



## ارزیابی مقاومت به خش پذیری پوشش‌های خودرو با استفاده از روش‌های دندان‌گذاری و خراش

نرگس طهماسبی\*

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر، دانشکده مهندسی پلیمر، گروه پژوهشی صنایع رنگ، ماهشهر، ایران، کدپستی: ۶۳۵۱۹

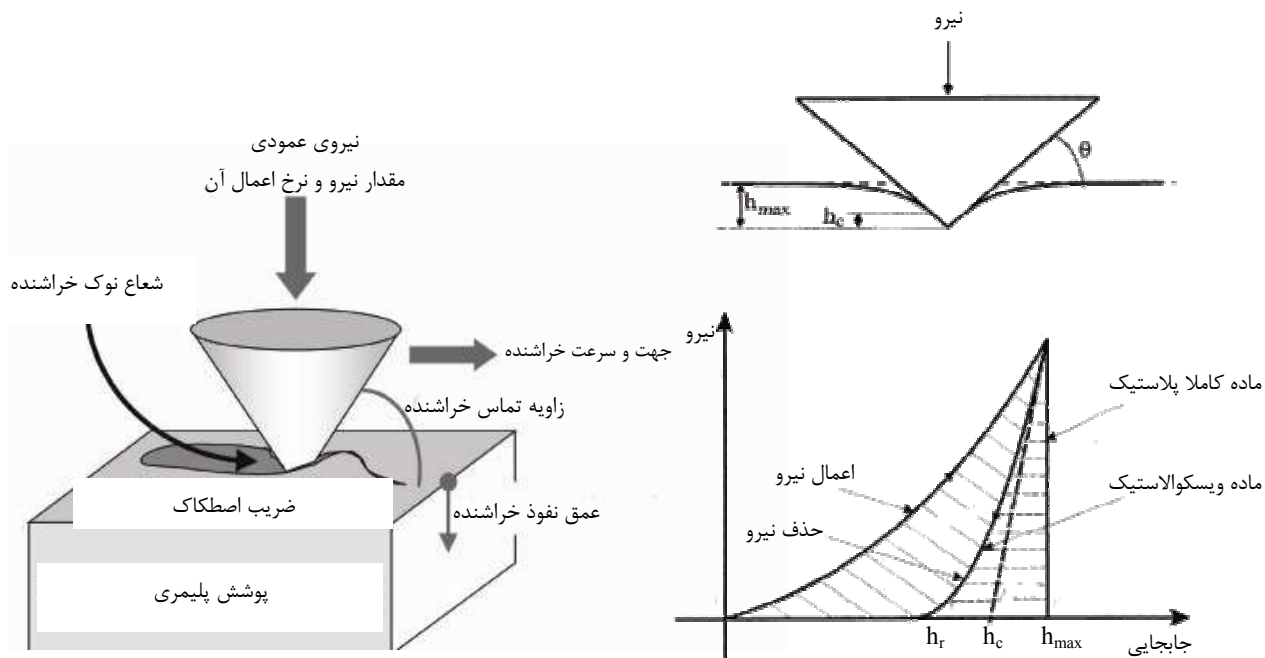
تاریخ دریافت: ۹۱/۷/۲۴ تاریخ بازبینی ۱: ۹۱/۹/۲۰ تاریخ بازبینی ۲: ۹۱/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۲۰

### چکیده

روش‌های دندان‌گذاری و خراش شامل استفاده از انواع خراشنده‌ها با اشکال هندسی مختلف برای ارزیابی مقاومت به خش‌پذیری پوشش‌ها است. در دندان‌گذاری، عکس‌العمل پوشش در مقابل نفوذ نوک خراشنده تحت نیروی عمودی وارد بر آن و نیز اثرات به‌جای مانده از خراشنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدول دندان‌گذاری، سختی، درصد برگشت‌پذیری الاستیک، میزان کار انجام شده حین دندان‌گذاری، درصد تغییر شکل‌های الاستیک، پلاستیک و شکست، مدول ذخیره و اتلاف از جمله عوامل حاصل از آزمایش دندان‌گذاری هستند. در روش خراش، خراشنده تحت نیروی ثابت و یا افزایشی بر سطح پوشش حرکت کرده و بسته به نوع خش ایجاد شده، عواملی مانند ابعاد خش، نیروی بحرانی، سختی‌های مماسی و خراش، ضریب اصطکاک، درصد تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک و میکرو مقاومت به خش‌پذیری اندازه‌گیری می‌شود. سازوکار استفاده شده برای بهبود مقاومت به خش‌پذیری پوشش، تعیین‌کننده عامل مناسب برای ارزیابی و یا مقایسه عملکرد ضدخش بودن پوشش‌های خودرو است.

### واژه‌های کلیدی

پوشش‌های خودرو، مقاومت به خش‌پذیری، روش‌های ارزیابی، دندان‌گذاری، خراش.



۱- مقدمه

نازک، پوشش‌های نرم با ضخامت زیاد و توده پوشش مناسب است. در حالی در نانو دندانگذاری نیروها و عمق نفوذ خراشنده در پوشش در مقیاس نانومتری است و برای ارزیابی خواص سطحی انواع پوشش‌های پلیمری و غیر آلی مناسب است [۸-۵، ۳].

۲-۱- نانو دندانگذاری

نانو دندانگذاری شامل اعمال نیروی عمودی با نرخ ثابت به پوشش با استفاده از یک خراشنده تا میزان معین (نیروی بیشینه،  $P_{max}$ ) و در ادامه کاهش تدریجی نیرو با نرخ ثابت تا حذف کامل آن است. طی دوره اعمال و حذف نیرو، عمق نفوذ خراشنده در داخل پوشش و یا در واقع جابجایی سطح پوشش بطور هم‌زمان ثبت می‌شود. به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک پوشش‌ها، اعمال نیروی ثابت برای مدت زمان معینی پیش از حذف تدریجی آن برای جلوگیری از بروز "اثر دماغه"<sup>۱</sup> الزامی است. این اثر ناشی از خزش پوشش و افزایش جابجایی آن با وجود کاهش تدریجی نیرو است.

<sup>۱</sup> Nose effect

خش‌ها و خراش‌ها معمولاً در اثر نفوذ، کشیده و ساییده شدن ذرات گرد و غبار جذب‌شده بر سطح پوشش حین شستشوی خودرو بوجود می‌آیند. بر این اساس، برای بررسی اثرات متقابل میان پوشش‌ها و ذرات جذب‌شده بر آنها، روش‌های دندانگذاری و خراش پیشنهاد شده‌اند. در این روش‌ها، از انواع خراشنده‌ها با اشکال هندسی کروی، مخروطی و یا هرمی سه و چهار وجهی استفاده می‌شود. در جدول ۱ مشخصات هندسی و کاربردهای برخی از خراشنده‌ها نشان داده شده است. این خراشنده‌ها به دو روش دندانگذاری و خراش با نیروی ثابت و یا متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرند و مقیاس نانو و میکرو بودن آنها به مقدار نیروی اعمال‌شده و عمق نفوذ خراشنده در پوشش بستگی دارد [۴-۱].

۲- روش‌های دندانگذاری

در روش‌های دندانگذاری، اولین مرحله ایجاد خش، که شامل نفوذ ذرات ساینده در پوشش است، مدل‌سازی می‌شود و عکس‌العمل پوشش در مقابل نفوذ نوک خراشنده تحت نیروی عمودی وارد بر آن و نیز اثرات بجای مانده از خراشنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش در دو مقیاس نانومتری و میکرومتری قابل انجام است. میکرو دندانگذاری با محدوده اعمال نیرو صفر تا ۳۰ نیوتن برای مطالعه پوشش‌های سخت

جدول ۱- مشخصات هندسی برخی از خراشنده‌ها [۴].

نام خراشنده	مخروطی	ویکرز	گوشه مکعبی	برکویچ
دید دو بعدی				
زاویه راس	-	۱۳۶	۹۰	۹۱۴/۱۹
زاویه جانبی ( $\alpha$ )	$\alpha$	۶۸	۳۵/۲۴۶	۶۵/۳۵
کاربرد	پوشش‌های نرم تا سخت بسته به زاویه خراشنده	تعیین میکروسختی پوشش‌ها	پوشش‌های نازک پوشش‌های حاوی ذرات میکرونی و نانومتری	پوشش‌های سخت با ضخامت بیشتر از ۱۰۰ نانومتر

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_{\max}}} \quad (5)$$

$$E = \frac{1 - \nu^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (6)$$

نانوسختی پوشش (H) عامل دیگر حاصل از آزمایش نانو دندان‌گذاری است که با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود. به دلیل مشکلات و زمان‌بر بودن تصویربرداری مستقیم برای تعیین  $A_{\max}$ ، اغلب این مساحت به کمک روش‌های ریاضی و با استفاده از تابع شکل خراشنده ( $A(h_c)$ ) محاسبه می‌گردد. تابع شکل خراشنده یک چند جمله‌ای است که مساحت سطح مقطع تماس خراشنده را بصورت تابعی از فاصله نوک خراشنده از سطح پوشش ( $h_c$ ) نشان می‌دهد. (رابطه ۸). در این رابطه، ضریب  $C_0$  وابسته به شکل هندسی نوک خراشنده است و سایر ضرایب با استفاده از کالیبراسیون دستگاه نانو دندان‌گذار و انجام آزمایش نانو دندان‌گذاری بر روی یک ماده پلاستیک به دست می‌آیند. همچنین مقدار  $h_c$  در نیروی بیشینه می‌تواند از رابطه ۹ محاسبه شود. در این رابطه  $\varepsilon$  عدد ثابتی است که مقدار آن به هندسه نوک خراشنده بستگی دارد.

$$H = \frac{P_{\max}}{A_{\max}} = \frac{P_{\max}}{A(h_c)} \quad (7)$$

$$A(h_c) = C_0 h_c^2 + C_1 h_c + C_2 h_c^{1/2} + C_3 h_c^{1/4} + C_4 h_c^{1/8} + C_5 h_c^{1/16} \quad (8)$$

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (9)$$

طرح‌واره‌ای از روش انجام آزمایش نانو دندان‌گذاری در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل  $h_{\max}$ ،  $h_f$  و  $h_c$  به ترتیب جابجایی بیشینه، نهایی و جابجایی تماس میان خراشنده و پوشش در هر لحظه است. عامل  $S$  نیز نشان‌دهنده شیب منحنی حذف نیرو در نیروی بیشینه است [۵-۱۱]. آزمایش نانو دندان‌گذاری می‌تواند به روش دینامیکی نیز انجام شود که در آن، نیرو بصورت سینوسی (رابطه ۱) اعمال و حذف می‌گردد. این نیروی سینوسی، موجب جابجایی سینوسی (رابطه ۲) سطح پوشش می‌شود. در رابطه‌های ۱ و ۲،  $P_0$  و  $h_0$  به ترتیب بیشینه نیرو و جابجایی سینوسی است. همچنین  $\omega$ ،  $t$  و  $\varphi$  به ترتیب بسامد زاویه‌ای، زمان و اختلاف فاز میان نیرو و جابجایی هستند [۸، ۱۲].

$$P = P_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

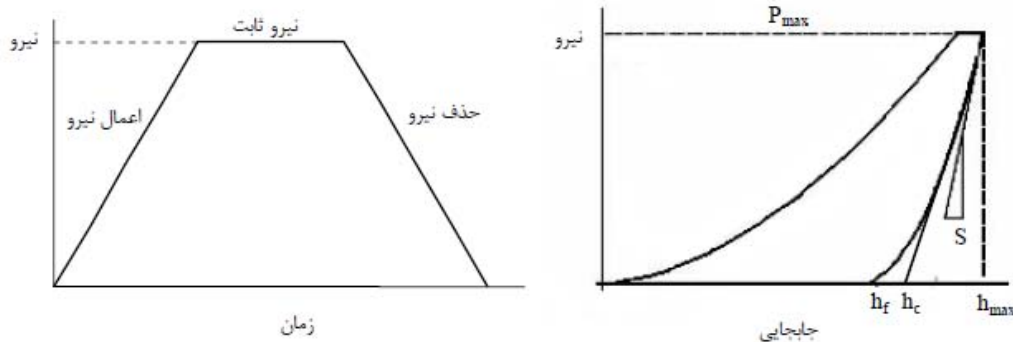
$$h = h_0 e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (2)$$

### ۲-۱-۱- عوامل حاصل از آزمایش نانو دندان‌گذاری

مدول دندان‌گذاری پوشش (E) از جمله عوامل حاصل از آزمایش نانو دندان‌گذاری است که با استفاده از برازش منحنی حذف نیرو/جابجایی توسط یک تابع توانی (رابطه ۳) و به کمک رابطه‌های ۴ تا ۶ محاسبه می‌شود. در این رابطه‌ها  $P$  نیرو،  $h$  جابجایی،  $m$  و  $\alpha$  ضرایب تابع توانی،  $E_i$  و  $E_r$  به ترتیب مدول الاستیک کاهیده پوشش و مدول بانگ خراشنده،  $\nu_i$  و  $\nu_r$  نسبت پواسون خراشنده و پوشش و  $A_{\max}$  نیز مساحت تصویر عمودی سطح تماس میان خراشنده و پوشش در نیروی بیشینه است [۵-۱۱].

$$P = \alpha (h - h_f)^m \quad (3)$$

$$S = \left( \frac{\partial P}{\partial h} \right)_{h_{\max}} = \alpha m (h_{\max} - h_f)^{m-1} \quad (4)$$



شکل ۱- طرح‌واره از روش انجام آزمایش نانو دندان‌گذاری [۷].

$$A_{Plastic} = \int_0^{h_{max}} f \cdot dh - \int_{h_c}^{h_{max}} f \cdot dh \quad (12)$$

$$\psi = \frac{A_{Plastic}}{A_{Plastic} + A_{Elastic}} \quad (13)$$

در صورتی که دستگاه دندانگذار توانایی تهیه تصویر سه بعدی از دندان را داشته باشد، عواملی دیگری شامل درصدهای تغییر حجم الاستیک ( $V_{Elastic}$ )، پلاستیک ( $V_{Plastic}$ ) و شکست ( $V_{Fracture}$ ) را نیز می‌توان بر اساس رابطه‌های ۱۴ تا ۱۶ به دست آورد. در این رابطه‌های  $V_{Ind}$ ،  $V_{dit}$  و  $V_{shs}$  به ترتیب حجم اولیه و نهایی دندان و حجم شانه‌ها است [۲].

$$V_{Elastic} = \frac{(V_{Ind} - V_{dit})}{V_{Ind}} * 100 \quad (14)$$

$$V_{Plastic} = \frac{V_{shs}}{V_{Ind}} * 100 \quad (15)$$

$$V_{Fracture} = \frac{(V_{dit} - V_{shs})}{V_{Ind}} * 100 \quad (16)$$

در جدول ۲ ضریب  $C_0$  و مقدار  $\varepsilon$  برخی از خراشنده‌ها نشان داده شده است [۵-۱۱]. درصد برگشت‌پذیری الاستیک (ER%) عامل دیگر حاصل از آزمایش نانو دندانگذاری است که در رابطه ۱۰ روش محاسبه آن نشان داده شده است [۹، ۱۲، ۱۴].

$$ER\% = \frac{h_{max} - h_f}{h_{max}} \times 100 \quad (10)$$

میزان کار انجام شده و یا انرژی صرف شده حین نانو دندانگذاری برای تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک پوشش از عوامل دیگر حاصل از آزمایش دندانگذاری هستند که به ترتیب از محاسبه سطح زیر منحنی حذف نیرو/جابجایی ( $A_{Elastic}$ ) (رابطه ۱۱) و مساحت سطح محصورشده میان منحنی‌های اعمال و حذف نیرو/جابجایی ( $A_{Plastic}$ ) (رابطه ۱۲) محاسبه می‌شوند. همچنین می‌توان با استفاده از این دو عامل، شاخص پلاستیک بودن ( $\psi$ ) را نیز محاسبه نمود (رابطه ۱۳). معادل بودن این شاخص با یک، نشان‌دهنده تغییر شکل کاملاً پلاستیک در پوشش حین دندانگذاری است. در حالی که صفر و یا کمتر از یک بودن آن، به ترتیب نشان از تغییر شکل کاملاً الاستیک و یا ویسکوالاستیک/پلاستیک پوشش دارد [۶].

$$A_{Elastic} = \int_{h_c}^{h_{max}} f \cdot dh \quad (11)$$

جدول ۲- توابع شکل خراشنده‌های متداول<sup>۱</sup>

نام خراشنده	مخروطی	ویکرز	گوشه مکعبی	بر کوویچ
$C_0$	$\pi h_c^2 \tan^2 \alpha$	$4 h_c^2 \tan^2 \alpha$	$3\sqrt{3} h_c^2 \tan \alpha$	$3\sqrt{3} h_c^2 \tan^2 \alpha$
$\varepsilon$	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵

<sup>۱</sup> در معادلات ارائه شده  $\alpha$  زاویه جانبی خراشنده است.

$$\varepsilon^{\circ} = K_2 \frac{P^{\circ}}{P} \quad (21)$$

$$\varepsilon^{\circ} = K_3 \frac{h^{\circ}}{h} \quad (22)$$

### ۲-۲- میکرو دندان‌گذاری

دو شیوه مرسوم برای انجام آزمایش میکرو دندان‌گذاری وجود دارد. یکی کاملاً مشابه با روش نانو دندان‌گذاری است، در حالی که در روش دیگر، خراشنده تحت نیروی معینی با سطح پوشش تماس داده شده و پس از حذف نیرو، مساحت اثر باقی مانده از خراشنده بر روی پوشش توسط میکروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود [۲۲-۱۸].

### ۲-۲-۱- عوامل حاصل از آزمایش میکرو دندان‌گذاری

در روش مشابه با نانو دندان‌گذاری عوامل سختی در نیروی بیشینه، خزش در نیروی کمینه و بیشینه، تغییر شکل‌های دائمی و الاستیک، مدول الاستیک و عمق دائمی دندان‌ها می‌تواند تعیین گردد. یادآوری می‌گردد که خزش در نیروی کمینه یعنی بعد از حذف نیرو، نمادی از قابلیت ترمیم‌پذیری دندان‌ها ایجاد شده است. سختی پوشش تنها عامل حاصل از روش دوم میکرو دندان‌گذاری است که با تقسیم نیرو بر سطح اثر بجا مانده از نفوذ خراشنده، محاسبه می‌گردد [۲۲-۱۸]. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که پوشش‌های مقاوم در برابر خش‌پذیری دارای سختی و مدول الاستیک کم هستند [۱۸، ۱].

### ۳- روش‌های خراش

در روش خراش، خراشنده تحت نیروی ثابت و یا افزایشی در محدوده میکرونیوتن تا نیوتن با سرعت ثابت یک دهم میکرون بر ثانیه تا صد میلی‌متر بر ثانیه بر سطح پوشش حرکت می‌نماید. تحت نیروهای کم، خش‌های نوع الاستیک و پلاستیک و با افزایش نیرو، خش‌های نوع شکست می‌توانند در پوشش ایجاد گردند. نوع خش ایجاد شده به زاویه حمله خراشنده و نیز چگونگی حرکت خراشنده‌های هرمی شکل بستگی دارد. معمولاً با افزایش زاویه حمله خراشنده، احتمال تشکیل خراش‌های شکست در پوشش افزایش می‌یابد. همچنین در صورت حرکت خراشنده‌های هرمی از سمت ضلع، خراش‌های شکست ترک‌دار و در حالت حرکت در جهت لبه، خراش‌های شکست بدون ترک می‌توانند در پوشش ایجاد می‌شوند [۳]. به‌طور کلی می‌توان گفت سه نیرو شامل نیروی جانبی، عمودی و مماسی (اصطلاحاً) طی فرآیند ایجاد خراش توسط خراشنده‌ها به پوشش اعمال می‌شود و پاسخ پوشش به آنها تعیین کننده نوع خراش ایجاد شده در پوشش است.

مدول ذخیره ( $E'$ ) و اتلاف ( $E''$ ) دو عامل حاصل از آزمایش نانو دندان‌گذاری دینامیکی است که با استفاده از رابطه‌های ۱۷ و ۱۸ قابل محاسبه هستند. در این رابطه‌ها  $A$  مساحت تصویر عمودی سطح تماس میان خراشنده و پوشش است. با استفاده از این دو عامل می‌توان پاسخ‌های ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک پوشش را حین فرآیند دندان‌گذاری مورد بررسی قرار داد. مدول ذخیره برای مواد کاملاً الاستیک معادل با مدول یانگ و برای مواد ویسکوالاستیک کمتر از مدول یانگ است. به هر حال مشکل بودن تعیین  $A$  مانع از کاربرد گسترده این روش برای مطالعه پوشش‌های پلیمری شده است [۸، ۱۲، ۱۳، ۱۵].

$$E' = \frac{F_0}{h_0} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}} \cos \varphi \quad (17)$$

$$E'' = \frac{F_0}{h_0} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}} \sin \varphi \quad (18)$$

### ۲-۱-۳- کرنش و نرخ کرنش در آزمایش دندان‌گذاری

نظر به وابستگی خواص پوشش‌های پلیمری به میزان کرنش و نرخ آن، دانستن این عوامل برای مقایسه نتایج آزمایش دندان‌گذاری پوشش‌ها با یکدیگر و نیز با سایر آزمایش‌ها الزامی است. کرنش ( $\varepsilon$ ) عامل بدون بعدی است که وسعت نفوذ خراشنده در پوشش و یا تغییر شکل پوشش را طی دندان‌گذاری نشان می‌دهد. کرنش در خراشنده‌های مخروطی و هرمی شکل به زاویه حمله ( $\theta$ ) یعنی زاویه میان سطح پوشش و خراشنده بستگی دارد و از رابطه ۱۹ قابل محاسبه است. در این رابطه  $k_1$  ثابت و کمتر از  $0.1/2$  است. کرنش پوشش حین استفاده از خراشنده‌های کروی می‌تواند با استفاده از معادله ۲۰ محاسبه شود. در این رابطه  $R$  و  $r$  به ترتیب شعاع خراشنده و شعاع سطح تماس است [۶، ۱۶].

$$\varepsilon = K_1 \cdot \tan \theta \quad (19)$$

$$\varepsilon = \frac{r}{R} \quad (20)$$

نرخ کرنش ( $\dot{\varepsilon}^0$ ) یا همان نرخ تغییر شکل پوشش به نرخ اعمال نیرو ( $P^0$ ) و یا جابجایی ( $h^0$ ) طی آزمایش دندان‌گذاری وابسته است. بر این اساس نرخ کرنش می‌تواند با استفاده از رابطه‌های ۲۱ و ۲۲ محاسبه گردد. در این رابطه‌ها  $K_2$  و  $K_3$  اعداد ثابت هستند [۶، ۱۶، ۱۷].

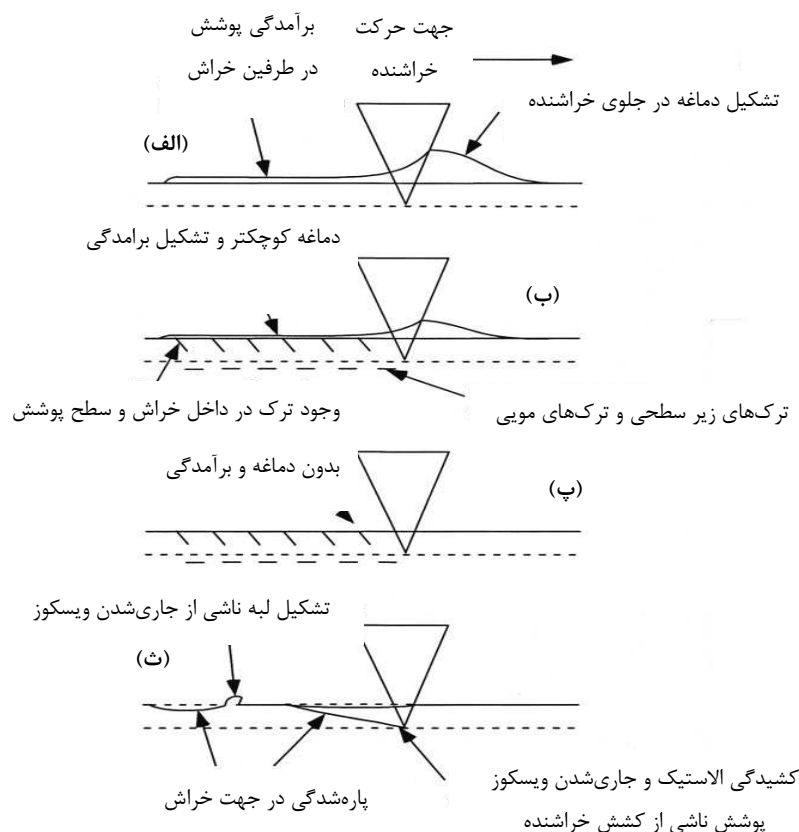
و اندازه‌گیری مجدد نیمرخ سطح پوشش<sup>۱</sup> انجام می‌شود. هدف از تعیین نیمرخ سطح پیش و پس از انجام خراش به ترتیب تعیین زبری سطح برای محاسبه دقیق جابجایی پوشش طی فرآیند ایجاد خراش و اندازه‌گیری میزان فرورفتگی باقیمانده در پوشش، برای تعیین عمق نهایی خراش است. روش پیشنهاد شده برای پوشش‌های خودرو شامل تعیین پیش نیمرخ پوشش در مسیری به طول ۵۰۰ میکرون تحت نیروی ۲۰ میکرونیوتن و سرعت ۲۵ میکرون بر ثانیه، سپس ایجاد خراش با افزایش نیرو از ۲۰ میکرونیوتن با نرخ ۸۰۰ میکرونیوتن بر ثانیه به بیشتر از ۱۶ میلی نیوتن و در نهایت تعیین نیمرخ پوشش تحت شرایط ذکر شده در مرحله اول است [۳, ۹, ۱۲, ۱۶, ۲۳].

در شکل ۲ پاسخ‌های مختلف پوشش در برابر حرکت خراشنده بر روی آن نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در حالت (الف) پوشش تغییر شکل ویسکوالاستیک پلاستیک داده و برآمدگی‌هایی در دو طرف خراش و دماغه‌ای در جلوی خراشنده تشکیل شده است. در حالت (ب) پوشش رفتار شکننده و با وسعت کمتر ویسکوپلاستیک را از خود بروز داده است و ترک‌هایی در سطح و زیر سطح پوشش ایجاد شده است که جهت و شکل آنها به ویژگی‌های ذاتی پوشش بستگی دارد. حالت (پ) بیشتر برای سرامیک‌ها، شیشه‌ها و پوشش‌های بسیار سخت رخ می‌دهد و حالت (ث) در صورت استفاده از خراشنده‌های بسیار تیز بروز می‌نماید [۱۶].

<sup>۱</sup> Pre and post profile

### ۳-۱- نانو خراش

نانو خراش طی سه مرحله شامل تعیین نیمرخ اولیه سطح پوشش، ایجاد نانو خراش

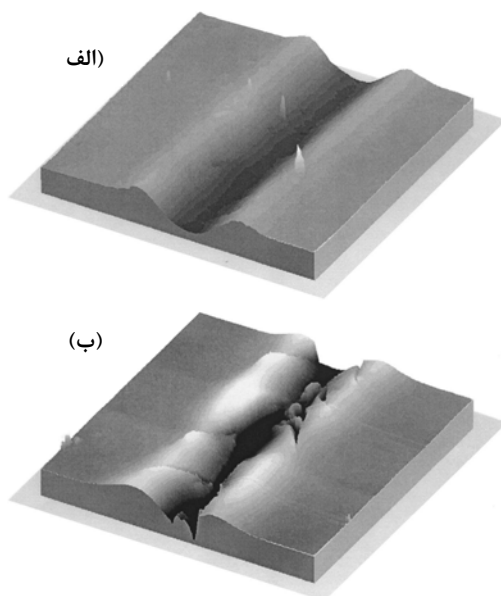


شکل ۲- پاسخ‌های مختلف پوشش در برابر حرکت خراشنده (الف) ویسکوالاستیک ویسکوپلاستیک (ب) ویسکوپلاستیک و شکننده (پ) شکننده (ث) لاستیکی [۱۶].

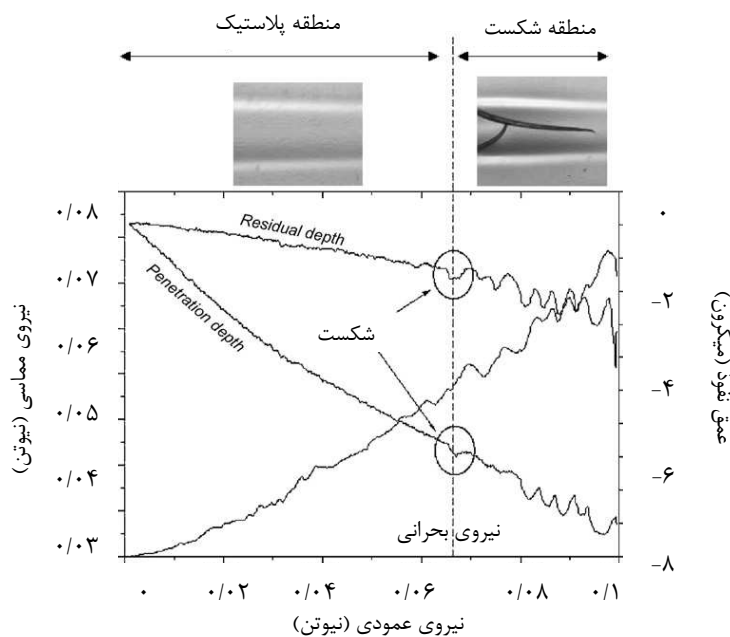
همراه با پارگی و ترک‌های ریز هستند، عمق خش و حداقل نیروی لازم برای ایجاد خش شکست موسوم به نیروی بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۴ و ۳ به ترتیب تفاوت ظاهری خش‌های شکست و پلاستیک و نیز چگونگی تعیین نیروی بحرانی با استفاده از منحنی تغییرات عمق نفوذ (جابجایی) بر حسب نیرو نشان داده شده است [۳، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۲۳].

### ۳-۱-۱- عوامل حاصل از آزمایش نانوخرش

در آزمایش نانوخرش بسته به نوع خش ایجاد شده در پوشش که می‌تواند از نوع پلاستیک و یا شکست باشد، عوامل مختلفی برای ارزیابی مقاومت به خراش در نظر گرفته می‌شود. برای خش‌های پلاستیک که از نظر شکل ظاهری دارای عمق و پهنای زیاد با لبه‌های برآمده و بدون پارگی هستند، ابعاد خش شامل عمق خش و ارتفاع شانه‌های خش مدنظر قرار می‌گیرد و برای خش‌های شکست که دارای لبه‌های تیز



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی خش‌های (الف) پلاستیک و (ب) شکست [۲۳].



شکل ۴- چگونگی تعیین نیروی بحرانی با استفاده از داده‌های آزمایش نانوخرش [۱۵].

$$MMR = \frac{F_N}{A_{trgh}} \quad (24)$$

$$\%ER = \frac{A_{ind} - A_{dit}}{A_{ind}} * 100 \quad (25)$$

$$\%PD = \frac{A_{shs}}{A_{ind}} * 100 \quad (26)$$

$$\%AW = \frac{A_{dit} - A_{shs}}{A_{ind}} * 100 \quad (27)$$

### ۳-۲- میکروخراش

آزمایش میکروخراش به دو روش نیروی ثابت و افزایشی انجام می‌شود. در روش نیروی ثابت، خراشنده با سرعت ۲۵ تا ۵۰ میکرون بر ثانیه و تحت نیروی ثابت ۵ تا ۵۰ میلی نیوتن بر سطح پوشش حرکت می‌نماید و عمق خراش، نیروهای مماسی و عمودی حین فرآیند ایجاد خراش و نیز نیمرخ خراش حاصل ثبت می‌گردد. روش توصیه شده برای پوشش‌های خودرو انجام آزمایش تحت نیروی عمودی ۵ میلی نیوتن و ثبت نسبت عمق خراش به عرض آن است [۲۳، ۳۱، ۳۲]. در آزمایش میکروخراش با نیروی افزایشی، خراشنده تحت نیروی عمودی افزایشی صفر تا ۵۰ میلی نیوتن با نرخ افزایشی ۰،۱ میلی نیوتن بر ثانیه و با سرعت ۲۵ میکرون بر ثانیه بر روی پوشش حرکت نموده و هم‌زمان نیروی مماسی، نیمرخ خراش و نیز حداقل نیروی لازم برای ایجاد ترک در پوشش یا همان نیروی بحرانی اندازه‌گیری می‌شود [۳۱، ۳۲].

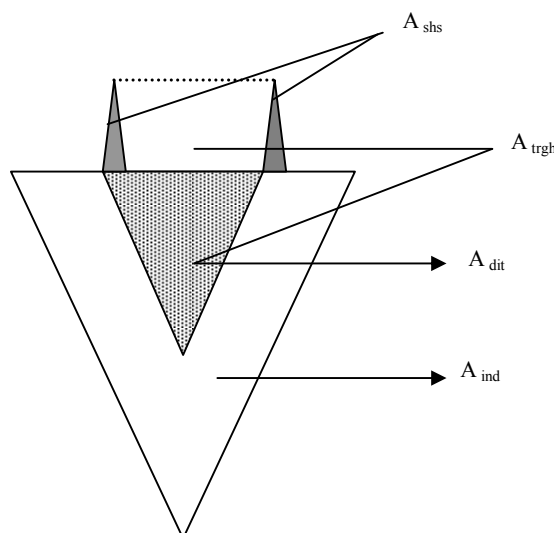
بررسی‌ها نشان داده است که ارزیابی مقاومت به خش‌پذیری پوشش‌های خودرو با استفاده از نیروی بحرانی به واقعیت نزدیک‌تر است و افزایش این نیرو با افزایش مقاومت به خش‌پذیری پوشش همراه است. مقدار نیروی بحرانی علاوه بر خصوصیات ذاتی پوشش و شرایط انجام آزمایش، به هندسه نوک خراشنده نیز بستگی دارد [۳، ۲۴].

در روش نانوخراش دو نوع سختی شامل سختی مماسی ( $H_T$ ) بر اساس نیروی اصطکاکی ( $F_T$ ) و سختی خراش ( $H_s$ ) بر اساس نیروی عمودی ( $F_N$ ) نیز قابل محاسبه است، (رابطه‌های ۲۲ و ۲۳). در این رابطه‌ها  $A_T$  و  $w$  به ترتیب مساحت سطح تماس میان خراشنده و پوشش و عرض باقی‌مانده خراش است. همچنین  $q$  عدد ثابتی است که مقدار آن به نوع تماس بین خراشنده و پوشش بستگی دارد، به طوری که برای تماس‌های کاملاً الاستیک و یا کاملاً پلاستیک به ترتیب ۱ و ۲ و برای تماس‌های ویسکوالاستیک و یا ویسکوپلاستیک عددی بین یک و دو است [۱۵، ۱۶، ۲۵-۲۸].

$$H_T = \frac{F_T}{A_T} \quad (22)$$

$$H_s = \frac{4qF_N}{\pi w^2} \quad (23)$$

همچنین در آزمایش نانوخراش عوامل میکرو مقاومت به خش‌پذیری (MMR)، درصد برگشت‌پذیری الاستیک (ER)، درصد تغییر شکل پلاستیک (PD) و درصد سایش (AW) می‌تواند با استفاده از رابطه ۲۴ تا ۲۷ محاسبه گردند. در این رابطه‌ها  $A_{dit}$  و  $A_{ind}$  به ترتیب سطح مقطع اولیه و نهایی دندان و  $A_{shs}$  و  $A_{trgh}$  سطح مقطع شانه‌ها و دندان‌ها است. طرح‌واره‌ای از این عوامل در شکل ۵ قابل مشاهده است [۲۹، ۳۰].



شکل ۵- طرح‌واره از عوامل  $A_{trgh}$  و  $A_{shs}$ ،  $A_{dit}$ ،  $A_{ind}$  [۲۹، ۳۰].



توانایی بررسی دلایل کم و یا زیاد بودن مقاومت به خش‌پذیری، خشن‌تر بودن شرایط آزمایشگاهی در مقایسه با شرایط واقعی و نیز لحاظ نشدن قابلیت ترمیم‌پذیری خش‌های پلاستیک در آن، می‌تواند منجر به ارزیابی نادرست گردد. این در حالی است که در روش‌های دندان‌گذاری و خراش، علاوه بر امکان بررسی دلایل کم و یا زیاد بودن مقاومت به خش‌پذیری می‌توان راه‌کارهایی برای بهبود مقاومت به خش‌پذیری بر اساس اصلاح خواص ویسکوالاستیک ویسکوپلاستیک با استفاده تغییر ساختار شیمیایی پوشش‌ها ارائه نمود. با این وجود متعدد بودن عوامل حاصل از آزمایش‌های دندان‌گذاری و خراش و پیچیده بودن فرآیند ایجاد خش در پوشش‌های خودرو، مانع از تدوین استانداردهایی برای ارزیابی مقاومت به خش‌پذیری با استفاده از این عوامل شده است. همچنین ماهیت ویسکوالاستیک ویسکوپلاستیک پوشش‌ها و سازوکارهای مختلف به‌کار گرفته شده توسط تولیدکنندگان پوشش‌های خودرو برای بهبود مقاومت به خش‌پذیری، به پیچیده‌تر شدن آن افزوده است. به هر حال به نظر می‌رسد که برای پوشش‌هایی که سازکار ضدخش کردن آنها بر پایه افزایش سختی است، عواملی مانند نیروی بحرانی، درصد تغییر شکل الاستیک، کار لازم برای تغییر شکل الاستیک، ضریب اصطکاک و سختی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی مقاومت به خش‌پذیری در نظر گرفته شود. در حالی که برای پوشش‌ها ضدخش بر پایه سازوکار تولید خش‌های پلاستیک قابل ترمیم، مدول دندان‌گذاری، سختی، درصد تغییر شکل پلاستیک، کار صرف شده برای تغییر شکل پلاستیک، ابعاد خش و سایر عوامل مرتبط برای مقایسه مقاومت به خش‌پذیری مناسب هستند. مقایسه نتایج داده‌های نانوخراش با مقاومت به خش‌پذیری انواع پوشش‌ها در کارواش‌های واقعی نشان داده است که نیروی بحرانی برای ارزیابی عملکرد ضدخش بودن پوشش‌ها مناسب‌تر از سایر عوامل است. با این حال وابسته بودن این عامل به نوع و سرعت خراشنده و نیز لزوم انجام حداقل ۲۰ اندازه‌گیری برای تکرارپذیری داده‌ها از جمله مشکلات استفاده از نیروی بحرانی برای ارزیابی پوشش‌ها است.

#### تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی "روش‌های مختلف ارزیابی مقاومت به خش‌پذیری روکش‌های شفاف خودرو" است و نویسنده مقاله لازم می‌داند از دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر برای تامین هزینه و تجهیزات انجام این طرح سپاس‌گزاری نماید.

#### ۳-۲-۱- عوامل حاصل از آزمایش میکروخراش

بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش میکروخراش با نیروی ثابت، نیروی تماس، انرژی لازم برای تغییر شکل پوشش، درصد تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک پوشش و نسبت عمق خراش به عرض آن محاسبه می‌گردد. بررسی‌ها نشان داده است که نسبت عمق خراش به عرض آن با مقاومت به خش‌پذیری پوشش رابطه معکوس دارد [۳۱، ۳۲].

ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) عامل دیگر حاصل از آزمایش میکروخراش با نیروی ثابت است که می‌تواند با استفاده از رابطه ۲۸ محاسبه گردد [۳۵-۳۲]. میکرومقاومت به خش‌پذیری، درصد شکست، تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک، از جمله عوامل حاصل از آزمایش میکروخراش با نیروی افزایشی هستند [۲۰].

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (28)$$

#### ۳-۲-۲- کرنش و نرخ کرنش

کرنش در خراشنده‌های مخروطی و کروی به ترتیب از رابطه‌های ۲۹ و ۳۰ قابل محاسبه است. در این دو معادله  $\theta$ ,  $R$ ,  $a$  به ترتیب زوایه حمله، شعاع نوک خراشنده و شعاع سطح تماس است. نرخ کرنش نیز می‌تواند از عکس مدت زمان اعمال نیرو ( $t_s$ ) یعنی زمان لازم برای طی نمودن مسافتی به اندازه عرض خراش ( $d_s$ ) توسط خراشنده، از رابطه ۳۱ به‌دست آورد. در این رابطه  $V$  سرعت خراشنده است [۲۶، ۲۴، ۱۵].

$$\varepsilon = 0.2 \tan \theta \quad (29)$$

$$\varepsilon = 0.2 \frac{a}{r} \quad (30)$$

$$\varepsilon^\circ = \frac{1}{t_s} = \frac{V}{d_s} \quad (31)$$

#### ۴- نتیجه‌گیری

استفاده از کارواش‌های واقعی و یا آزمایشگاهی از جمله رایج‌ترین روش‌های ارزیابی مقاومت به خش‌پذیری پوشش‌های خودرو است که در آن نسبت براقیت پوشش پس از انجام کارواش به پیش از آن، به‌عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته می‌شود. با وجود انطباق این روش با شرایط واقعی ایجاد خش در پوشش‌های خودرو، عدم

#### ۵- مراجع

- J. L. Courter, E. A. Kamenetzky, "Micro and nano indentation and scratching for evaluating the mar resistance of automotive clearcoats", *Eur. Coat. J.*, 7-8, 100-115, 1999.
- M. Kutschera, R. Sander, "Scratch resistance of automobile clearcoats: chemistry and characterization on the micro and nanoscale", *J. Coat. Technol. Res.*, 3, 91-97, 2006.
- V. Jardret, B. N. Lucas, W. Oliver, "Scratch durability of automotive clear coatings: A quantitative, reliable and robust methodology", *J. Coat. Technol.*, 72, 79-88, 2000.
- Tip Selection Guide, [www.hysitron.com / Link Click.aspx?fileticket=MRL33SsjoL8%3d&tabid=429](http://www.hysitron.com/Link_Click.aspx?fileticket=MRL33SsjoL8%3d&tabid=429) PDF file, 18 June 2004.

5. W. C. Oliver, G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", *J. Mater. Res.*, 7, 1564-1583, **1992**.
6. B. J. Briscoe, L. Fiori, E. Pelillo, "Nano-indentation of polymeric surfaces", *J. Phys. D: Applied Physics*, 31, 2395-2405, **1998**.
7. M. R. Vanlandingham, J. S. Villarrubia, W. F. Guthrie, G. F. Meyers, "Nanoindentation of polymers: an overview", *Macromol. Symp.*, 16, 15-43, **2001**.
8. M. R. VanLandingham, "Review of instrumented indentation", *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.*, 108, 249-265, **2003**.
9. N. Tahmassebi, S. Moradian, B. Ramezanzadeh, A. Khosravi, S. Behdad, "Effect of addition of hydrophobic nano silica on viscoelastic properties and scratch resistance of an acrylic/melamine automotive clearcoat", *Tribol. Int.*, 43, 685-693, **2010**.
10. G. Hochstetter, A. Jimenez, J. L. Loubet, "Strain rate effects on hardness of glassy polymers in the nanoscale range, comparison between quasi static and continuous stiffness measurements", *J. Macromol. Sci. Phys.*, B35, 681-692, **1999**.
11. Z. Ranjbar, S. Rastegar, "Evaluation of mar/scratch resistance of a two component automotive clear coat via nano-indenter", *Prog. Org. Coat.*, 64, 87-391, **2009**.
12. B. Ramezanzadeha, S. Moradian, N. Tahmassebi, A. Khosravi, "Studying the role of polysiloxane additives and nano-SiO<sub>2</sub> on the mechanical properties of a typical acrylic/melamine clearcoat", *Prog. Org. Coat.*, 72, 621-631, **2011**.
13. S. Roche, S. Pavan, J. L. Loubet, Ph. Barbeau, B. Magny, "Influence of the substrate characteristics on the scratch and indentation properties of UV-cured clearcoats", *Prog. Org. Coat.*, 47, 37-48, **2003**.
14. A. Krupicka, M. Johansson, A. Hult, "Mechanical surface Characterization: A Promising Procedure To Screen Organic coatings", *J. Coat. Technol.*, 75, 19-27, **2003**.
15. H. Pelletier, C. Mendibide, A. Riche, "Mechanical characterization of polymeric films using depth sensing instrument: Correlation between viscoelastic-plastic properties and scratch resistance", *Prog. Org. Coat.*, 62, 162-178, **2008**.
16. B. J. Briscoe, S. K. Sinha, "Scratch resistance and localised damage characteristics of polymer surfaces: A review", *Materialwiss. Werkstofftech.*, 34, 989-1002, **2003**.
17. P. Bertrand-Lambotte, J. L. Loubet, C. Verpy, S. Pavan, "Understanding of automotive clearcoats scratch resistance", *Thin Solid Films*, 420-421, 281-286, **2002**.
18. G. Wagner, M. Osterhold, "Comparison of different test methods for determining the mar resistance of clearcoats", *Materialwiss. Werkstofftech.*, 30, 617-622, **1999**.
19. Deutsches Institut für Normung, "DIN 55676-1996", Paint and varnishes, Universal hardness of coatings, **1996**.
20. F. N. Jones, W. Shen, S. M. Smit, Z. Huang, R. A. Ryntz, "Studies of Microhardness and Mar Resistance Using a "Scanning probe microscope", *Prog. Org. Coat.*, 34, 119-129, **1999**.
21. B. V. Gregorovich, K. Adamsons, L. Lin, "Scratch and mar and other mechanical properties as a function of chemical structure for automotive refinish coatings", *Prog. Org. Coat.*, 43, 175-187, **2001**.
22. B. Ramezanzadeh, S. Moradian, A. Khosravi, N. Tahmassebi, "Effect of polysiloxane additives on the scratch resistance of an acrylic melamine automotive clearcoat", *J. Coat. Technol. Res.*, 9, 203-214, **2012**.
23. L. Lin, G. S. Blackman, R. R. Matheson, "A new approach to characterize scratch and mar resistance of automotive coatings", *Prog. Org. Coat.*, 40, 85-91, **2000**.
24. V. Jardret, R. Ryntz, "Visco-elastic visco-plastic analysis of scratch resistance of organic coatings", *J. Coat. Technol. Res.*, 2, 591-598, **2005**.
25. V. Jardret, H. Zahouani, J. L. Loubet, T.G. Mathia, "Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test", *Wear*, 8-14, **1998**.
26. C. Gauthier, S. Lafaye, R. Schirrer, "Elastic recovery of a scratch in a polymeric surface: Experiments and analysis", *Tribol. Int.*, 34, 469-479, **2001**.
27. B. J. Briscoe, E. Pelillo, S. Sujeet, K. Sinha, "Scratch hardness and deformation maps for polycarbonate and polyethylene", *Polym. Eng. Sci.*, 36, 2996-3005, **1996**.
28. S. V. Hainsworth, P. J. Kilgallon, "Temperature-variant scratch deformation response of automotive paint systems", *Prog. Org. Coat.*, 62, 21-27, **2008**.
29. W. C. Shen, B. Jiang, F. N. Jones, "Measurement of mar resistance and study of marring mechanism of polymeric coatings with scanning probe microscope", *J. Coat. Technol.*, 72, 89-95, **2000**.
30. W. Shen, L. Mi, B. Jiang, "Characterization of mar/scratch resistance of coatings with a nano-indenter and a scanning probe microscope", *Tribol. Int.*, 39, 146-158, **2006**.
31. C. M. Seubert, M. E. Nichols, "Scaling behavior in the scratching of automotive clearcoats", *J. Coat. Technol. Res.*, 4, 21-30, **2007**.
32. S. Frings, C. F. Van Nostrum, R. Van Der Linde, H. M. Meinema, C. H. A. Rentrop, "Morphology of hybrid coatings based on polyester, melamine resin and silica and the relation with hardness and scratch resistance", *J. Coat. Technol.*, 72, 83-89, **2000**.
33. S. Ducret, C. Pailler-Mattei, V. Jardret, R. Vargiolu, H. Zahouani, "Friction characterization of polymer (UHMWPE) during scratch tests: Single and multi asperity contact", *Wear*, 255, 1093-1100, **2003**.
34. A. Krupicka, M. Johansson, O. Wanstrand, A. Hult, "Mechanical response of ductile polymer coatings to contact and tensile deformation", *Prog. Org. Coat.*, 48, 1-13, **2003**.
35. A. Krupicka, M. Johansson, M. Johansson, A. Hult, "The effect of long term recovery and storage on the mechanical response of ductile poly(urethane) coatings", *Prog. Org. Coat.*, 48, 14-27, **2003**.