

3

الخصوع والكسر

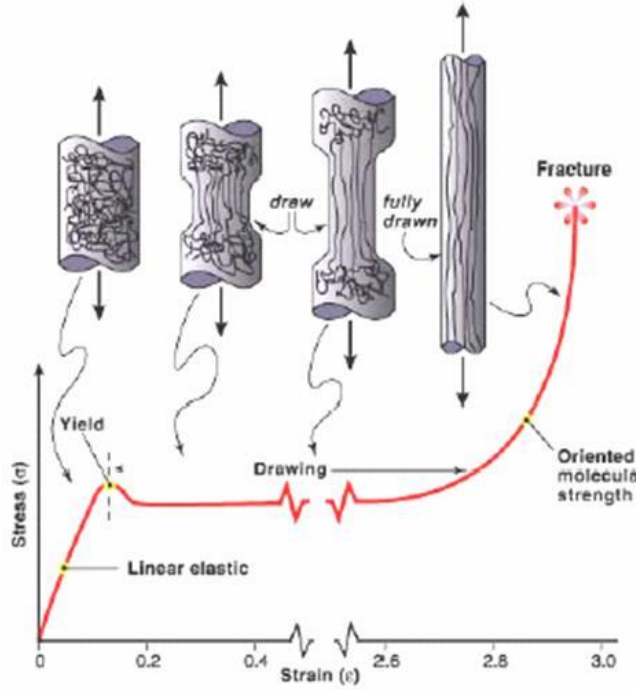
Yield and fracture

1.3. مقدمة

عند زمن ثابت يبدأ منحنى الإجهاد-الإنفعال للدائن بالانحراف من السلوك الخطي عند (0.01 - 0.001) ، وفي الإنفعالات العالية عند (0.01 - 0.1) ، يصبح الانحراف كبير جداً وقيمة $(d\sigma/d\varepsilon)$ تذهب إلى الصفر، وتعرف هذه الحالة بنقطة الخصوع. بعض المواد تنكسر بصورة سريعة بعد أو حتى قبل الخصوع ، ولكن اللدائن الأكثر ليونة مثل البولي أثلين يمكن أن يصل الإنفعال إلى نقطة عالية مثلاً (25) قبل الفشل النهائي ومن الصعب أن نميز بين قابلية الرجوع للإنفعال المرن وعدم الرجوع للإنفعال اللدن، لأن إسترجاع البوليمير لأبعاده الأصلية يعتمد على درجة الحرارة (T) وعلى الزمن (t) المسموح للإسترجاع.

الشكل (1) يمثل منحنى الإجهاد-الإنفعال للبوليميرات المتبلورة . اللدائن المطاوعة للحرارة عند كتلة جزيئية نسبية عالية يمكن إستعادة أغلب أبعادها بصورة تامة عند إنفعالات عالية إذا كانت ساخنة. القوة الدافعة للاستعادة هي العشوائية كما في المطاط المقسى حيث لا توجد هناك ترابطات عرضية في اللدائن المطاوعة للحرارة ، حيث إن السلاسل متشابكة وأيضاً توجد

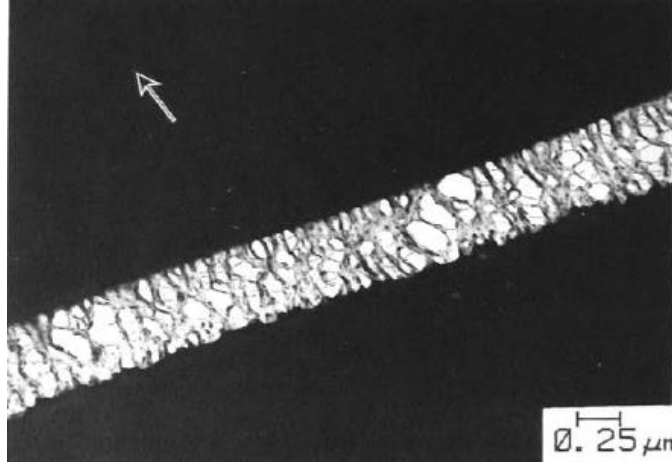
ترابطات فيزيائية أخرى بين الجزيئات تمتلك نفس التأثير الجزيئي سيجعل المادة تتصرف تصرف مشابه إلى الشبكة.



الشكل (1) : منحنى الإجهاد-الإنفعال للبوليميرات المتبلورة

عدد قليل من اللدائن تنكسر بنمط هش، مع عدم وجود علامة للمطيلية (على سبيل المثال البولي ستايرين) ، حيث يتقدم الشق الهش بصورة متغيرة تعتمد على كمية إجهاد الخضوع الموضعي بعد المنطقة المتغيرة قرب قمة الشق وهو ما يبدأ بتكوين التشقق (إنظر الشكل (1)). بالعين المجردة التشقق يبدو مشابه إلى تمدد الشق بالرغم من أن البولي ستايرين هش عند الشد فان يكون مطيلي عند الضغوط ، هذه الحقيقة نفسها بالنسبة إلى اللدائن المطاوعة للحرارة . وأيضاً

بالنسبة للدائن المتصلدة بالحرارة التي تحتوي على ترابطات عرضية قليلة (خفيفة) ، والراتنجات التي تحتوي على ترابطات عرضية قوية تظهر خضوع طبقاً إلى التشابك الجزئي غير قادر على التشوه بما فيه الكفاية البوليمر إذا كان مطيلي أو هش أو أية حالة معطاة يعتمد على مقاومته للخضوع ، و التشقق وبالتالي تقدم الشق.

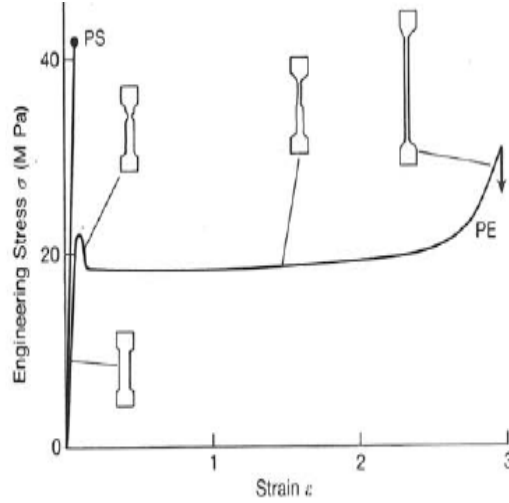


الشكل (1) : تكوين الشق في اللدائن

الطريقة القياسية لقياس معامل وإجهاد الخضوع للبوليميرات هو فحص الشد ، حيث إن القطعة تمسك بأحكام من نهايات القضيب ، ويسحب الجزء في سرعة ثابتة. في هذه الأنواع من التجارب السلوك الخطي أو الطولي المتوقع لمنحني $(\sigma - \epsilon)$ حتى في السلوك الداخلي للمنطقة المرنة للزجة الخطية. عند وصول العينة إلى أقصى حمل، في أغلب البوليميرات المطاوعة انخفاض الحمل فجأة عند وصول الحمل إلى القمة بسبب اندماج الإنفعال اللين والتخصر الموضوعي كما موضح الشكل أعلاه.

البولي ستايرين يتصرف باختلاف تام ، يتكون التشقق عند إنفعالات حوالي 0.5×10^{-2} ويكسر بدون ان ينحرف عن السلوك الخطي في منحني $(\sigma - \epsilon)$. بالرغم من الاختلاف المبين أعلاه

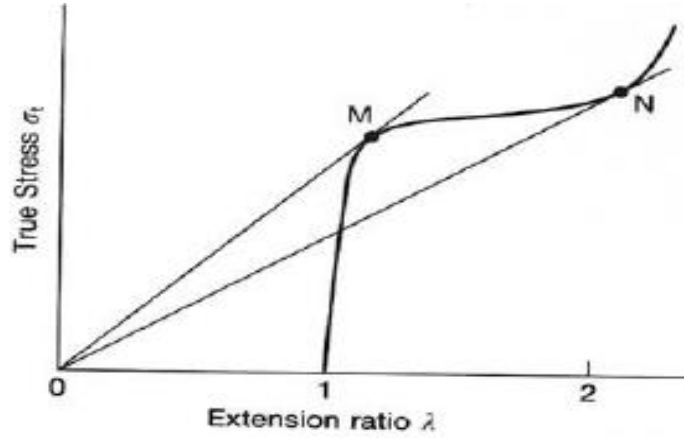
بين نوعي اللدائن الحرارية، من المهم التوازي بين السحب المرئي للبولي أثلين والسحب الداخلي المجهرى للتشقق الليفي في البولي أثلين . الإجهاد الذي يسبب الخضوع يسمى إجهاد الخضوع σ_y . بصورة عامة يعرف في فحص الشد . حيث إن الماسكات تحرك الجزء بمعدل محدد . عند الإجهاد، حيث معدل الجريان مساوياً إلى معدل الإنفعال المفروض. لذا ففي الشكل (2) فإن إجهاد الخضوع للبولي أثلين هو الإجهاد وعند أقصى إجهاد (قمة المنحني).



الشكل (2) : مقارنة بين فشل البولي أثلين والبولي ستايرين في اختبار الشد

2.3. دراسة التركيب والبناء .

في ظاهرة الخضوع والانسياب في فحص الشد يمكن أن تُمثل بالشكل (3) في فحص الشد بحيث أن العينة تنتشوه من L_i والمساحة A_i إلى قيم $A \& L$ في نقطة تكون القوة بها F .



الشكل (3) : ظاهرة الخضوع والانسياب في فحص الشد

$$E_{\text{eng}} = \frac{L - L_i}{L_i} = \lambda - 1$$

عندما يهمل التشوه عند حجم ثابت هذا التقريب يعتبر غير جيد لبوليميرات الجسيئة والزجاجية وجيد لتلك الأكثر مطاوعة.

$$A_i L_i = AL = A_i = A\lambda$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_n = \frac{F}{A_i}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{\lambda}$$

ولذلك عند رسم الميل σ و λ عند أية نقطة

$$\frac{d\sigma}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{d\sigma_t}{d\lambda} - 2 \frac{\sigma_t}{\lambda^2}$$

في معادلة (1) $d\epsilon = d\lambda$ لذلك فأن

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = 0 \text{ (atYield)}$$

ويمكن التعبير عنها

$$\text{(atYiel)} \frac{d\sigma_a}{d\lambda} = 0$$

$$0 = \frac{1}{\lambda} \frac{d\sigma_t}{d\lambda} - \frac{\sigma_t}{\lambda^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\sigma_t}{d\lambda} = \frac{\sigma_t}{\lambda^2} \text{ (atYield)}$$

في الشكل (3) (المماس الأول) سوف يحصل الخضوع طبقاً إلى المعادلة (7) في النقطة (M). لذا يمكن القول أن $(\sigma - \epsilon)$ الهندسي سوف يظهر بأعلى قيمة فقط عند رسم مماس من $\lambda = 0$ إلى النقطة (M) أعلى المنحني $(\sigma_z - \lambda)$. في بعض الحالات من الممكن رسم مماس ثانٍ من نقطة (0) إلى النقطة (N) بحيث تمثل أدنى قيمة لمنحني $(\sigma_n - \lambda)$ ، ومن ثم يُزيد التوجيه الجزيئي الجساءة وعملية السحب للبوليمير في نقطة التخصر تصبح أكثر مقاومة للتمدد مما يؤدي إلى إستقرارها ، وتبدأ عملية التمدد والسحب للمادة النقطية (غير المسحوبة) إلى أن

تخضع العينة، فإذا التصليد الإنفعالي للبوليمير غير كافي لتكون المماس الثاني فإن الرقبة سوف تستمر في التخصر حتى تصل إلى الكسر كما في الزجاج السليكا الساخنة أو المعادن المطيلية. يتأثر التخصر في البوليميرات بعاملين فيزيائيين ليس لهما أهمية كبيرة في المعادن:

1. تبديد الطاقة الميكانيكية كحرارة يمكن أن ترفع درجة الحرارة في منطقة التخصر ، يسبب ليونة تأخذ بنظر الإعتبار (قيمة هذا التأثير تزداد مع معدل الإنفعال).

2. مقاومة التشوه للتخصر يمتلك معدل إنفعال عالي أعلى من البوليمير المحيط (المجاور) ويمكن القول بالحصلة النهائية ان معدل الإنفعال يعتمد على إجهاد الخضوع.

وتأثير العاملين أعلاه يعتمد على طول وسبك العينة وظروف الفحص وخصوصاً معدل الإنفعال). والجدير بالذكر إن سحب الألياف والدقائق والألواح في عمليات التشكيل تحصل بمعدل إنفعال عالي.

3.3. التشقق Crazing .

يمكن أن يلاحظ التشقق في اللدائن الحرارية الزجاجية وفي بعض البوليميرات شبه المتبلورة ، خصوصاً البولي بروبيلين، كما في الشكل (1) والذي يمثل تشقق نموذجي بين سطحي البوليمير. التراكيب الليفية سوف تسحب خارج الجسم الصلب البوليميري وعملية التمدد ويسيطر عليها بواسطة إرتباطات التداخل الجزيئي وأقصى نسبة تمدد بداخل تشقق التراكيب الليفية يكون ضمن النسبة (2- 5) ، وتعتمد على البوليمير وعلى الكتلة الجزيئية النسبية. حالما يتكون التشقق في التراكيب الليفية ، فأما يقوم بسحب المادة من جدران التشقق مما يزيد طول الألياف أو تقاوم فيحصل الكسر.

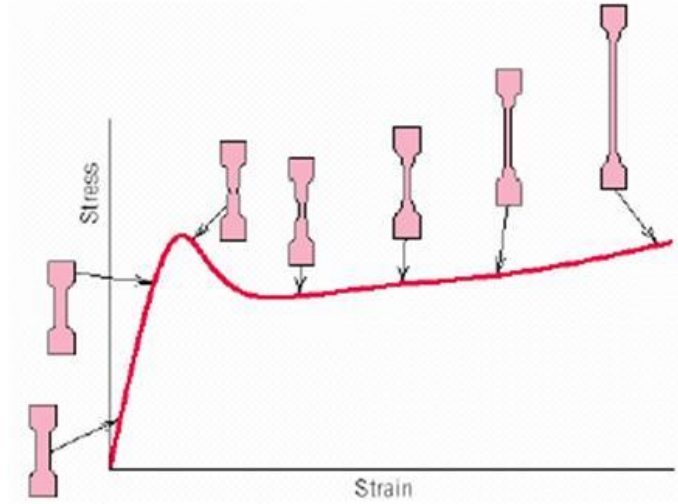
عند الكسر ، تكون قيمة الإجهادات في التراكيب الليفية بصورة نموذجية حوالي (200 Mpa) ، والفحص المجهرى يُبين إن التشقق طويل ويمتلك شكلاً إسفينياً نحيفاً يعمل على تشوه البوليمير ، مع قمة حادة، مقاسها حوالي عشرة نانومتر، ثم يتوسع خارجاً على مسافة حوالي (0.1 mm) إلى كامل السمك بواسطة عملية سحب الليف التي تم توضيحها سابقاً. يخلق التشقق في نقاط تركيز الإجهادات العالية على السطوح الحرة فإذا كان التشقق موجود فإنه سوف ينمو أو يتمدد من نهايته أما إذا كان لا وجود له فإنه سوف يبدأ بالنشوء عند السطح أو الفجوات الموجودة داخل البوليمير (العيوب).

لقد بينَ الفحص المجهرى إن النمو المتتالي يحدث ليس بواسطة تكرار التخليق بثقوب جديدة لكن بواسطة عملية وجود الفجوات المتقدمة والتمدد يعطي مؤشر إلى تكسر البوليمير المتكسر ومعدل تشوه التشقق ومعدل نموه يعتمدان بشكل كبير على الإجهاد المسلط ودرجة الحرارة ، كذلك إن حركية التشقق والخضوع في القص يلعبان دوراً مهماً في الحسابات إذا كان البوليمير هش أو مطيلي.

4.3. التشوه المرني .

بعض الجوانب من التشوه المرني للبوليميرات الشبه متبلورة يستحق ان يأخذ انتباهنا . منحني الإجهاد الانفعال لمادة شبه متبلورة التي تكون في البداية غير مشوهة وأيضاً ممثل في الشكل الأوجه المختلفة للعينة في المراحل التشوه. وكلاً من نقطة الخضوع العليا والسفلى واضحة على المنحني ، والتي يتبعها منطقة أفقية قريبة ، ويتكون عنق صغير في جزء مقياس العينة ، والسلسلة تصبح موجهة (محور السلسلة يكون مصطف موازي لإتجاه الاستطالة ، والتي تقود إلى تمركز التقوية وبناء على هذا ، هناك مقاومة للتشوه المتوسط عند هذه النقطة ، واستطالة العينة تتم بانتشار منطقة العنق عند طول مقياس الطول.

ظاهرة توجيه السلسلة ترافق تمديد العنق . سلوك الشد هذا يمكن أن يتناقض مع هذه القاعدة للمعادن المرنة ،حيث عندما تتكون العنق كل التشوه اللاحق يقتصر على منطقة العنق.



الشكل (4) : منحنى الإجهاد الانفعال لمادة شبه متبلورة

5.3. التشوه اللزج المرن .

البوليمير الغير متبلور ممكن أن يكون مثل الزجاج في درجات الحرارة المنخفضة ، ومعدن مطاطي في درجات الحرارة المتوسطة (درجة تحول الزجاج) , وسائل لزج عندما ترتفع درجة الحرارة . للتشوه الصغير نسبياً ، السلوك الميكانيكي في درجة الحرارة المنخفضة ممكن أن يكون مرن ، وهذا مطابق لقانون هوك وفي درجات الحرارة العالية السلوك اللزج أو السائل هو السائد ،أما وفي درجات الحرارة المتوسطة يكون البوليمير صلب مطاطي وتظهر الصفات

الموحدة لهذين الطرفين وهذا الشرط يسمى اللزج المرن. التشوه المرن يكون لحظي ، وهذا يعني إن التشوه الكامل يحدث عندما يطبق الإجهاد اللحظي أو إزالته . وأيضاً عند إزالة الإجهاد الخارجي يكون التشوه غالباً وقتي وتعود العينة إلى أبعادها الأصلية . وعلى العكس للسلوك اللزج الكامل ، التشوه والانفعال غير لحظي وهذا يكون نتيجة لإجهاد مطبق ، والتشوه يكون مؤخر أو معتمد على الوقت.

6.3. آليات التشوه المرن .

مثل الأنواع الأخرى من المواد يحدث التشوه المرن للبوليميرات عند مستويات منخفضة نسبياً في منحنى الإجهاد والانفعال. بداية التشوه للبوليميرات المرنة ينتج من سلسلة جزيئات في المنطقة الغير متبلورة وتُمتط في اتجاه جهد الشد المطبق . هذه العملية ممثلة في الرسم لسلسلتين مطويتين متجاورتين من الشرائح والمنطقة غير متبلورة كخطوة. ويتم التشويه المتكامل في المرحلة الثانية في كل من المنطقة الغير متبلورة والرقائق المتبلورة .

السلاسل الغير متبلورة تستمر في الإصطفاف وتصبح ممدودة ، وأيضاً يوجد إلتواء وتمديد لسلسلة القيود التساهمية القوية في البلورات الرقائقية وهذا يقود إلى زيادة طفيفة منعكسة في سمك البلورات الرقائقية ومعبر عنها. ونظراً لأن البوليميرات الشبه متبلورة مكونة من كلاً من مناطق بلورية ومناطق غير بلورية يمكن إعتبارها إنها من المواد المتراكبة . وعلى هذا النحو يمكن أخذ معامل المرونة من جمع معاملات المرونة للمرحلة البلورية ومرحلة الغير بلورية.