

ارای رابطه ریاضی چقرمگی شکست پوشش های نیکل - فسفر تابع ضخامت بر اساس داده های آزمایشگاهی

کریم زنگنه مدار

مجتمع دانشگاهی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

فخرالدین اشرفی زاده و سید محمود منیرواقفی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این مقاله با استفاده از داده های آزمایشگاهی، یک رابطه ریاضی برای تعیین چقرمگی شکست پوشش های نیکل - فسفر بر حسب ضخامت آنها ارای شده است. برای این منظور ابتدا پوشش ها یی از نیکل - فسفر با ضخامت مختلف بر سطح زیرلایه فولادی اعمال شده و سپس تحت عملیات حرارتی در اتمسفر خنثی به مدت ۱ ساعت در دمای 400°C قرار گرفتند. از طریق روش فرو رونده ویکرز (Vickers Indentation) چقرمگی شکست پوشش ها $1-3\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ تعیین گردید. همچنین مشخص شد که پوشش های ضخیم در مقایسه با پوشش های نازک، از چقرمگی شکست کمتری برخوردار می باشند. روابط چقرمگی شکست به صورت توابع مختلفی از ضخامت، استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین میزان میانگین مربعات خطای نسبی (Mean Square Relative Error) برای روابط و مدل های نهایی محاسبه شد. نتایج بررسی تغییرات چقرمگی شکست بر حسب ضخامت پوشش نشان می دهد که بین داده ها ی حاصل از مدل $K_c=f(t, t^2)$ و داده های آزمایشگاهی، سازگاری بسیار خوب و کمترین میزان خطا وجود دارد.

کلمات کلیدی: رابطه ریاضی، الکترولس نیکل، ضخامت پوشش، چقرمگی شکست، فرو رونده ویکرز

The mathematical relation for fracture toughness of Ni-P coatings versus thickness on the base of experimental data

k. Zangeneh Madar

Materials University Complex, Malek Ashtar Univeristy of Technology

F. Ashrafizadeh and S. M. Monir Vaghefi

Department of Engineering Materials, Isfahan University of Technology

Abstract

In this paper, a mathematical relation is presented to determine fracture toughness of Ni-P coatings related to its thickness on the basis of experimental data. For this purpose, Ni-P coatings with various thickness were deposited on the steel substrate and then heat treated for 1 hr in 400°C . Fracture toughness of the coatings was estimated $1-3\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ by Vickers indentation method. It was found that thick coatings have lower K_c compared to thin ones. Fracture toughness relations (models) were analysed as different functions. Mean square relative error (MSRE) was calculated for final (models). The results showed less MSRE as well as good agreement between model I ($K_c=f(t, t^2)$) and the experimental data.

Keywords: Mathematical relation, Nickel electroless, Coating thickness, Fracture toughness, Vickers indentation

E-mail of corresponding authors: zangenek@yahoo.com, ashrafif@cc.iut.ac.ir, vagh-mah@cc.iut.ac.ir

مقدمه

استفاده از پوشش های الکترولس نیکل - فسفر در صنایع شیمیایی و مصارف تریبولژیکی به دلیل مقاومت خوردگی و سایشی عالی آنها، همواره در حال گسترش است [۱-۳]. این خواص عالی پوشش های نیکل - فسفر تابع مشخصه های پوشش (شامل ضخامت، ترکیب و ساختار) ، پارامترهای فرآیند الکترولس (نظیر ترکیب، دما و pH حمام) و فاکتورهای عملیات تکمیلی (مانند دما و زمان آنیل) می باشد. از میان عوامل فوق، ضخامت پوشش های نیکل-فسفر نقش تعیین کننده ای بر کارایی و دوام آنها دارد به طوری که افزایش ضخامت، باعث افزایش قابل ملاحظه در مقاومت خوردگی و سایشی این پوشش ها می شود.

اصولاً پوشش های الکترولس نیکل را می توان از ضخامت های بسیار کم تا ضخامت های زیاد بر سطح قطعات اعمال نمود که در این میان، پوشش های با ضخامت ۳ تا ۱۰ میکرون از کاربرد بیشتری برخوردارند [۴]. این پوشش ها طبق استاندارد های آلمان (DIN ۵۰۹۶۶) و آمریکا (ASTM B ۷۳۳) از لحاظ ضخامت و بر اساس خواص مورد انتظار و شرایط کاری و محیطی، به گروه های مختلفی تقسیم بندی می شوند. طبق هر دو استاندارد فوق، پوشش های ضخیم تر نیکل - فسفر، از قدرت حفاظت بیشتری نسبت به پوشش های نازک تر، برخوردار بوده ، بنابراین افزایش ضخامت پوشش، در مواردی که خوردگی و سایش غالب ترین مکانیزم های تخریب باشند، عمر مفید قطعات صنعتی را به طور مضاعف افزایش می دهد [۵، ۱]. به هر حال مواردی وجود دارد که استفاده از پوشش های ضخیم نیکل-فسفر را محدود می سازد . رسوب پوشش های ضخیم نیکل-فسفر بر سطح برخی قطعات (مثل فولادها)، صرف نظر از محدودیت های اقتصادی مربوط به طولانی بودن فرآیند پوشش دهی، می تواند استحکام چسبندگی و نیز مقاومت خستگی پوشش /زیرلایه را، به دلیل افزایش تنش های داخلی در پوشش، تا حد زیادی کاهش دهد [۶-۱۳]. در اینگونه موارد، با توجه به اینکه

میزان افت خواص خستگی و چسبندگی پوشش /زیرلایه، با کاهش ضخامت پوشش تنزل می یابد استفاده از پوشش های نازک نیکل-فسفر به جای پوشش های ضخیم، ارجح تر خواهد بود . البته تحت چنین شرایطی، قطعاً پوشش نازک از مقاومت سایشی و یا خوردگی بالا بی برخوردار نخواهد بود.

اگرچه تحقیقات وسیعی بر روی اثر ضخامت پوشش های الکترولس نیکل بر رفتارهای خوردگی، سایشی و خستگی آنها انجام شده، لیکن در مورد اثر ضخامت این پوشش ها بر رفتار شکست آنها اطلاعات زیادی در دست نیست . به عقیده برخی محققین، چقرمگی شکست پوشش های الکترولس نیکل مستقل از ضخامت بوده و بیشتر به نوع ساختار (آمورف یا کریستالی) و نیز شرایط عملیات حرارتی آنها بستگی دارد [۱۴، ۱۵]. برخی دیگر نیز معتقدند افزایش ضخامت پوشش ها، به طور کلی باعث افت چقرمگی شکست آنها می شود [۱۶]. به هر حال ، انتظار می رود که ضخامت پوشش های نیکل - فسفر، علاوه بر رفتارهای خوردگی، سایشی و خستگی، بر رفتار اشاعه ترک و چقرمگی شکست آنها نیز (به دلیل تأثیر بر تنش داخلی) اثرگذار باشد.

در مقاله حاضر ابتدا با استفاده از داده های آزمایشگاهی حاصل از روش فرو رونده ویکرز، که به عنوان یکی از روش های مهم ارزیابی چقرمگی شکست پوشش های ترد و سخت محسوب می شود [۱۷-۱۹]، به ارای رابطه ریاضی چقرمگی شکست پوشش های الکترولس نیکل بر حسب ضخامت پرداخته شده و سپس اعتبار این رابطه مورد ارزیابی قرار می گیرد.

روش تحقیق

نمونه هایی از فولاد AISI ۴۱۴۰ تهیه و پس از مراحل مختلف آماده سازی سطح، در حمام الکترولس نیکل متشکل از سولفات نیکل و هیپوفسفیته سدیم، در دمای 90°C و pH حدود ۴/۶ واقع شدند. طی زمان های غوطه وری ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۸۰ دقیقه، پوشش هایی از نیکل

میانگین مربعات خطای نسبی آنها (MSRE) نسبت به داده های آزمایشگاهی، طبق رابطه (۵) مورد بررسی قرار گرفت.

$$MSRE = \left\{ \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N [(Vc, i - Ve, i) / N]^2 \right) \right\}^{1/2} \quad (5)$$

در رابطه فوق، N تعداد داده ها برای یک مدل، Vc, i مقدار محاسبه شده از مدل و Ve, i مقدار آزمایشگاهی می باشد. از میان مدل های استخراج شده، مدلی که خطای کمتر و انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی نشان داد به عنوان مدل مناسب انتخاب شد.

نتایج و بحث

۳- تعیین چقرمگی شکست پوشش ها

شکل ۱ تغییرات $P-a\sqrt{l_e}$ برای پوشش های با ضخامت ۶ تا ۳۶ میکرون را نشان می دهد. چنانچه مشاهده می شود نقاط موجود در هر نمودار با تقریب خوبی بر روی یک خط مستقیم قرار گرفته اند. بنابراین چقرمگی شکست پوشش ها که بر اساس رابطه (۱) متناسب با شیب خط مذکور می باشد، به راحتی قابل تعیین است. مقایسه نمودارها حاکی از آن است که اولاً چقرمگی شکست پوشش ها در محدوده $3-1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ قرار گرفته که این مقادیر در تطابق با یافته های سایر محققین می باشد [۱۴، ۱۵]. دوم چقرمگی شکست پوشش ها با افزایش ضخامت آنها کاهش می یابد که این موضوع را می توان به افزایش تنش داخلی در پوشش ها نسبت داد [۱۳].

بر اساس مطالعات Bozzini گرچه پوشش های خام نیکل-فسفر از چقرمگی شکست نسبتاً بالا برخوردارند ($7/4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)، ولی پس از عملیات حرارتی در دمای 400°C ، چقرمگی شکست آنها به شدت کاهش می یابد [۱۴]. این موضوع با توجه به سختی بسیار بالای پوشش های عملیات شده در دمای فوق (حدود 1000°C ویکرز) کاملاً قابل انتظار است. چنین پوشش هایی در حین عملیات (به دلیل انقباض حجمی ناشی از تبدیل نیکل آمورف به کریستالی و تشکیل Ni_3P) و همچنین در حین سرد شدن از دمای عملیات (به دلیل تفاوت ضرایب انبساط

حاوی $10-8\%$ فسفر به ضخامت های ۶، ۱۲، ۲۴ و ۳۶ میکرون بدست آمد. پوشش های حاصله تحت عملیات حرارتی در اتمسفر خنثی به مدت ۱ ساعت در دمای 400°C قرار گرفتند. چقرمگی شکست پوشش ها از طریق انجام آزمون فرو رونده ویکرز تحت نیروهای ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و 300°C نیوتن مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور قطر اثر فرو رونده و نیز طول کل ترک های ایجاد شده در امتداد رئوس و اطراف اثر فرو رونده در هر نیروی اعمالی، از طریق مشاهدات میکروسکپ نوری اندازه گیری شد. مقادیر چقرمگی شکست پوشش ها با استفاده از رابطه (۱) و ترسیم نمودارهای $P-a\sqrt{l_e}$ و از طریق محاسبه شیب خطوط حاصله، تعیین گردید [۱۴، ۱۵].

$$K_c = 0.032 P / (a\sqrt{l_e}) \quad (1)$$

در رابطه فوق، P نیروی اعمالی آزمون ویکرز [N]، l_e طول ترک معادل ایجاد شده در امتداد یک رأس اثر فرو رونده [μm] و K_c چقرمگی شکست پوشش [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$] می باشد. همچنین a نصف قطر اثر فرو رونده [mm] بوده که از طریق رابطه زیر، با نیروی اعمالی ارتباط دارد [۲۰]:

$$a = k\sqrt{P} \quad (2)$$

با توجه به اینکه در پوشش های این تحقیق، علاوه بر ترک های امتداد رئوس، ترک های دیگری نیز در اطراف وجوه اثر فرو رونده ظاهر شدند، l_e از رابطه (۳) محاسبه شد:

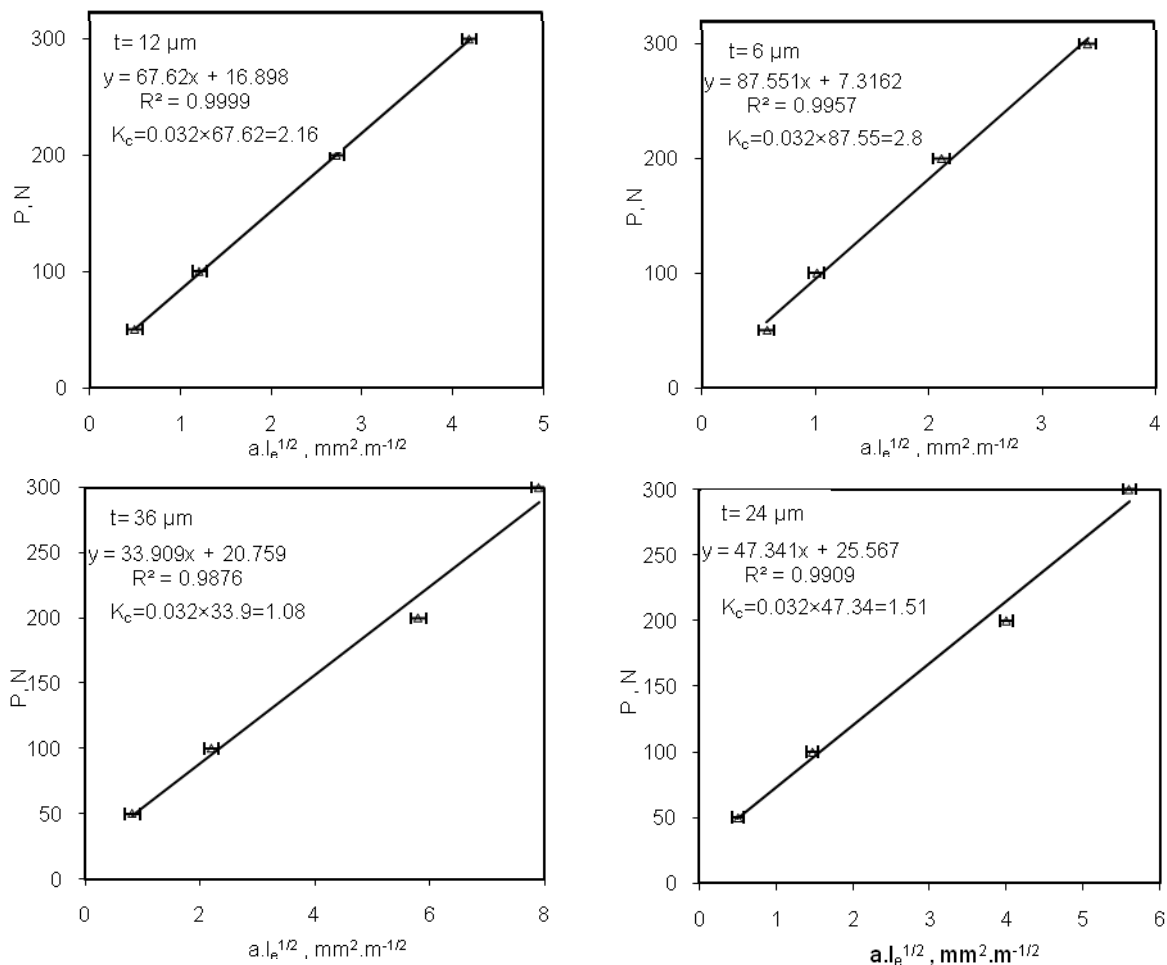
$$l_e = l_t / 4 \quad (3)$$

در رابطه فوق l_t طول کل ترک ها می باشد که به صورت زیر با نیروی اعمالی رابطه خطی دارد [۱۴، ۱۷، ۲۱]:

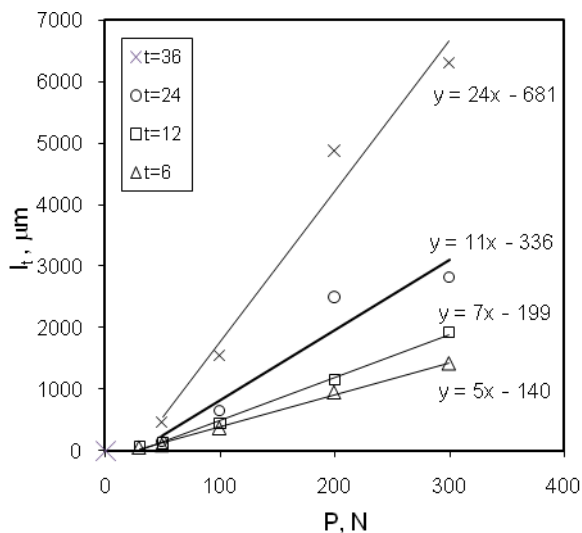
$$l_t = b.P + c \quad (4)$$

در رابطه اخیر، b و c ثابت های رابطه هستند.

برای دستیابی به روابط ریاضی چقرمگی شکست، تغییرات $P-l_e$ ترسیم و ثابت های b و c رابطه (۴) برای همه پوشش ها مشخص شد. سپس تغییرات این ثوابت به صورت تابعی از ضخامت پوشش ها بدست آمده و در رابطه (۴) قرار داده شد. به این ترتیب معادلاتی حاصل شد که جایگزینی آنها در روابط (۱) تا (۳)، منجر به استخراج مدل هایی گردید. اعتبار هر مدل، با استفاده از محاسبه



شکل ۱. نمودارهای $P-a\sqrt{l_e}$ و مقادیر چقرمگی شکست پوشش های نیکل-فسفر با ضخامت مختلف



شکل ۲. تغییرات طول کل ترک های ایجاد شده در پوشش های نیکل-فسفر بر حسب نیروی اعمالی برای ضخامت های مختلف

حرارتی پوشش و زیرلایه)، دچار تنش های داخلی شده و حساسیت زیادی نسبت به ترک پیدا می کنند [۲۲،۲۳]. تحت شرایط آزمون ویکرز، نیروهای اعمالی موجب ترک خوردگی شدید پوشش ها و اشاعه قابل ملاحظه ترک در آنها می گردد.

۲- تعیین ثوابت b و c معادله (۴) بر حسب ضخامت

بر اساس ارتباط خطی طول کل ترک ها با نیروی اعمالی (شکل ۲) که به نوعی از رابطه (۴) تبعیت می کند، ثابت های b و c رابطه مذکور از طریق محاسبه شیب خطوط و نیز برون یابی خطوط به نقطه $P=0$ ، تعیین شدند. مقادیر این ثابت ها برای پوشش های نیکل-فسفر با ضخامت های مختلف در جدول ۱ آورده شده اند.

با یکدیگر، هر دو تغییرات خطی و توانی ثوابت b و c با ضخامت در نظر گرفته شد. شکل ۳ تغییرات خطی و توانی ثوابت های b و c را بر حسب ضخامت پوشش ها نشان می دهد. با استفاده از این شکل، معادلات خطی و توانی به صورت زیر حاصل گردید:

$$b(t) = 0.6t + 0.9 \quad (۱-۶)$$

$$b(t^2) = 0.014t^2 + 4.5 \quad (۲-۶)$$

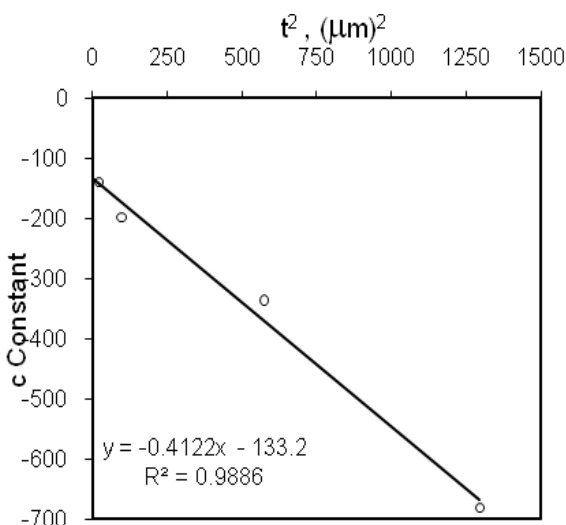
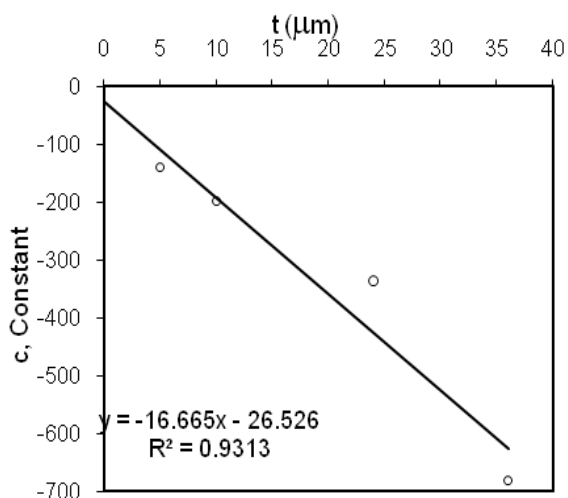
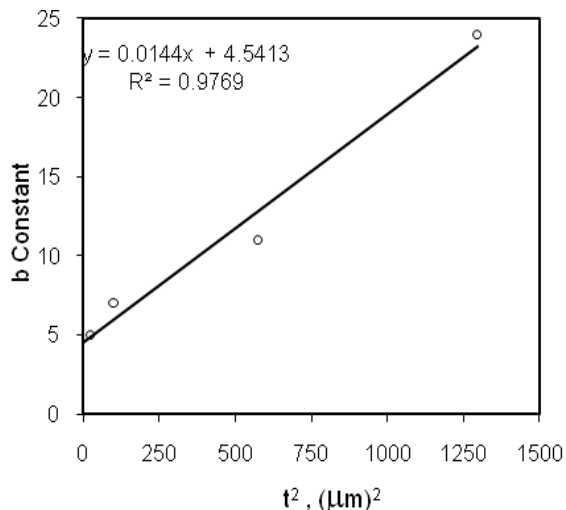
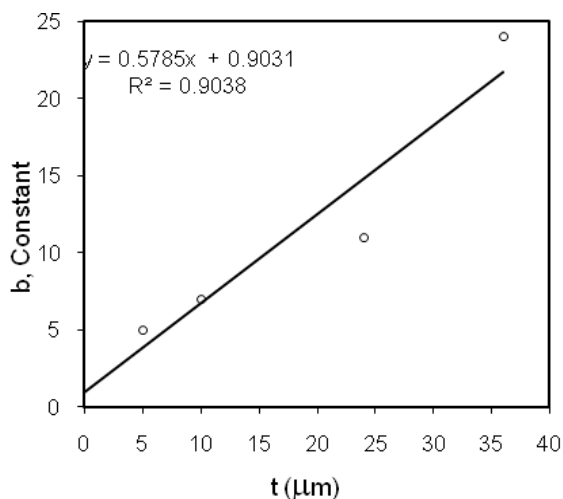
$$c(t) = -16.7t - 26.5 \quad (۳-۶)$$

$$c(t^2) = -0.4t^2 - 133 \quad (۴-۶)$$

جدول ۱. مقادیر b و c رابطه (۴) برای پوشش نیکل-فسفر با ضخامت های مختلف.

ضخامت پوشش (μm)	ثابت b	ثابت c
۶	۵	-۱۴۰
۱۲	۷	-۱۹۹
۲۴	۱۱	-۳۳۶
۳۶	۲۴	-۶۸۱

دقت در مندرجات جدول فوق نشان می دهد که ارتباط مشخصی میان مقادیر ثابت ها و ضخامت پوشش وجود دارد. به منظور ارایه مدل های مختلف و امکان مقایسه آنها



شکل ۳. تغییرات ثوابت b و c رابطه (۴) بر حسب ضخامت پوشش نیکل-فسفر

الف) تغییرات توانی، ب) تغییرات خطی

جدول ۲. معادلات طول کل ترک های ایجاد شده در پوشش ها به صورت تابعی از ضخامت

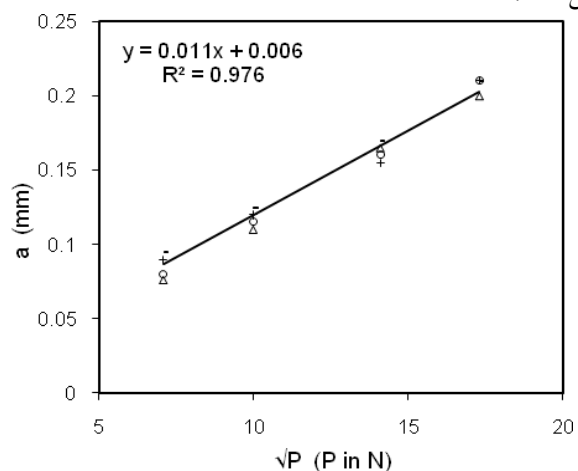
شماره معادله	معادله	نوع ارتباط با ضخامت
(I)	$I_t = (0.6t + 0.9) P - 0.4t^2 - 133$	$I_t = b_{(t)} \cdot P + c_{(t)^2}$
(II)	$I_t = (0.014t^2 + 4.5) P - 16.7t - 26.5$	$I_t = b_{(t)^2} \cdot P + c_{(t)}$
(III)	$I_t = (0.6t + 0.9) P - 16.7t - 26.5$	$I_t = b_{(t)} \cdot P + c_{(t)}$
(IV)	$I_t = (0.014t^2 + 4.5) P - 0.4t^2 - 133$	$I_t = b_{(t)^2} \cdot P + c_{(t)^2}$

۳- ارزی روابط طول ترک ها بر حسب ضخامت

مشخص شد که ثوابت رابطه (۴) در واقع، خود تابعی از ضخامت می باشند. بنابراین می توان تغییرات طول ترک های ایجاد شده در پوشش های نیکل-فسفر را به صورت تابعی از ضخامت آنها توسط معادلات جدول ۲ ارائه نمود. در همه این معادلات، I_t طول کل ترک های ایجاد شده در پوشش (بر حسب میکرون)، t ضخامت پوشش (بر حسب میکرون) و P نیروی اعمالی در آزمون فرو رونده ویکرز (بر حسب نیوتن) می باشد.

۴- ارائه رابطه ریاضی چقرمگی شکست بر حسب ضخامت

برای تعیین رابطه ریاضی چقرمگی شکست پوشش ها بر حسب ضخامت، بایستی از رابطه (۱) استفاده شود. برای این منظور ابتدا لازم است پارامتر a در رابطه فوق بر حسب P جایگذاری شود. شکل ۴ تغییرات $a - \sqrt{P}$ را نشان می دهد.



شکل ۴: تغییرات اندازه اثر فرو رونده ویکرز با نیروی اعمالی برای پوشش نیکل-فسفر با ضخامت های مختلف

با مشخص شدن شیب خط در شکل فوق، ثابت k در رابطه (۲) برای همه پوشش ها بدست می آید ($k=0.11$). در این صورت با تلفیق روابط (۱) تا (۴) می توان نوشت: (۷)

$$K_c = 0.064 P / (0.011 \sqrt{P} I_t) \Rightarrow K_c = 5.8 (P / I_t)^{1/2}$$

با قرار دادن معادلات I تا IV جدول ۲ به جای I_t در رابطه (۷)، چهار مدل (رابطه ریاضی) به صورت جدول ۳ حاصل خواهد شد که در همه آنها t بر حسب m ، P بر حسب N و K_c بر حسب $MPa\sqrt{m}$ می باشد. در هر چهار مدل، برای محدوده نیروی اعمالی و ضخامت پوشش های مورد بررسی ($t=5-75$ m و $P=50-300$ N)، چقرمگی شکست رابطه معکوس با ضخامت پوشش دارد. این نوع ارتباط میان چقرمگی شکست پوشش ها با ضخامت آنها، توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۱۶].

به منظور انتخاب بهترین مدل از میان مدل های استخراج شده، میزان تطابق مدل ها با نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، علاوه بر مقادیر K_c آزمایشگاهی مربوط به تحقیق حاضر، از مقادیر K_c حاصل از تحقیقات دیگران ($MPa\sqrt{m}$) $1/6$ برای پوشش با ضخامت ۴۰ میکرون و $1/38$ $MPa\sqrt{m}$ برای پوشش با ضخامت ۷۵ میکرون) نیز بهره گرفته شد. جدول ۴ داده های چقرمگی شکست حاصل از مدل ها را در مقایسه با داده های آزمایشگاهی به همراه خطای نسبی هر مدل، برای مقادیر مختلف P (نیروی فرو رونده) نشان می دهد. چنانچه مشهود است تحت همه نیروها، مدل I کمترین میزان خطا را نشان می دهد به طوری که متوسط میزان

جدول ۳. مدل های ریاضی چقرمگی شکست پوشش ها به صورت تابعی از ضخامت

شماره مدل	مدل استخراج شده از روابط (۱) تا (۴)
I	$K_c = 5.8 \sqrt{P [(0.6t + 0.9) P - 0.4t^2 - 133]^{-1/2}}$
II	$K_c = 5.8 \sqrt{P [(0.014t^2 + 4.54) P - 16.7t - 26.5]^{-1/2}}$
III	$K_c = 5.8 \sqrt{P [0.6t + 0.9) P - 16.7t - 26.5]^{-1/2}}$
IV	$K_c = 5.8 \sqrt{P [(0.014t^2 + 4.5) P - 0.4t^2 - 133]^{-1/2}}$

چقرمگی شکست). بر این اساس می توان اعتبار مدل I را با مقایسه مقادیر K_c محاسبه شده تحت نیروهای مختلف (مندرج در جدول ۴)، مورد ارزیابی قرار داد. تغییر نیرو از ۱۰۰ به ۵۰۰ نیوتن در مدل I باعث تغییر در MSRE به میزان ۱۱/۸٪ می گردد در حالیکه این مقدار برای مدل های II، III و IV به ترتیب ۱۹/۵٪، ۱۶/۴٪ و ۱۷٪ است. همچنین میزان تغییر در MSRE به ازای تغییر نیرو از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ نیوتن برای مدل I فقط ۵٪ است (در مقایسه با مقادیر ۲۰٪، ۱۲/۳٪ و ۱۴/۸٪ به ترتیب برای مدل های II، III و IV).

همانگونه که از مندرجات جدول ۴ استنباط می شود، تغییر P در محدوده وسیع (۱۰۰-۱۰۰۰ N) موجب تغییر ناچیزی در K_c شده است. در عین حال، جهت حصول مقادیر واقعی تر K_c می توان برای هر پوشش با ضخامت معین، در مدل I از چندین نیرو استفاده کرده و سپس میانگین K_c های حاصله را به عنوان چقرمگی شکست پوشش در نظر گرفت. برای نیروی ۱۰۰ N، مدل I به صورت زیر خلاصه خواهد شد:

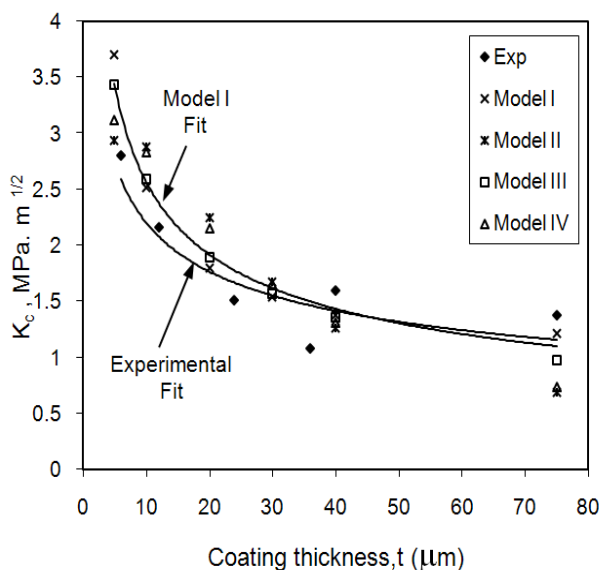
$$K_c = 91.5 (150t - t^2 - 112)^{-1/2}$$

این مدل پیشنهادی، گرچه برای پیش بینی چقرمگی شکست پوشش نیکل-فسفر با ضخامت های ۵-۱۰۰ میکرون قابل استفاده است، لیکن دقت بکارگیری آن با کاهش ضخامت پوشش در این محدوده، افزایش می یابد.

نتیجه گیری

با انجام آزمون فرو رونده ویکرز بر روی پوشش نیکل-فسفر با ضخامت های ۶، ۱۲، ۲۴ و ۳۶ میکرون، پس از

MSRE آن کمتر از سایر مدل ها می باشد. بنابراین چنین به نظر می رسد که مدل I مناسب ترین مدل بوی تعیین چقرمگی شکست پوشش های نیکل-فسفر و پیش بینی نحوه تغییرات آن به صورت تابعی از ضخامت این پوشش ها می باشد. نحوه تغییرات K_c بر حسب ضخامت پوشش ها برای مقادیر آزمایشگاهی در مقایسه با مقادیر حاصل از مدل I در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. تغییرات چقرمگی شکست پوشش های نیکل-فسفر بر حسب ضخامت (داده های آزمایشگاهی در مقایسه با مدل I، $P=100$ N)

۵- ارزیابی مدل پیشنهادی

گرچه در همه مدل های استخراج شده از جمله مدل I، نیروی اعمالی مربوط به آزمون فرو رونده ویکرز به عنوان یک متغیر ظاهر شده ولی قاعدتاً نایستی تأثیر چندانی بر مقادیر حاصله داشته باشد (به دلیل ذاتی بودن خاصیت

جدول ۴. مقادیر K_c آزمایشگاهی در مقایسه با K_c محاسبه شده از مدل های مختلف به همراه میانگین مربعات خطای نسبی هر مدل

\overline{MSRE} (%)	MSRE (%)	۷۵	۴۰	۳۶	۲۴	۱۲	۶	ضخامت پوشش (μm)	K_c آزمایشگاهی ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	مدل
		۱/۳۸	۱/۶	۱/۰۸	۱/۵۱	۲/۱۶	۲/۸			
۴/۶۲	۴/۹۰	۱/۲۲	۱/۳۸	۱/۴۴	۱/۶۹	۲/۲۲	۳/۳۳	P=۱۰۰	I	
	۴/۳۲	۰/۹۱	۱/۲	۱/۲۶	۱/۵۲	۲/۰۹	۲/۸۳	P=۵۰۰		
	۴/۶۴	۰/۸۸	۱/۱۸	۱/۲۴	۱/۵	۲/۰۶	۲/۷۸	P=۱۰۰۰		
۶/۸۵	۷/۸۹	۰/۶۹	۱/۲۶	۱/۴۳	۱/۹۶	۲/۸	۲/۹۴	P=۱۰۰	II	
	۶/۳۵	۰/۶۵	۱/۱۵	۱/۲۶	۱/۷۰	۲/۳۶	۲/۶۷	P=۵۰۰		
	۶/۳۱	۰/۶۴	۱/۱۳	۱/۲۴	۱/۶۶	۲/۳۱	۲/۶۳	P=۱۰۰۰		
۴/۸۳	۵/۳۴	۰/۹۸	۱/۳۶	۱/۴۳	۱/۷۴	۲/۳۹	۳/۲۱	P=۱۰۰	III	
	۴/۴۶	۰/۸۸	۱/۲۰	۱/۲۶	۱/۵۳	۲/۱	۲/۸۲	P=۵۰۰		
	۴/۶۸	۰/۸۷	۱/۱۸	۱/۲۴	۱/۵	۲/۰۷	۲/۷۷	P=۱۰۰۰		
۶/۶۲	۷/۴۱	۰/۷۴	۱/۳۱	۱/۴۴	۱/۹۴	۲/۷	۳/۱	P=۱۰۰	IV	
	۶/۱۵	۰/۶۶	۱/۱۵	۱/۲۶	۱/۷۰	۲/۳۵	۲/۶۸	P=۵۰۰		
	۶/۳۱	۰/۶۴	۱/۱۳	۱/۲۴	۱/۶۶	۲/۳۱	۲/۶۳	P=۱۰۰۰		

استفاده است ولی برای پوشش های با ضخامت کمتر در این محدوده، از دقت بالاتری برخوردار است.

انجام عملیات حرارتی به مدت ۱ ساعت در دمای 400°C نتایج زیر به دست آمد:

۱- چقرمگی شکست پوشش های با ضخامت مختلف در محدوده $3-1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ قرار دارد.

۲- چقرمگی شکست پوشش ها با افزایش ضخامت آنها در محدوده مورد بررسی، کاهش می یابد.

۳- بر اساس روابط و مدل های ریاضی استخراج شده، نیروی اعمالی در آزمون فرو رونده تأثیر ناچیزی بر مقادیر چقرمگی شکست پوشش ها دارد.

۴- از میان روابط و مدل های استخراج شده ، رابطه $K_c=f(t,t^2)$ کمترین خطا و بیشترین سازگاری را با داده های آزمایشگاهی داشته و بنابراین بهترین رابطه ریاضی برای نمایش ارتباط چقرمگی شکست بر حسب ضخامت پوشش می باشد.

۵- رابطه ریاضی ارائه شده در این مقاله، گرچه برای پوشش های با محدوده ضخامت ۱۰۰-۵ میکرون قابل

منابع

1. W. Riedel, Electroless Nickel Plating, ASM International, 1991.
2. G. Straffellini, D. Colombo, *Surface Durability Of Electroless Ni-P Composite Deposits*, Wear, 236 (1999) 179-188.
3. R. Taheri, I.N.A. Oguocha, *The Tribological Characteristics Of Electroless NiP Coatings*, Wear, 249 (2001) 389-396.
4. J.R. Davis, *Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance*, ASM International, 2001.
5. Standard Specification For Autocatalytic (Electroless) Nickel-Phosphorus Coatings On Metals, Annual Book Of ASTM Standards, 02.05 (1999) 450.

6. J.A. Diaz, M. Passarelli, *Fatigue Behavior Of A 4340 Steel Coated With An Electroless Ni-P Deposit*, Surface And Coatings Technology, 149 (2002) P45.
7. A. Pertuz, J.A. Berrios, *Influence Of A Commercial Electroless Ni-P Deposit On The Fatigue Properties Of A Notched And Unnotched SAE 4140 Steel*, Surface And Coatings Technology, 133-134 (2000) 572.
8. G. Contreras, C. Fajardo, *Fatigue Properties Of An AISI 1045 Steel Coated With An Electroless Ni-P Deposit*, Thin Solid Films, 355-356 (1999) 480.
9. J.A. Berrios, M.H. Staia, *Effect Of The Thickness Of An Electroless Ni-P Deposit On The Mechanical Properties Of An AISI 1045 Plain Carbon Steel*, Surface And Coatings Technology, 108-109 (1998) 466.
10. D.W. Baudrand, *Electroless Nickel Plating*, Metals Handbook.
11. P.K. Data, *Influence Of Electroless Nickel Coatings On The Fatigue And Wear Behaviour Of Mild Steels*, Coatings And Surface Treatment For Corrosion And Wear Resistance, (1984) 46.
12. Z. Xie, J. Zhu, W. Gue, *The Scraping Test And Adhesion Measurements Of Diamond And Nickel Electroless Coatings*, Materials Characterization, 44 (2000) 347-352.
13. C.J. Chen, K.L. Lin, *Internal Stress and Adhesion of Amorphous Ni-Cu-P Alloy on Aluminum*, Thin Solid Films, 370 (2000) 106-113.
14. B. Bozzini, *Fracture Toughness Of Supported Ni-P Films Prepared By Autocatalytic Chemical Deposition*, Z. Metallkd., 88 (1997) 493.
15. A. Roman, D. Chicot, *Indentation Tests To Determine The Fracture Toughness Of Nickel Phosphorus Coatings*, Surface And Coatings Technology, 155 (2002) 161-168.
16. S. Zhang, D. Sun, Y. Fu, *Recent Advances Of Superhard Nanocomposite Coatings: A Review*, Surface And Coatings Technology, 167 (2003) 113-119.
17. J.D. Lin, J.G. Duh, *Fracture Toughness And Hardness Of Ceria- And Ytria-Doped Tetragonal Zirconia Ceramics*, Materials Chemistry And Physics, 78 (2002) 253-261.
18. L.G. Rosa, P.M. Amarel, C. Anjinho, *Fracture Toughness Of Solar-Sintered WC With Co Additive*, Ceramics International, 28 (2002) 345-348.
19. J. Richter, *Application Of Vickers Indentation For Assessment Of PVD TiN Coated New Nonledeburitic High-Speed Steels*, Surface And Coatings Technology, 162 (2003) 119-130.
20. C.B. Ponton, R.D. Rawlings, *Materials Science and Engineering*, 5 (1989) 865-872.
21. M. M. Lima, C. Godoy, *Toughness Evaluation Of HVOF WC-Co Coatings Usings Non-Linear Regression Analysis*, Materials Science And Engineering, A357 (2003) 337-345.
22. D.T. Gawne, U. Ma, *Structure And Wear Electroless Nickel Coatings*, Materials Science And Technology, 3 (1987) 228-238.
23. J.Y. Song, Jin Yu, *Residual Stress Measurements In Electroless Plated Ni-P Films*, Thin Solid Films, 415 (2002) 167-172.