

تأثیر پیرشدگی فیزیکی بر روی مقاومت ضربه لوله های پی وی سی سخت

بیشترین شکست لوله های upvc مورد استفاده در شبکه گازرسانی از دسته سوم می باشد. در این مطالعه شکنندگی لوله های پی وی سی در مقابل پیرشدگی فیزیکی با استفاده از آزمون سقوط وزنه بررسی می شود. دمای انتقال چقرمه به شکننده ابتدا برای لوله upvc در مراحل مختلف پیرشدگی اندازه گیری می شود. تنش بحرانی استاندارد بر روی نمونه اعمال می شود. ارزیابی دمای انتقال چقرمه به شکننده و سپس با استفاده از داده های آزمایشگاهی به دست آمده یک مدل برای تنش تسلیم پلیمر استخراج می گردد. افزایش کوچکی در دمای انتقال برای لوله های آب با پیرشدگی فیزیکی مشاهده می شود. با استفاده از فرض مشابه برای لوله های گاز upvc افزایش چشمگیری مشاهده می شود.

مقدمه :

یکی از بزرگترین کاربردهای صنعتی پلی وینیل کلراید سخت استفاده آنها در سیستم های لوله می باشد. لوله های پی وی سی برای ابرسانی و انتقال فاضلاب و همچنین بای انتقال گاز در فشار کم استفاده می شود. 22500 کیلومتر از لوله های upvc هنوز در حال کار می باشد و در آینده ای نزدیک به 50 سال از طول عمر پیش بینی شده خواهد رسید. تعویض این لوله ها پس از 50 سال بسیار هزینه بر است. فشار لوله های گاز upvc از 100 mbar تجاوز نمی کند. همچنین تنش های وارد شده به دیواره از طرف بستر لوله های گاز ناچیز می باشد. بنابراین اطلاعات شکست های اتفاق افتاده در شبکه گاز رسانی نشان می دهد شکست خود به خودی لوله های گاز به سختی اتفاق می افتد و بیشتر شکستها از نوع سوم (نیروی ضربه) میباشد. بنابراین رفتار لوله های UPVC در مقابل نیروی ضربه خصوصا اینکه شکست به صورت چقرمه می باشد یا شکننده بسیار مهم است. لوله های پی وی سی که رفتار چقرمه قبل از شکست دارند به طور قابل توجه می توانند نیروی بیشتری قبل از شکست جذب کنند. این لوله ها نیروی ضربه بالاتری می توانند نسبت به لوله های شکننده تحمل کنند. علاوه بر

این قطع جریان گاز در این لوله ها راحت تر است چون امکان نصب درپوش موقت بدون ریسک خرابی بیشتر نسبت به لوله های شکننده وجود دارد. اگر شکست لوله با رفتار شکننده اتفاق بیافتد معمولاً قسمت بیشتری از لوله خراب می شود. سطح ناصاف شکست قطع جریان گاز را سخت تر می کند. به دلایل مذکور شکننده نبودن یک عامل تعیین کننده در طول عمر شبکه های گاز رسانی می باشد. اشکاراست که لوله های گاز باید مقاومت به ضربه خوبی در تمام طول عمرشان داشته باشند و نه فقط در زمان نصب. پلیمرهای شیشه ای مانند UPVC در طول زمان به دلیل پیرشدگی فیزیکی شکننده تر می شوند. بنابراین تاثیر پیرشدگی فیزیکی بر روی مقاومت ضربه UPVC در این مقاله مطالعه شده است.

مطالعات LeGrand و Peilsto"cker نشان می دهد که پیرشدگی فیزیکی تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار پلی کربنات ها مانند PC و UPVC در مقابل ضربه دارد. پیرشدگی فیزیکی به این دلیل رخ می دهد که پلیمر های کریستالی در تعادل ترمودینامیکی نیستند و پیوسته به سمت آن حرکت می کنند. اگر چه جنبش در حالت کریستالی بسیار کم است اما زنجیرهای پلیمر تغییرات کمی دارند که منجر به تغییر تعادل ترمودینامیکی و رفتن به سوی تعادل می شود. تحرک زنجیرهای پلیمری در دمای بالا بیشتر می شود. به دنبال تغییرات ترمودینامیکی، دانسیته پلیمر افزایش می یابد و تحرک پلیمر کاهش می یابد و مقاومت در برابر تغییر شکل پلیمر کاهش می یابد. که منجر به افزایش قابل توجه در تنش تسلیم پلیمر های کریستالی در طول پیرشدگی فیزیکی می شود.

تاثیر پیرشدگی فیزیکی بر روی تغییر شکل پلیمر های کریستالی در شکل 1 نشان داده شده است. انیلینگ (که اینجا به عنوان بهبود حرارتی در دماهای بالا ولی زیر نقطه شیشه ای پلیمر تعریف می شود) فرایند پیرشدگی فیزیکی را تسریع می بخشد. نتیجه تنش به کار برده شده روی زنجیره های پلیمری افزایش در تنش تسلیم است بدون اینکه سختی زنجیرها تحت تاثیر قرار بگیرد. تاثیر متقابل نرم شدگی و سخت شدگی زنجیرهای پلیمر، درجه تغییر فرم پلاستیک زمانی که در معرض نیروی کشش قرار می گیرد را نشان می دهد. درجه لوکالیزیشن تاثیر بسزایی در رفتار شکست پلیمرهای کریستالی دارد. افزایش نرم شدگی

زنجیرها منجر به کاهش ازدیاد طول در نقطه پارگی و در نتیجه شکست ترد می شود. این رفتار شکست ممکن است دور از عقل باشد ولی با توجیه زیر قابل فهم است.

در مقیاس میکروسکوپی شکل گیری ترک ها با تغییر شکل پلاستیک شروع می شود. تنش هیدروستاتیک در پلاستیک تقویت می شود که به دلیل محدود شدن تغییر فرم توسط مواد محیط اطراف است. زمانی که تنش هیدروستاتیک از مقدار بحرانی فراتر می رود شکاف اتفاق می افتد. این شکاف ها رشد می کنند و به زنجیرهای پلیمر ارایش یافته بین شکاف ها می پیوندند. مقدار تنش هیدروستاتیک بحرانی که در آن شکاف اتفاق می افتد به میزان قالب توجه تحت تاثیر پیرشدگی فیزیکی می باشد. تغییر در رفتار شکست می تواند مربوط به فرایند پیرشدگی فیزیکی باشد که تغییر شکل پلیمر تا اندازه ای که تنش هیدروستاتیک در مواد از مقدار بحرانی فراتر رود پیش می رود.

پیرشدگی منجر به تغییراتی در پلیمر می شود که منجر به تغییر رفتار پلیمر را از حالت چقرمه به ترد می شود. که به درستی در مطالعات مربوط به تاثیر پیرشدگی فیزیکی بر روی مقاومت ضربه ایزود و چارپی UPVC مشاهده می شود. نتایج نشان می دهد کاهش مقاومت ضربه باعث می شود دمای انتقال چقرمه به ترد به سمت دماهای بالاتر شیفست کند. Adam و Ryan افزایش دمای انتقال چقرمه به ترد را برای پلی کربنات بعد از انیلینگ گزارش کرده اند. هدف این مقاله بررسی این موضوع است که پیرشدگی چگونه بر روی تردی تاثیر می گذارد که با ارزیابی تنش تسلیم بعد از انیلینگ انجام می شود. در مرحله بعد داده های انیلینگ مربوط به پلی کربنات، به منظور بررسی چگونگی انتقال از حالت ترد به چقرمه در یک حالت ترمودینامیکی ثابت و در نتیجه تنش تسلیم ثابت، بررسی شده است. این مشاهدات پیش بینی دمای انتقال چقرمه به ترد بر پایه تاثیر دما و پیرشدگی فیزیکی بر بروی تنش تسلیم را راحت تر می کند. نتایج آزمایشات انجام شده برای بررسی تاثیر پیرشدگی فیزیکی بر بروی تغییر فرم و رفتار ضربه UPVC که در ابتدا توضیح داده شد با پیش بینی انجام شده توسط فرضیه مقایسه می شود. در ادامه در رابطه با نتایج حاصل شده برای لوله های UPVC گرید آب و لوله های گاز رسانی که برای 50 سال در سرویس بوده اند بحث می شود.

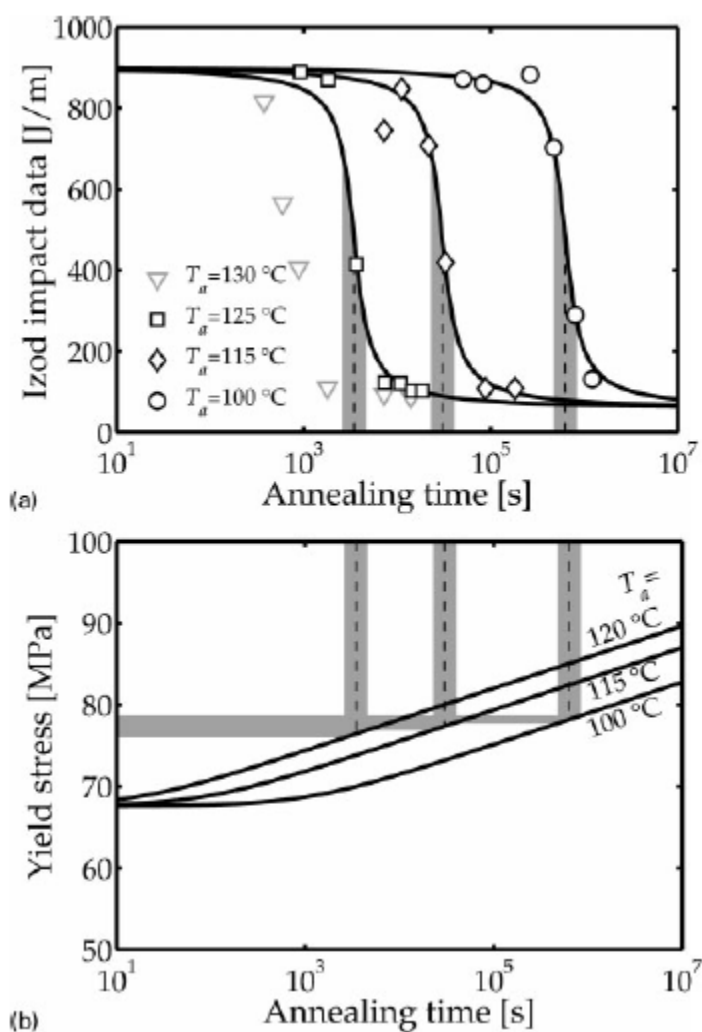
آنیلینگ پلی کربنات

یکی از مطالبی که در مقدمه اشاره شد این بود که پیش بینی می شود دمای انتقال چقرمه به ترد وابسته به حالت ترمودینامیکی و بنابراین رفتار پلیمر در تنش تسلیم است. مقدار تنش هیدروستاتیک بحرانی که ترک ها شروع می شود برای پلی کربنات بعد از آنیلینگ ثابت باقی می ماند. در نتیجه اطلاعات انتقال از حالت چقرمه به ترد برای پلی کربنات می تواند به ارزیابی تنش تسلیم در دمای آنیلینگ وصل شود. Klompen و همکارانش ارزیابی تنش تسلیم σ_y پلی کربنات بعد از زمان آنیلینگ t در دمای آنیلینگ T_a را با استفاده از رابطه زیر توضیح دادند.

$$\sigma_y = \sigma_{y,0}(\dot{\epsilon}, T) + c \log \left[\frac{t_{\text{eff}}(t, T_a) + t_{\text{ini}}}{t_0} \right] \quad (1)$$

که c مقدار ثابتی است که برابر با شیب نمودار لگاریتمی تنش تسلیم بر حسب زمان آنیلینگ t است. t_{ini} طول عمر اولیه $t_0 = 1\text{s}$ و $\sigma_{y,0}$ تنش تسلیم در نقطه فرضی $t_{\text{eff}} + t_{\text{ini}} = 1\text{s}$ که بستگی به سرعت کرنش $\dot{\epsilon}$ و دمای مطلق T دارد. *Klompen* و همکارانش مقادیر $\sigma_{y,0} = 26.1\text{ Mpa}$ و $c = 3.82\text{ Mpa/decade}$ و $t_{\text{ini}} = 7.3 \times 10^{10}\text{s}$ را در این معادله استفاده کردند تا ارزیابی صحیحی از تنش تسلیم نمونه های قالب گیری شده پلی کربنات با روش تزریق با سرعت کرنش 10^{-2}s^{-1} و دمای 23°C داشته باشند. زمان موثر t_{eff} اندازه گیری زمان آنیلینگ در یک شرایط مرجع بوده و با استفاده از معادله ارنیوس انطباق زمان دما به دست می آید.

$$t_{\text{eff}}(t, T_a) = t \exp \left[\frac{\Delta U_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_a} \right) \right] \quad (2)$$



ΔU_a انرژی اکتیواسیون است که اختلاف پیرشدگی در دمای آنیلینگ مطلق T_a و پیرشدگی در دمای مرجع مطلق $T_{ref} = 23^\circ\text{C}$ را کمی می کند. Klompen و همکارانش مقدار 205 KJ mol^{-1} را برای انرژی اکتیواسیون پلی کربنات محاسبه کردند. با این مقادیر تنش تسلیم به صورت تابعی از دمای آنیلینگ همانطور که در شکل 2b نشان داده شده قابل شرح است. همانگونه که قبل گفته شد نه تنها تنش بلکه خواص ضربه تحت تأثیر پیر شدگی فیزیکی می باشد. مقاومت ضربه ایزود برای نمونه های پلی کربنات در شکل 2الف گزارش شده است. داده های اندازه گیری شده پس از آنیلینگ در $100 - 200^\circ\text{C}$ برای آنالیز بیشتر استفاده شده است. مقادیر اندازه گیری شده در دمای 130°C با توجه به اینکه زمان آنیلینگ در این دما کوتاهتر از دمای مورد نیاز برای رسیدن به تعادل ترمودینامیکی در این نمونه ها است، نادیده گرفته شده است. خطوط ممتد در شکل 2a نتایج مقاومت ضربه بر حسب زمان

آنیلینگ را نشان می دهد. که برای محاسبه زمانی که انتقال از حالت چقرمه به ترد اتفاق می افتد برای هر دمای آنیلینگ می تواند به کار رود. زمان انتقال از چقرمه به ترد به صورت خطوط خاکستری نشان داده شده است. خطوط مشابه برای تنش تسلیم در شکل 2b نشان داده شده است. تنش های تسلیم مربوط به انتقال از حالت چقرمه به ترد در چهار دمای آنیلینگ همه در رنج 2.5 Mpa است. این مشاهدات نشان می دهد که یک حالت ترمودینامیکی بحرانی و بنابراین یک تنش بحرانی وجود دارد که در آن انتقال از حالت چقرمه به ترد اتفاق می افتد. این نتیجه در راستای نتایج حاصل شده توسط Engels است که استفاده از تنش تسلیم بحرانی را برای محاسبه طول عمر پیشنهاد می کند. باید دقت کرد که مقادیر به دست آمده برای تنش تسلیم بحرانی برای پیش بینی انتقال به حالت ترد در دیگر مدل های هندسی بارگذاری نباید به کار رود. برای مثال تنش تسلیم بحرانی به محل اعمال توسط ضربه توسط ضربه زن بستگی دارد. و صرفاً برای پیش بینی انتقال از حالت چقرمه به ترد در شرایط مشخص این تست استفاده می شود.

پیش بینی دمای انتقال $T_{d \rightarrow b}$ برای uPVC

در مرحله قبل مشخص شد که انتقال از حالت چقرمه به ترد در آزمون های ضربه ایزود انجام شده بر روی پلی کربنات در دمای ثابت تست در تنش تسلیم بحرانی اتفاق می افتد. در این مطالعه آزمون های ضربه بر روی UPVC در دماهای آنیلینگ مختلف به منظور بررسی تأثیر پیرشدگی فیزیکی بر روی دمای انتقال چقرمه به ترد $T_{d \rightarrow b}$ انجام می شود. تغییر $T_{d \rightarrow b}$

با پیرشدگی فیزیکی (که معادل تغییر در حالت ترمودینامیکی است) وابسته به تغییر تنش تسلیم است با در نظر گرفتن فرضیه زیر: شکست ترد زمانی اتفاق می افتد که تنش تسلیم σ_y نمونه های UPVC از یک تنش تسلیم بحرانی σ_{cr} عبور می کند. این تنش تسلیم بحرانی بستگی به شرایط آنیلینگ (دما T_a و زمان آنیلینگ t) و دمای آزمون T دارد. به شرطی که هر دو دما زیر دمای انتقال شیشه ای پلیمر باشد. به عبارت دیگر لوله به صورت ترد عمل می کند اگر

$$\sigma_y(T, t, T_a) \geq \sigma_{cr} \quad (3)$$

این فرضیه برای ارتباط دادن رفتار ضربه UPVC به رفتار تنش استفاده شده است. این فرضیه فقط برای بررسی تاثیر سرعت کرنش، دما و پیرشدگی فیزیکی بر روی رفتار UPVC می تواند استفاده شود. در این مقالات رفتار شکست UPVC از لحاظ ترمورئولوژیکی ساده در نظر گرفته شده است: فقط یک مکانیسم ریلکسیشن، قسمت α مربوط به دمای انتقال شیشه ای در رفتار تسلیم شرکت می کند. این فرضیه در سرعت های کرنش کم و دماهای میانه استفاده می شود. در سرعت های کرنش بالا یا دماهای پایین، انتقال β نیز در رفتار تسلیم دخیل است.

Roetling نشان داد که تنش تسلیم پلیمرها که وابسته به سرعت کرنش $\dot{\epsilon}$ و دما T می باشد با رابطه Ree-Eyring قابل توصیف است.

$$\sigma_y(T, \dot{\epsilon}) = \sum_{x=\alpha, \beta} \frac{RT}{v_x^*} \sinh^{-1} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{0,x}} \exp\left(\frac{\Delta U_x}{RT}\right) \right] \quad (4)$$

که R ثابت جهانی گاز، v_x^* حجم فعال، ΔU_x انرژی فعال سازی و $\dot{\epsilon}_{0,x}$ فاکتور نمایی مربوط به آنتروپی سیستم است. فاکتور x جایگزین α و β می باشد که نشان دهنده مکانیسم ریلکسیشن است. تاثیر پیرشدگی فیزیکی بر روی تنش تسلیم UPVC با فاکتور نمایی که به صورت تابعی از زمان است توضیح داده می شود. نتایج نشان می دهد مشابه رفتار پلی کربنات، فاکتور نمایی برای قسمت β ، $\dot{\epsilon}_{0,\beta}$ ، برای UPVC با تغییر دماهای آنیلینگ بررسی شده در این مطالعه (45°C تا 60°C) تغییر نمی کند. UPVC در این دماها، در تعادل ترمودینامیکی قرار دارد و در نتیجه تحت آنیلینگ تغییری نمی کند. سرعت پیرشدگی با وارد کردن $\dot{\epsilon}_{0,\alpha}$ به صورت تابعی از زمان در معادله 4 به دست می آید.

$$\dot{\varepsilon}_{0,\alpha} = b_0 \left[\frac{t_{eff}(t, T_a) + t_{ini}}{t_0} \right]^{b_1} \quad (5)$$

که b_0 و b_1 ثابت هستند. $t_0 = 1$ s و t_{ini} عمر اولیه مواد است. زمان مؤثر t_{eff}

سرعت تغییر فرم

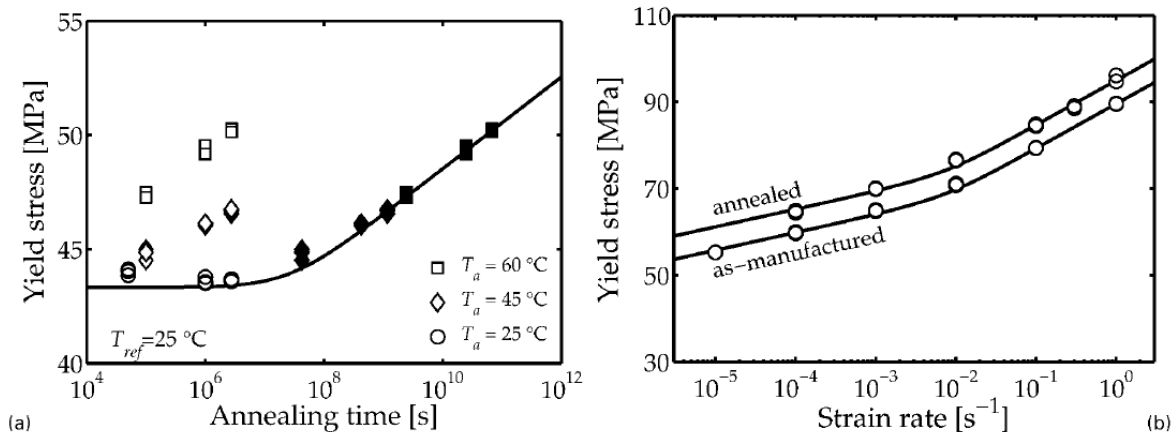
نتایج اندازه گیری های تنش تسلیم کشش در شکل 4 نشان می دهد تنش تسلیم از α به β + انتقال یافته است. تاثیر ریلکسیشن β در سرعت های تنش بالاتر از 0.03 s⁻¹ ظاهر می شود. خطوط ممتد نتایج معادله 4 با استفاده از پارامترهای جدول 4 را نشان می دهد. پاراکترهای مربوط به ریلکسیشن α با استفاده از پارامترهای مشخص شده برای گریدهای مختلف upvc محاسبه شده است. پارامترهای مربوط به ریلکسیشن β از مطالعات Bauwens و همکارانش پذیرفته شده است. فاکتورهای $\dot{\varepsilon}_{0,\alpha}$ و $\dot{\varepsilon}_{0,\beta}$ با استفاده از نقاط مرجع به ترتیب در ناحیه α و $\beta + \alpha$ به دست آمده است. انطباق منحنی ترسیم شده با نتایج آزمایشگاهی دو نتیجه مهم می دهد. اول اینکه در ناحیه α ، سرعت تغییر فرم لوله گاز upvc مشخص شده در مرجع 25 برابر با سرعت تغییر فرم گرید upvc مورد استفاده در این مقاله یکسان است. دوم اینکه در ناحیه $\beta + \alpha$ تلفیق داده های ناحیه α و پارامترهای پذیرفته شده از Bauwens و همکارانش انطباق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد.

جدول 2. مقادیر پارامترهای مربوط به معادله 6 برای مکانیسم ریلکسیشن α و β در upvc

	α	β
$\dot{\epsilon}_{0,x}/s^{-1}$	1.88×10^{38}	2.21×10^0
$v_x^*/m^3 \text{ mol}^{-1}$	$1.29 \times 10^{-3*}$	$8.39 \times 10^{-4}\dagger$
$\Delta U_x/J \text{ mol}^{-1}$	$2.97 \times 10^5*$	$5.86 \times 10^4\dagger$
$\Delta U_{a,x}/J \text{ mol}^{-1}$	2.38×10^5	
b_0/s^{-1}	7.39×10^{41}	
b_1	-0.45	

*Value adopted from Visser *et al.*²⁵ (including pressure dependence).

†Value adopted from Bauwens-Crowet *et al.*³⁸



شکل . تاثیر پیرشدگی فیزیکی بر روی سرعت تغییر فرم upc . تنش تسلیم در سرعت $s-1$ 10^{-4} و $250c$ بر حسب زمان انیلینگ. نشانه های تو خالی تنش تسلیم بر حسب زمان پیرشدگی را در دمای مشخص انیلینگ Ta نشان می دهد. نشانه های تو پر اندازه گیری های مشابه را نشان می دهد ، در حالی که زمان انیلینگ در دمای مرجع $250c$ محاسبه شده است. منحنی که از معادله 6 پیروی می کند با خط سیاه نشان داده شده است.

نمودار b تنش تسلیم کشش بر حسب سرعت کرنش در دمای $00c$ را برای دو نمونه $upvc$ نشان می دهد. یک نمونه پس از تولید اصلاح حرارتی نشده است و یک نمونه در دمای $60c$ به مدت $s \ 6 \times 10^6 \ 2.7$ انیلینگ شده است. خطوط ممتد مربوط به محاسبه انجام شده توسط معادله 6 می باشد.

تعیین سرعت پیرشدگی

سهام α سرعت پیرشدگی برای UPVC در مقالات قبلی تعیین شده است. سهم β تنش تسلیم PC تحت تاثیر تاریخچه حرارتی نمی باشد. رفتار مشابهی برای UPVC پیش بینی می شود. دمای انتقال β برای UPVC -40°C است و بنابراین جنبش مربوط به ریلکسیشن β در دمای انیلینگ 60°C در تعادل ترمودینامیکی است

شرایط تست سقوط وزنه به گونه است که انرژی ضربه ای اعمال می شود که کلیه نمونه ها شکسته شوند. نمونه ها از نظر رفتار در شکست به سه گروه تقسیم می شوند: چقرمه، شبه چقرمه و ترد. دیاگرام جابه جایی نیرو برای هر یک از انواع شکست در شکل 6 نشان داده شده است. نقاط بحرانی در منحنی جابه جایی نیرو به وسیله دوربین با سرعت بالا نشان داده شده است.

دیاگرام جابه جایی نیرو برای شکست چقرمه (شکل 6 بالا چپ) افزایش پیوسته ای تا نیروی بین 5 KN تا 6 KN را نشان می دهد. یک انحنای در شروع دفرمیشن مشاهده میشود. تغییر فرم اتفاق افتاده قبل از این انحنای مربوط به تغییر فرم الاستیک است در حالی که تغییر فرم بعد از این انحنای عمدتاً پلاستیک است. مقدار قابل توجهی از سفید شدگی ناشی از تنش در قسمت زیر چکش ایجاد می شود. لحظه ای که نیرو به ماکزیمم مقدار می رسد کناره های نمونه به سمت بالا خمیده می شود و تماس با سطح زیری را دست می دهد. در نواحی که میزان کشیدگی نمونه زیاد است شروع به ایجاد ترک های ریز می کند. این ترک های ریز رشد می کنند و شکافی ایجاد می شود که امکان نفوذ چکش به داخل نمونه را می دهد. به دلیل اصطکاک بین چکش و نمونه، نیرو مستقیماً به صفر کاهش پیدا نمی کند.

نمونه های شبه چقرمه تا نقطه ای که نیرو به مقدار ماکزیمم می رسد مانند نمونه های چقرمه عمل می کنند. بعد از این نقطه چکش قسمتی از نمونه که تقریباً سائز سندان را دارد پانچ می کند. این قسمت از شکست همچنان چقرمه است اما قسمت باقی مانده نمونه به

صورت ترد می شکنند. در نتیجه بالا رفتن انرژی الاستیک قسمت های شکسته شده با سرعت زیادی به اطراف پرتاب می شوند.

شکست ترد در قسمت چپ منحنی نمونه های ترد اتفاق می افتد. قبل از اینکه نیرو به مقدار ماکزیمم برسد. بیشتر شکست های ترد قبل از انحنا منحنی اتفاق می افتد بنابراین قبل از تغییر شکل پلاستیک شکست اتفاق می افتد. پس از شکست ، با اینکه هیچ نیرویی به نمونه اعمال نمی شود ولی اثرات دینامیک منجر به نوسان نیرو می شود. (قسمت انتهایی چپ شکل 6)

انالیز انرژی ضربه

در حین تست ضربه قسمتی از انرژی جنبشی ضربه زن به عنوان انرژی الاستیک جذب می شود و قسمتی از انرژی جهت تغییر فرم پلاستیک، اصطکاک و شکست هدر می رود. مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه E اندازه ای از چقرمگی نمونه تحت ضربه می باشد. زمانی که از اتلاف های اصطکاکی صرف نظر شود ، انرژی جذب شده با معادله زیر محاسبه می شود.

F نیروی اعمال شده به نمونه و S جابه جایی سر چکش و t contact زمانی که چکش در تماس با نمونه است و tf زمانی که شکست اتفاق می افتد

شکست به عنوان لحظه ای که نیروی اعمال شده به مقدار ماکزیمم می رسد تعریف می شود. جابه جایی نیرو برای نمونه های چقرمه تا زمان رسیدن به نیروی ماکزیمم همانند نمونه های شبه چقرمه است. Emax این دو نوع شکست یکسان است لذا تمایز شکست ترد را از شکست شبه چقرمه را آسان می کند. این شکل 8 هیستوگرام Emax که برای کلیه نمونه ها محاسبه شده را نشان می دهد. نمونه هایی که شکست ترد دارند انرژی متوسط J3 در زمان اعمال نیروی ماکزیمم دارند. رفتار جابه جایی نیرو در طول شکست شبه چقرمه تا زمان رسیدن به نیروی ماکزیمم شبیه شکست چقرمه است. این نمونه ها همسان هستند و تحت عنوان نمونه

های چقرمه دسته بندی می شوند . انرژی متوسط در زمان اعمال ماکزیمم نیرو برای این دسته تقریباً 34J است.

انرژی ماکزیمم نیرو Emax برای یک رنج از دمای آزمون برای هر ست از نمونه های لیست شده در جدول 1 محاسبه شده است. مقادیر محاسبه شده در بر حسب دما برای نمونه های تولید شده (در شکل 9 الف) و نمونه های انیلینگ شده به مدت 6 10³ ثانیه در دمای 60 °C (در شکل 9 ب) به صورت نمودار آورده شده است.

اختلاف بین نمونه های چقرمه و ترد در شکل 9 به خوبی قابل مشاهده است. انتقال از شکست چقرمه در دماهای بالاتر به سمت شکست ترد در دماهای پایین تر اتفاق می افتد هر چند که به وضوح قابل تشخیص نیست. در محدوده انتقال هم شکست ترد و هم چقرمه اتفاق می افتد. که منجر به انحراف استاندارد زیادی در محدوده Emax می شود. از طرف دیگر به وضوح مشاهده می شود که نمونه های پس از تولید در دماهای پایین نسبت به نمونه های انیلینگ شده ، انتقال به سمت شکست ترد دارند. شیفت کردن دمای انتقال شکست ترد به چقرمه در اثر پیرشدگی فیزیکی در قسمت بعدی به صورت کمی نشان داده می شود.

آنالیز انتقال از شکست چقرمه به ترد

بحث :

نتایج آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از مدل پیش بینی شده نشان می دهد که پیرشدگی فیزیکی اثر کمی بر روی $T_{d \rightarrow b}$ لوله های آب UPVC دارد. 50 سال پیرشدگی در دمای 10°C 0 دمای $T_{d \rightarrow b}$ را به سختی تغییر می دهد. نتایج نشان می دهد سرعت پیرشدگی لوله های آب با لوله های مورد استفاده در توزیع گاز متفاوت است. برای اپراتور هایی که شبکه گاز رسانی کار می کنند تاثیر این تفاوت در پیش بینی انتقال از حالت چقرمه به ترد جذاب است. برای فرض اول تنش تسلیم بحرانی یکسان برای محاسبه تغییر دمای انتقال استفاده شده است. تنش تسلیم بحرانی دمای انتقال از چقرمه به ترد را در یک از پیرشدگی

مشخص، تعیین می کند و به طول عمر لوله مربوط نمی شود. لوله UPVC یا عمر اولیه انتخاب شده با تنش تسلیم 50 MPa (با سرعت کرنش S-1 3-10 و در دمای محیط 23 °C) و با سرعت خنک شونده ملائم پس از تولید. با استفاده از نتایج حاصله، ارتباط بین طول عمر و دمای انتقال $T_{d \rightarrow b}$ برای لوله های گاز در شکل 12 نشان داده شده است. توجه کنید که هم زمان و هم رنج دما در طول محور ها در شکل 12 با شکل 11 الف متفاوت است.

مدل پیش بینی شده برای دمای انتقال برای لوله های گاز به طور واضح نسبت به لوله های آب بسیار حساستر به پیرشدگی فیزیکی می باشد. $T_{d \rightarrow b}$ به طور متوسط 5.7 °C به ازای هر دهه برای لوله های گاز و 2.50 °C به ازای هر دهه برای لوله های آب می باشد. در طول سرویس 50 سال در دمای 10 °C دمای انتقال چقرمه به ترد می تواند به 7 °C برسد (صرفنظر تاثیر پیرشدگی روی تردی این گرید از UPVC هنوز خیلی کمتر از تردی ناشی از انیلینگ برای پلی کربنات است).

نتیجه گیری :

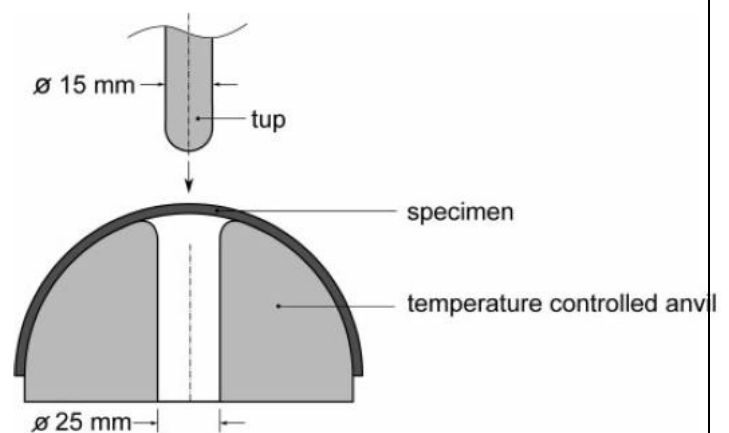
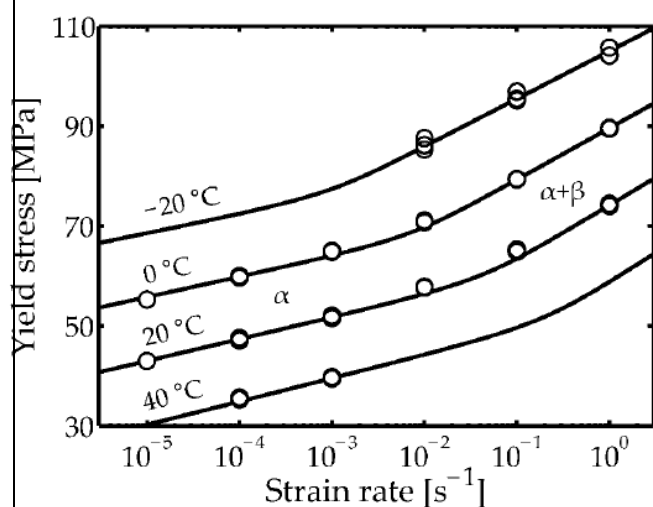
آزمون سقوط وزنه برای بررسی اثر پیرشدگی بر روی دمای انتقال چقرمه به ترد لوله های پی وی سی استفاده شد. آزمایش هایی که بر روی لوله های آب انجام شد نشان می دهد دمای انتقال به شدت تحت تاثیر زمان پیرشدگی است. برای انیلینگ به مدت 6 تا 10³ ثانیه در 60 °C که معادل تقریباً 500 سال در دمای سرویس لوله های گاز است افزایش 4 درجه در دمای انتقال مشاهده می شود. این افزایش کم در دمای انتقال با تغییر دمای انتقال $T_{d \rightarrow b}$ با پیرشدگی فیزیکی با استفاده از این فرضیه که انتقال از رفتار چقرمه به ترد زمانی اتفاق می افتد که تنش تسلیم از مقدار بحرانی که مستقل از دما می باشد عبور می کند. افزایش محاسبه شده برای لوله آب بعد از 50 سال سرویس در دمای 10 °C، 0.2 °C است. بنابراین نتیجه گیری می شود پیرشدگی فیزیکی در طول سرویس لوله ها بر روی رفتار شکست لوله تاثیری ندارد اما تاریخچه حرارتی لوله قبل از نصب، رفتار شکست لوله را در طول مدت سرویس مشخص می کند. با استفاده از فرضیه مشابه برای تغییر تنش تسلیم لوله های UPVC گرید گاز تحت پیرشدگی، پیش بینی می شود که $T_{d \rightarrow b}$ برای این لوله ها در طول مدت سرویس

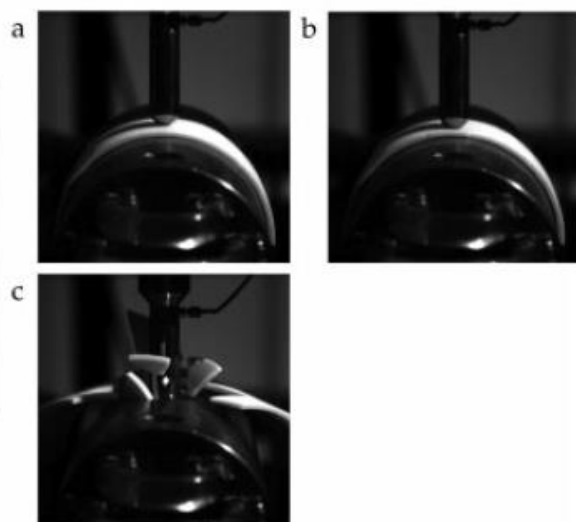
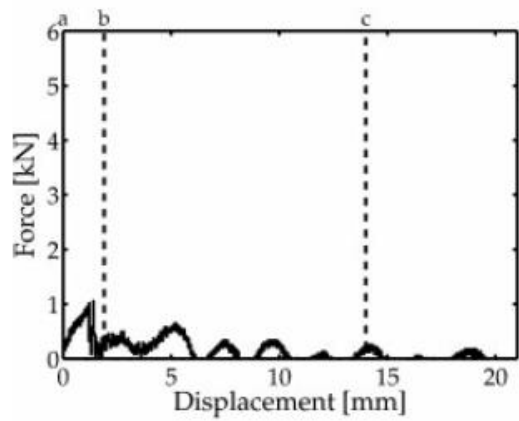
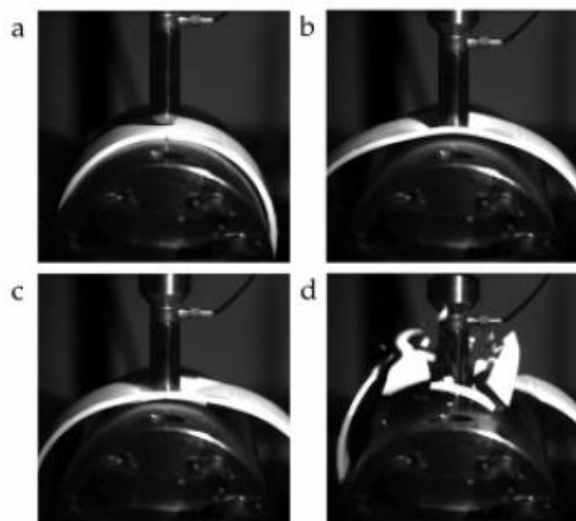
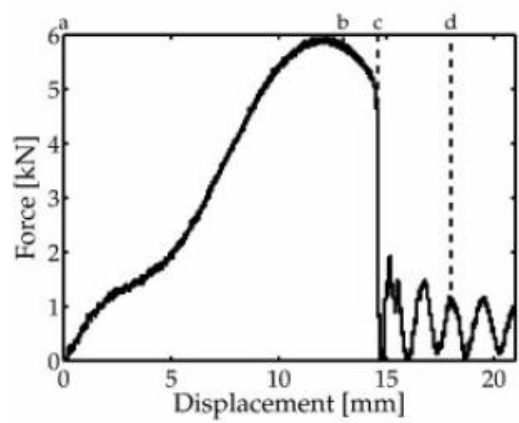
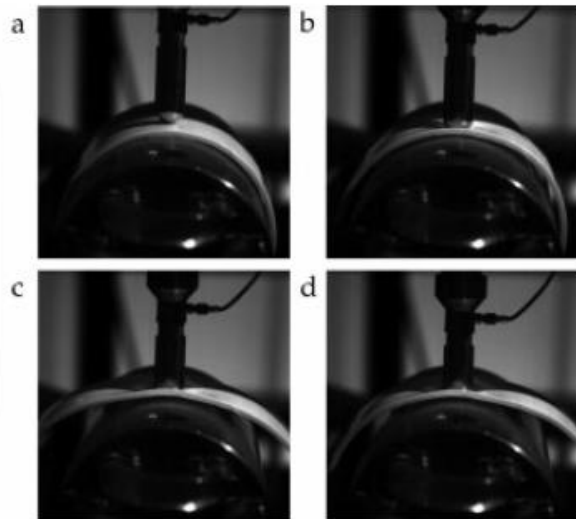
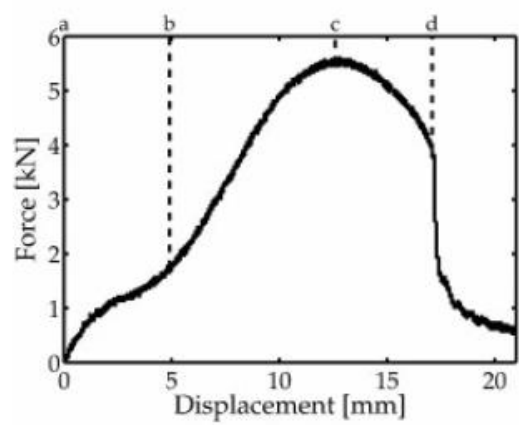
بیشتر تحت تاثیر پیرشدگی فیزیکی هستند. افزایش حدود 0 ٪C پیش بینی می شود. برای بررسی پارامترهای کلیدی تاثیر گذار در طول عمر لوله های گاز که در حال حاضر در سرویس هستند نیاز به آزمون های ضربه بیشتری می باشد.

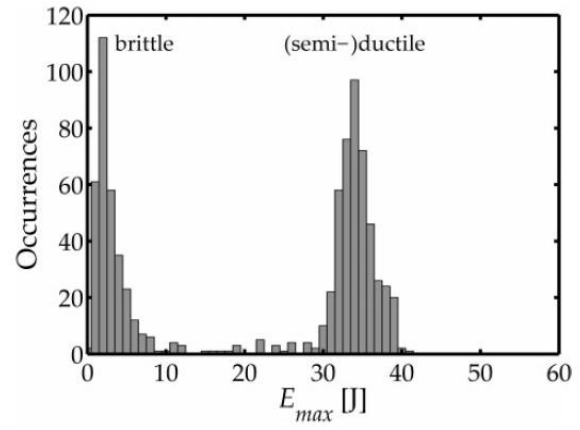
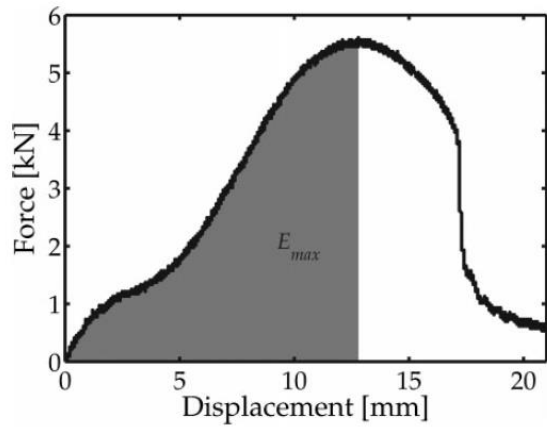
$$\sigma_y(T, \dot{\epsilon}, t, T_a) = \frac{RT}{v_\alpha^*} \sinh^{-1} \left\langle \frac{\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{\Delta U_\alpha}{RT}\right) t_0^{b_1}}{b_0 \left\{ t \exp\left[\frac{\Delta U_{\alpha,\alpha}}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a}\right)\right] + t_{ini} \right\}^{b_1}} \right\rangle \dots \quad (6)$$

$$+ \frac{RT}{v_\beta^*} \sinh^{-1} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{0,\beta}} \exp\left(\frac{\Delta U_\beta}{RT}\right) \right]$$

No.	Annealing time/s	Annealing temperature/°C
1	As received	
2	2×10^6	45
3	1×10^5	60
4	1×10^6	60
5	3×10^6	60







$$E = \int_{s(t_{contact})}^{s(t_f)} F(s) ds \quad (7)$$

