امکان استفاده از پارامترها و مقادیر آن وجود داشت. پس از بررسی های متعدد در نهایت مقدار ضریب جرمی برابر با ۱۰۰ تعیین و به کل قسمت مدل مربوط به غلتک پینچرول اعمال گردید (این یکی از مهمترین مراحل این تحقیق بود زیرا حل اولیه ای که به علت تعداد زیاد المان های میکرونی با آبرایانه دانشگاه صنعتی اصفهان حدود چهار روز به طول انجامید، با اعمال ضریب جرمی مناسب به حدود پنج ساعت با یک رایانه دوهسته ای معمولی تبدیل شد).

موقعیت هندسی و فواصل غلتک ها و قطعات در ارتباط با قسمت پینچرول را به صورت ساده شده نشان می دهد. هر دو غلتک پینچرول حول محورشان دوران دارند درحالی که غلتک پینچرول پایینی در محلش ثابت است و غلتک پینچرول بالایی مطابق شکل ۱ حول مرکز دورانش دوران کرده و فاصله بین دو غلتک برای هر ورق بدست می آید.

با توجه به تغییر شکل ناچیز در راستای عمود بر صفحه، جهت شبیه سازی از مدل دوبعدی و با ابعاد واقعی استفاده شد. در این مدل از غلتک بالایی و نگهدارنده افقی ورق به صورت صلب تجزیه ای<sup>۱</sup>، غلتک پایینی و ورق به صورت تغییر شکل پذیر<sup>۲</sup> و یک حلقه کامل جهت دوران در مرکز غلتک پایینی به صورت صلب جداشونده<sup>۳</sup> استفاده شده است (غلتک پایینی با یک حفره کوچک توخالی مدل شد). ورق مماس با سطح غلتک پایینی و تا نزدیک غلتک بالایی آورده شده است. غلتک پایینی به علت شرایط لازم برای مش ریزی، به تعداد زیادی دوایر هم مرکز و به صورت شعاعی به چهار قطاع ۹۰ درجه ای پارتیشن بندی گردید.

در بین ورق های تولیدی نورد گرم، سخت ترین ورق (گرید ۵ استاندارد داخلی فولاد مبارکه) مطابق جدول ۲ برای استفاده در مدل شبیه سازی به کار گرفته شد. علت این انتخاب، سختی و استحکام بالاتر ورق و اعمال نیروی بیشتری است که از سوی پینچرول برای انحراف مسیر آن لازم است. جنس مغز فولادی غلتک هم مطابق جدول ۱ تنظیم گردید. WC-Co اولین ترکیب رایج از کاربردهای زینتر شده است که از ترکیب کاربرد

جدول ۲. خواص مکانیکی ورق های سخت مورد بررسی در تحلیل ها

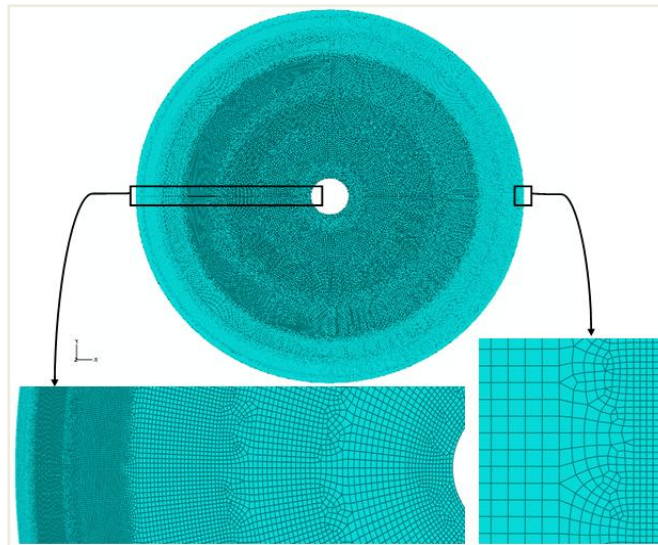
چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
۷۸۵۰	۲۰۰	۰/۲۶	۴۹۲	۵۶۷	۰/۲۳

جدول ۳. خواص مکانیکی پوشش کاربید تنگستن-کبالت اعمال شده در تحلیل [۹]

چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)
۱۴۱۰۰	۳۲۰	۰/۲	۱۵۰۰

4. Explicit  
5. Mass scale

1. Analytical Rigid  
2. Deformable  
3. Discrete Rigid



شکل ۲. نمونه ای از غلتک کامل با المان‌های ایجاد شده بر آن

### نتایج و بحث

ابتدا لازم است صحت مدل ارایه شده و درستی نتایج حاصل از آن تایید شود. رفتار حرکتی ورق پس از عبور از پینچ رول و انحراف به سمت قسمت کویلر حاصل از مدل اجزای محدود در شکل ۳ نشان داده شده است. میزان و زاویه انحراف ورق در مدل اجزای محدود با مقدار واقعی خط (۳۵-۳۰ درجه) مطابقت بالایی داشت. همچنین شکل ۴ توزیع تنش برشی در سطح غلتک بدون پوشش و تغییر شکل ایجاد شده در آن را نشان می‌دهد که با تغییر شکل‌های میکرونی سطح غلتک پینچ رول واقعی یکسان است. در لحظه برخورد ورق به پینچ رول، ضربه شدید و نیروی زیادی به آن وارد می‌کند.

نتایج تحلیل‌ها نشان داد ضربه اولیه ورق به پینچ رول به مراتب تنش بیشتری را نسبت به مرحله گرفتن و قرارگیری ورق بین غلتک‌های پینچ رول ایجاد می‌کند و حتی با وجود سخت‌تر و با استحکام‌تر بودن غلتک نسبت به ورق، در سطح آن آسیب ایجاد می‌کند (شکل ۴). البته ورق نسبت به غلتک از جنس نرم‌تری برخوردار است اما استفاده از مش درشت‌تر برای ورق در محل تماس با غلتک (به جهت کاهش زمان حل مساله) می‌تواند باعث سخت‌تر شدن کاذب آن گردد. این حالت باعث شدیدتر شدن اثر ضربه و عدم تغییر شکل ورق در محل ضربه به غلتک می‌شود. مطابق شکل ۵ مدل دیگری برای مقایسه آماده گردید که در آن المان‌های ورق و سطح غلتک در محل تماس و

در این تحلیل ورق با دو غلتک بالا و پایینی پینچ رول و تکیه‌گاهی که برای زیر آن تعریف گردید (و در حکم میز غلتکی بود) تماس داشت. تماس ورق با تکیه‌گاه زیرین آن بدون اصطکاک و سخت<sup>۱</sup> و با غلتک‌ها به صورت سخت و با ضریب اصطکاک مماسی معادل ۰/۳ تعریف گردید [۱۱]. به منظور دوران غلتک پایینی از یک حلقه صلب استفاده شد که به حفره داخلی غلتک پینچ رول پایینی به صورت یکپارچه گره زده شد. براساس نتایج ارایه شده توسط کاینز لازم است قطر این حلقه صلب در مقایسه با قطر خارجی غلتک کوچکتر باشد [۱۰].

آسیب‌های سطحی غلتک و پوششی که قرار است بر آن اعمال شود، در ابعاد میکرونی هستند، لذا باید در روی سطح غلتک المان‌های میکرونی داشت و با نزدیک شدن هرچه بیشتر به سمت مرکز غلتک، که دقت و حساسیت کمتری وجود دارد، المان‌ها درشت‌تر شوند. علاوه بر این برای توزیع تنش صحیح در محل تماس ورق و غلتک، بایستی حداقل ۲۰ المان همزمان درگیر باشند [۱۰]. نوع المان اختصاص یافته به صورت ۴ گرهی کرنش صفحه‌ای با انتگرال کاهش یافته<sup>۳</sup> برای غلتک و ورق در نظر گرفته شد. شکل ۲ مدل مش ریزی شده غلتک پینچ رول است.

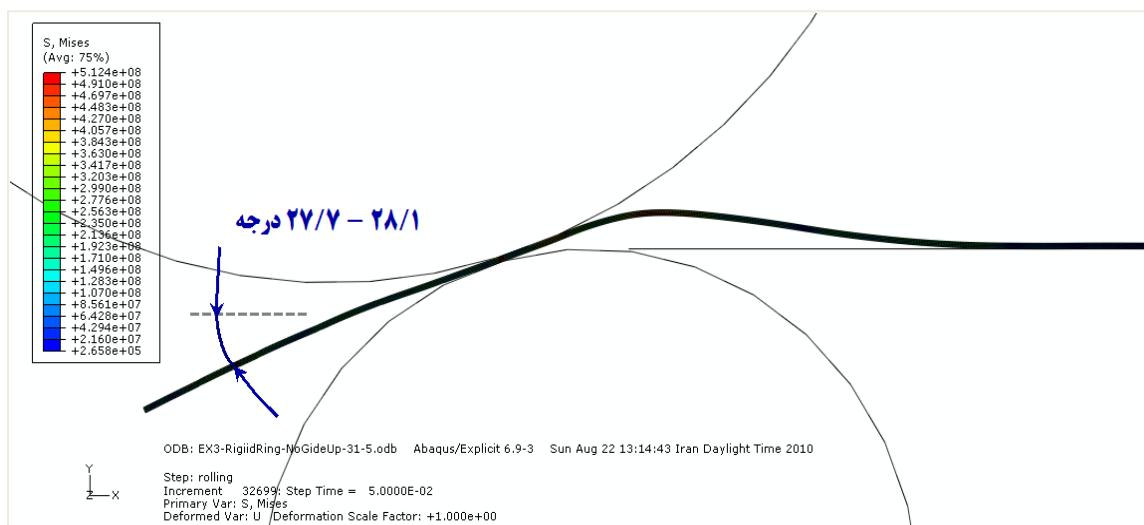
<sup>1</sup>. Hard

<sup>2</sup>. Tie

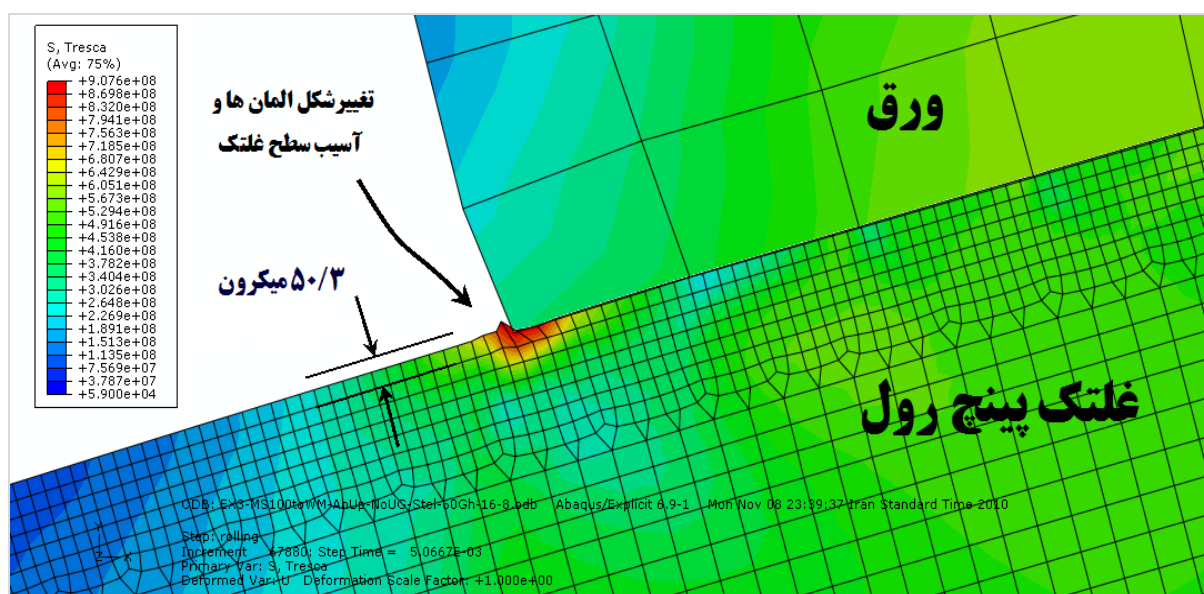
<sup>3</sup>. CPE4R: A 4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration, hourglass control.

می توان در این مطلب دانست که اثر اصلی ورق در این فرآیند به سرعت آن برمی گردد و سرعت و ضربه زیاد آن به غلتک، عامل اصلی تخریب است. نمودار نیروی وارد بر غلتک در حالت واقعی که از گراف های مجتمع فولاد مبارکه استخراج گردیده است (شکل ۶)، به خوبی این ضربه شدید را در ابتدا و انتهای عبور ورق از پینچ رول نشان می دهد. در تمام نمودارهای تنش بدست آمده از مدل اجزای محدود هم این نقطه اوج اولیه

ضربه از ابعاد یکسانی برخوردار بودند. در این حالت با توجه به دقیق تر شدن رفتار ورق، در حالت کلی اثر آن بر روی غلتک ملایم تر و کمتر گردید. نتایج نشان داد تا حدود کمی مقادیر تنش کاهش یافت و تغییر شکل کمتری را در سطح غلتک پینچ رول ایجاد شد، اما در روند کلی نتایج و پاسخ ها تغییر چندانی وارد نکرد یعنی مقادیر تنش ها زیاد و بیشتر از حد تسلیم پوشش و همچنین استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه بود. علت را

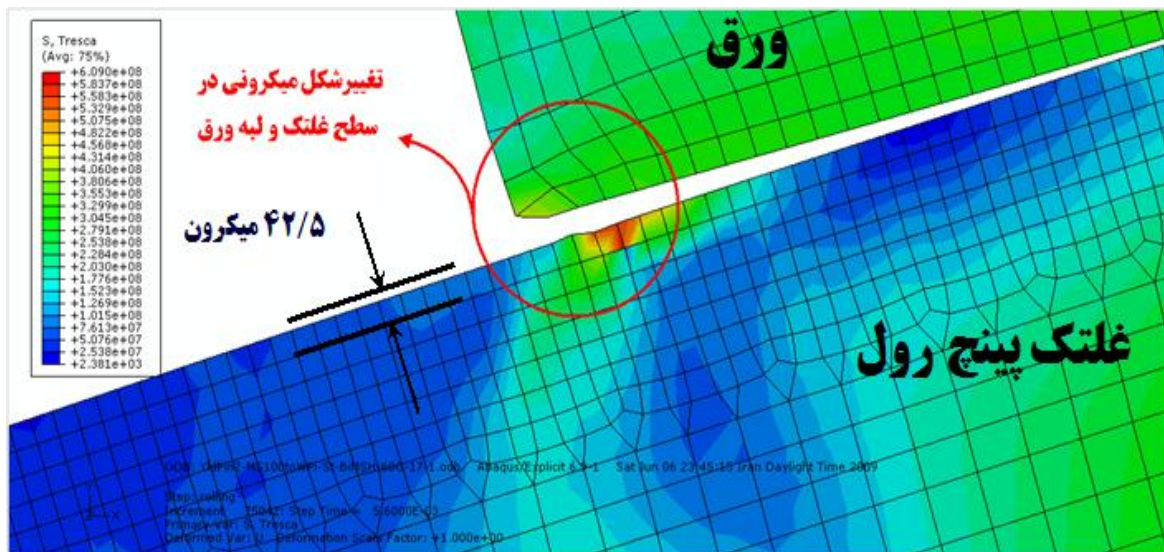


شکل ۳. رفتار حرکتی ورق در قبل و بعد از پینچ رول و میزان تقریبی انحراف مسیر آن به سمت کویلر



شکل ۴. توزیع تنش برشی در غلتک پینچ رول و تغییر شکل میکرونی ایجاد شده در سطح آن در اثر برخورد

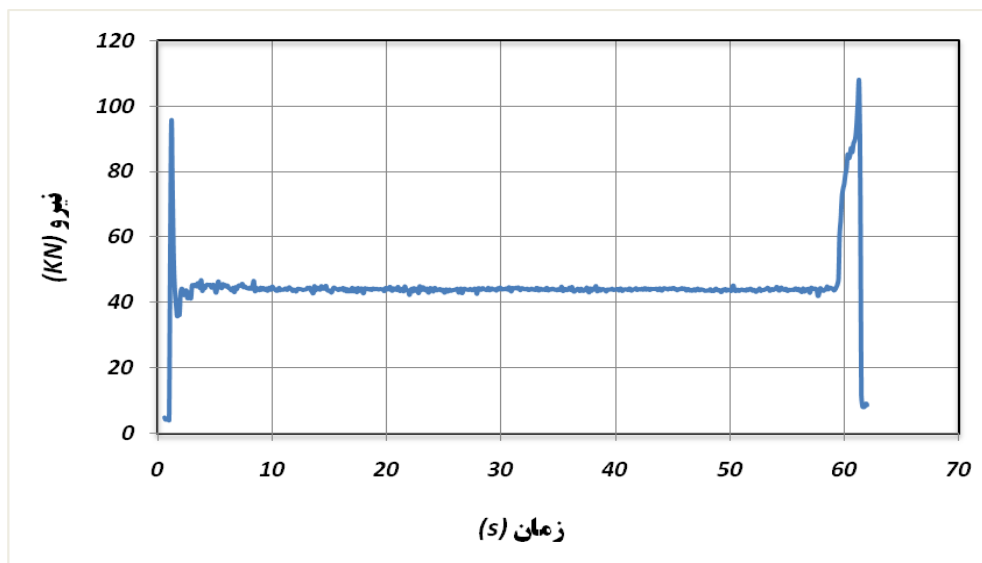




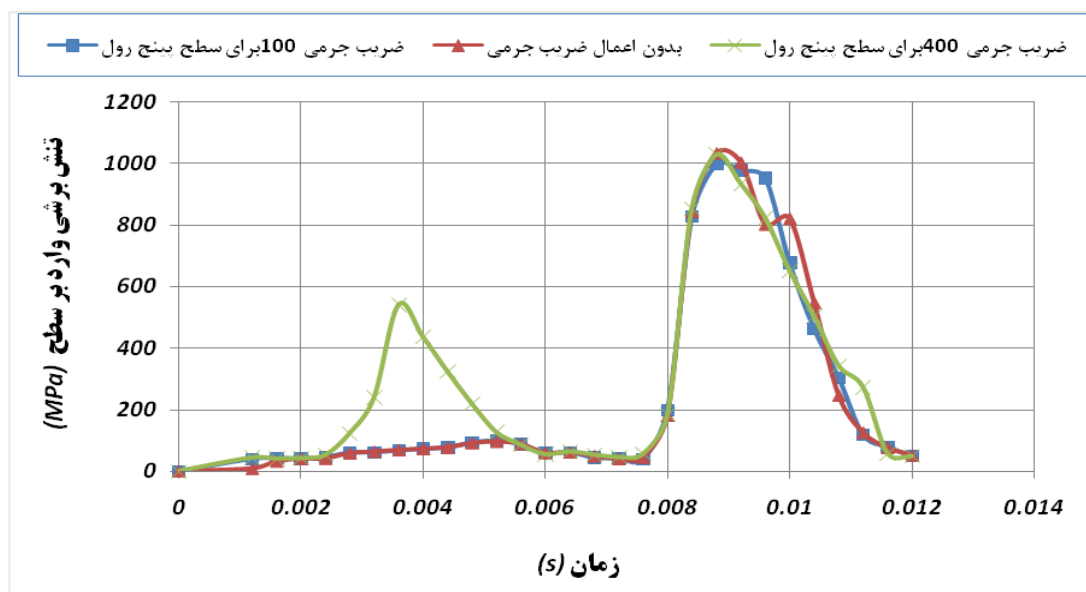
شکل ۵. توزیع تنش برشی و تغییر شکل ایجاد شده در غلتک و ورق در حالت استفاده از مش میکرونی برای ورق در محل تماس با غلتک

دوبعدی بودن مدل عرض ورق به طور مستقیم در تحلیل اثر ندارد. فقط با افزایش عرض، جرم ورق افزایش و سرعت آن کاهش می یابد که کاهنده اثر ضربه است. نمودارهای شکل های ۷ و ۸ به ترتیب صحت مقدار و حوزه اعمالی مناسب برای ضریب جرمی در غلتک پینچ رول را نشان می دهند (در اینجا ضریب جرمی به ورق اعمال نشد زیرا اگر ورق هم مشمول ضریب جرمی شود، جرم آن افزایش یافته و اثر ضربه و نیروی آن بر غلتک بیشتر خواهد شد). توزیع تنش برشی در راستای عمق نکته مهمی است که در

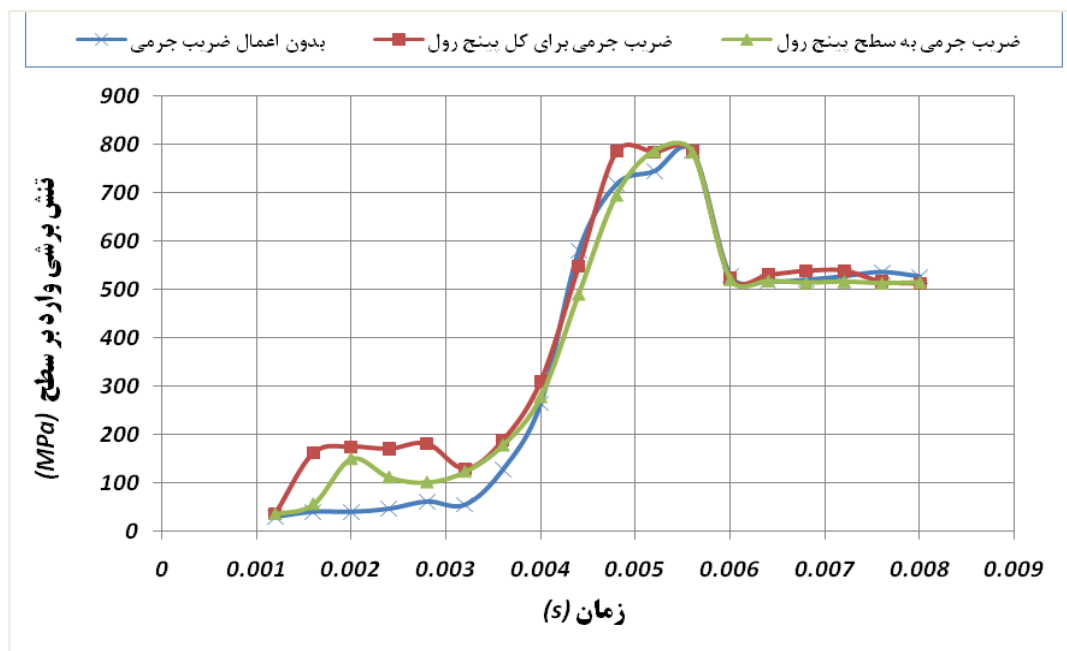
در اثر ضربه شدید ورق به پینچ رول وجود دارد. هر چقدر ورق از گرید سخت تری برخوردار باشد، نیروی بیشتری جهت گرفتن و انحراف مسیر آن لازم است. در نتیجه فشار بیشتری بر پینچ رول وارد می شود و تنش بالاتری بر آن اعمال خواهد شد. علاوه بر گرید ورق، عرض و ضخامت آن هم در تعیین شرایط بحرانی عملکرد پینچ رول اهمیت دارند. نتایج تحلیل ها نشان داد ورق نازک تر که سرعت بالاتری داشت توزیع تنش بیشتری را در پینچ رول ایجاد کرد. در حقیقت سریع تر بودن ورق نازک تر اثر ضربه و تمرکز تنش آن بر پینچ رول را تقویت نمود. به علت



شکل ۶. نمودار نیروی وارد بر غلتک پینچ رول در حالت واقعی (نقطه اوج نمودار مربوط به ضربه ورق به غلتک در زمان ورود و خروج آن است)



شکل ۷. نمودار توزیع تنش برشی نسبت به زمان در حالات مقادیر مختلف ضریب جرمی

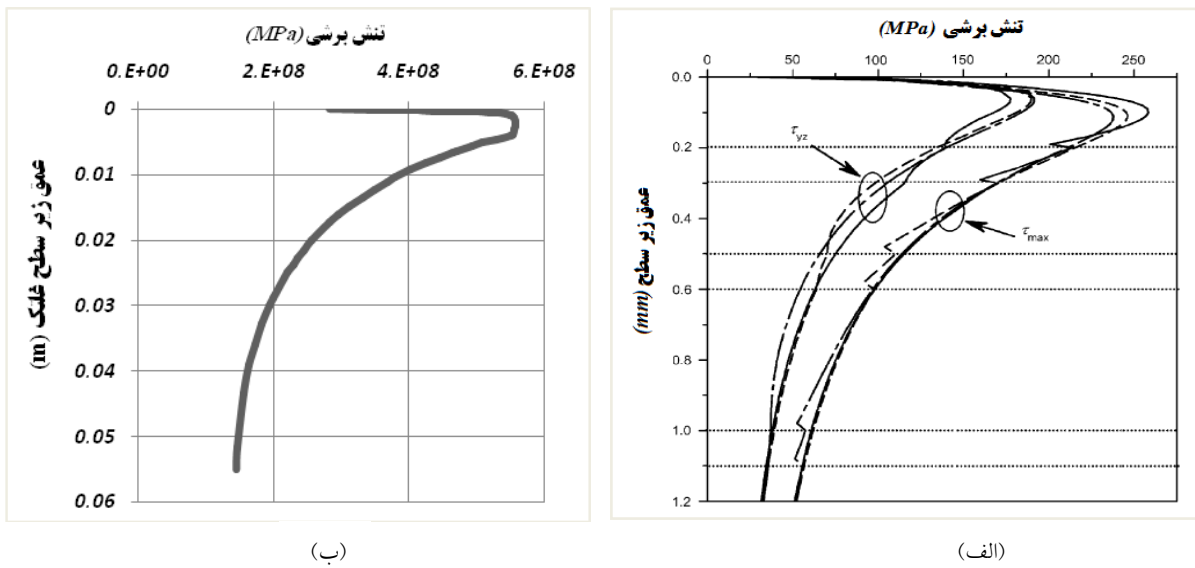


شکل ۸. نمودار توزیع تنش برشی نسبت به زمان در حالات مختلف محدوده اعمال ضریب جرمی

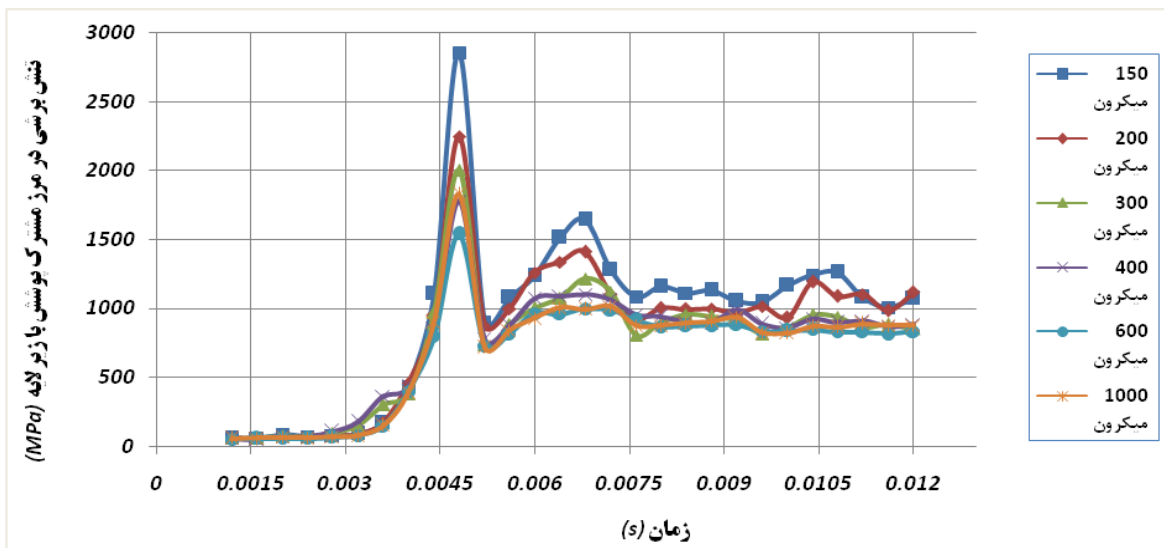
لایه پوشش از زیرلایه دارد. فرارگیری ماکزیمم تنش برشی در مرز مشترک بین پوشش با زیرلایه و بیشتر بودن مقدار آن نسبت به استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه باعث کنده شدن و لایه لایه شدن پوشش می شود. شکل ۱۰ به صورت مقایسه ای نمودار ماکزیمم تنش برشی در مرز مشترک را برای پوشش ها با ضخامت های مختلف نشان می دهد.

محدوده نزدیک به سطح اهمیت دارد. بنابر تحقیق فیوجی و همکارانش [۱۲] توزیع تنش برشی در راستای عمق به صورت شکل a-۹ است. در پروژه حاضر هم توزیع تنش برشی در راستای عمق بدست آمد که در شکل b-۹ نشان داده شده است و می تواند مورد مقایسه قرار گیرد. تنش برشی اهمیت بالایی در تشکیل و رشد ترک در پوشش و جدا شدن





شکل ۹. توزیع تنش برشی از سطح به عمق، (الف): براساس تحقیق فیوجی و همکارانش [۱۲] ، (الف): تحلیل صورت گرفته در تحقیق حاضر



شکل ۱۰. نمودار توزیع تنش برشی در مرز مشترک پوشش- زیرلایه در پوشش با ضخامت مختلف

### نتیجه گیری

نازک تر بودن ورق های نازک اثر تمرکز تنش بیشتری را در لحظه برخورد به پینچ رول به همراه دارند.  
 ۳- نتایج نشان داد اثر ضربه اولیه ورق بر روی پینچ رول بحرانی تر از غلتش بعدی آن است. اثر ضربه ورق بر پینچ رول و تغییر شکلی که بر سطح آن ایجاد می کند به خوبی با شبیه سازی صورت گرفته مشخص شد. ورق با وجود نرم تر بودن نسبت به غلتک، اما در سطح آن آسیب های میکرونی ایجاد می نماید.  
 ۴- در حالت کلی استفاده از پوشش می تواند خواص سطحی قطعات را ارتقا دهد. در اینجا پوشش کاربید تنگستن- کبالت

در این پروژه غلتک پایینی پینچ رول خط نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه اصفهان شبیه سازی و تحلیل شد. به منظور افزایش عمر کاری غلتک از ایده پوشش دهی پینچ رول استفاده شد. در نهایت نتایج زیر حاصل گردید:  
 ۱- ورق های سخت (گرید ۵ تولیدی مجتمع فولاد) به علت استحکام و سختی بالاتر نیرو و تنش بیشتری را برای تغییر مسیر و انحراف توسط پینچ رول به آن وارد می کنند.  
 ۲- ورق های نازک به علت سرعت بالاتر نسبت به ورق های ضخیم، اثر ضربه بیشتری بر پینچ رول وارد می کنند. به علاوه که

#### منابع

۱. مرکز پژوهش و مهندسی سطح ایران، هسته تحقیقاتی سایش، شهرک علمی تحقیقاتی اصفهان، ۱۳۸۸.
  ۲. واحد طراحی و مهندسی معکوس، شناسنامه فنی پینچ رول پایینی، شرکت مهندسی ایکا، فولاد مبارکه، ۱۳۸۷.
  3. S. Joseph, *Engineered Solutions for the Improvement of Hot and Cold Mill Rolls and applications*, Quality Systems Manager, Metal Refinishing and Improvements, North East, (2004).
  4. R. Deach and M. Steve, *Recent Developments in Coiler Pinch Roll Technology*, Cincinnati, Ohio, (2002)45241-2283.
  5. A. A. Boudi, M. S. J. Hashmia and B. S. Yilbas, *ESEM evaluation of Inconel-625 thermal spray coating (HVOF) onto stainless steel and carbon steel post brine exposure after tensile tests*, Journal of Materials Processing Technology, 173(2006)44-52.
  6. [www.fst.nl-upload-images-processhvo\\_f\\_files/page00042.htm](http://www.fst.nl-upload-images-processhvo_f_files/page00042.htm)
  7. M. Loch, G. Barbezat, and P. Meyer, *Progress in the area of low pressure plasma spraying*, ITSC 2002 Essen, Germany, (2002)347-350.
  8. R. Ahmed, *Contact fatigue failure modes of HVOF coatings*, Elsevier Science, Wear, 253(2002)473-487.
  9. E. Bemporad, M. Sebastiani, F. Casadei and F. Carassiti, *Modelling, production and characterisation of duplex coatings (HVOF and PVD) on Ti-6Al-4V substrate for specific mechanical applications*, Surface & Coatings Technology, 201(2007)7652-7662.
  10. A. Kainz, K. Krimpelstatter and K. Zeman, *FE - Simulation of Thin Strip and Temper Rolling Processes*, ABAQUS Austria Users' Conference, (2003)24-25.
  ۱۱. ولی نژاد، ع، جداول و استانداردهای مکانیکی، نشر طراح، چاپ هشتم، تهران، ۱۳۸۴.
  12. M. Fujii, J. Ma, A. Yoshida, S. Shigemura and K. Tani, *Influence of coating thickness on rolling contact fatigue of alumina ceramics thermally sprayed on steel roller*, Tribology International, 39(2006)1447-1453.
- پاشش شده به روش HVOF بر روی سطح پینچ رول بررسی شد. استفاده از این پوشش اگرچه تا حدی مقاومت سطح قطعه را افزایش داد، اما چون از اساس ماده تردی بود و تحمل و مقاومت در برابر ضربه را نداشت، تحت ضربه اولیه دچار شکست و تخریب شد. در این حالت تنش برشی بسیار مهم و حیاتی است و قرارگیری ماکزیمم تنش برشی در مرز مشترک پوشش - زیرلایه موجب کنده شدن و جدایش پوشش از زیرلایه است. بایستی ضخامت پوشش به حدی باشد که این مقدار ماکزیمم تنش برشی در مرز و در زیرلایه قرار نگیرد.
- ۵- با وجود اینکه پوشش های اعمال شده بر روی سطح نتوانستند تامین کننده هدف افزایش عمر کاری پینچ رول باشند، اما در مقایسه نسبی انجام شده، افزایش ضخامت پوشش تا حدود ۶۰۰ میکرون وضعیت تحمل و استحکام غلتک را بیشتر کرد. با افزایش ضخامت بیش از این مقدار تا حدود ۱۰۰۰ میکرون، شرایط عوض شد و وضعیت تنش در سطح پینچ رول بدتر شد. افزایش ضخامت پوشش در روش HVOF بیش از ۱۰۰۰ میکرون رایج نیست. پوشش با ضخامت ۶۰۰ میکرون را می توان پوشش با ضخامت بهینه معرفی کرد.