

บทที่ 3

สมบัติทางกลของเซรามิก (Mechanical Properties of Ceramics)

1. บทนำ (introduction)

วัสดุเซรามิกมีสมบัติทางกลหลายอย่างที่ด้อยกว่าโลหะ รวมทั้งความบกพร่องต่างๆ ในโครงสร้างวัสดุเซรามิกยังเป็นเหตุทำให้เกิดการแตกหักแบบหายนะ (catastrophic) ซึ่งเป็นการแตกเปราะที่มีการดูดซับพลังงานน้อยมาก วัสดุเซรามิกมีค่าความแข็งแรงดึงที่กว้างมาก ตั้งแต่ต่ำกว่า 100 psi (0.69 MPa) สำหรับวัสดุเซรามิกทั่วไป จนถึงประมาณ 10^6 psi (7×10^3 MPa) สำหรับเซรามิกประเภทวิสเกอร์ (whiskers) เช่น Al_2O_3 ที่ผ่านการเตรียมภายใต้สภาวะที่ควบคุมเป็นอย่างดี ส่วนวัสดุประเภทแก้วความแข็งแรงดึงจะอยู่ที่ประมาณ 25000 psi (172 MPa) นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดึงของเซรามิกยังมีค่าแตกต่างกันมากกับความแข็งแรงอัด โดยความแข็งแรงอัดจะมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึงประมาณ 5 ถึง 10 เท่า ดังนั้นวัสดุเซรามิกจึงมีความแข็งแรงสูงแต่ในขณะเดียวกันมีความแข็งแรงการกระแทกต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่เป็นแบบอไอออนิกโคเวเลนต์

2. การแตกเปราะของเซรามิก (brittle fracture of ceramics)

วัสดุเซรามิกที่อุณหภูมิห้องทั้งที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึก ส่วนใหญ่เมื่อรับแรงดึงจะเกิดการแตกหักก่อนเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกด้วยกระบวนการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งประกอบด้วย การเกิดและการเติบโตของรอยแตกผ่านตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุในทิศทางฉากกับแรงที่กระทำ การเติบโตของรอยแตกในเซรามิกแบบผลึกปกติจะเป็นแบบผ่านเกรน (transgranular) และยาวตลอดแนวระนาบผลึกที่มีความหนาแน่นอะตอมสูงสุด

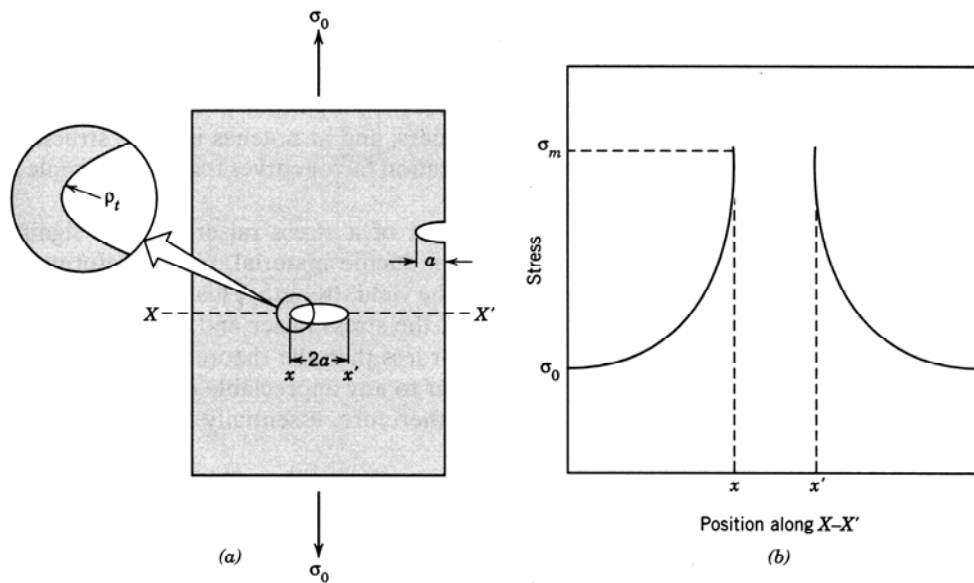
ความแข็งแรงการแตกหักของวัสดุเซรามิกที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการประเมินจากแรงพันธะระหว่างอะตอม ทั้งนี้อาจเนื่องจากการมีอยู่ของจุดบกพร่องที่มีขนาดเล็กมาก และกระจายอยู่ทั่วทั้งวัสดุ ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นจุดขยายแรงเค้นดึงที่กระทำให้สูงขึ้น โดยระดับแรงเค้นดึงที่สูงขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวและรัศมีปลายแหลมของจุดบกพร่องเหล่านั้น

3. กลไกการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture mechanisms)

การแตกหักแบบเปราะสามารถประเมินได้จากความสัมพันธ์ของสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ระดับของแรงเค้น จุดบกพร่องที่เป็นจุดเริ่มรอยแตกและกลไกการเติบโตของรอยแตก โดยในที่นี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับกลไกการแตกหักแบบเปราะของวัสดุ

- ความเข้มข้นแรงเค้น (stress concentration)

ความต้านทานการแตกหักของวัสดุของแข็งเป็นผลของแรงยึดเกาะระหว่างอะตอม โดยความแข็งแรงการยึดเกาะของของแข็งช่วงยึดหยุ่นซึ่งเปราะจะมีค่าประมาณ $E/10$ เมื่อ E คือโมดูลัสของความยืดหยุ่น ค่าความแข็งแรงการแตกหักที่ได้จากการทดสอบวัสดุทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในทางทฤษฎีประมาณ 10 ถึง 1000 เท่า ในปี 1990 A.A. Griffith ได้เสนอความเห็นเกี่ยวกับความขัดแย้งระหว่างค่าความแข็งแรงการยึดเกาะในทางทฤษฎีกับค่าความแข็งแรงการแตกหักที่ได้รับ โดยสามารถอธิบายได้ว่าการมีอยู่ของจุดบกพร่องหรือรอยแตกที่มีขนาดเล็กมากระดับจุลภาค ซึ่งมีอยู่ทั่วไปภายใต้สภาวะปกติทั้งที่บริเวณพื้นผิวและภายในเนื้อของวัสดุ จุดบกพร่องเหล่านี้ทำให้ความแข็งแรงการแตกหักลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงเค้นที่กระทำอาจถูกขยายหรือสะสมที่บริเวณปลายแหลมของรอยร้าว โดยขนาดของแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นบริเวณนี้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงทิศทางและลักษณะของรอยร้าว ปรากฏการณ์นี้ได้แสดงในรูปที่ 3.1 การดำเนินของแรงเค้นผ่านหน้าตัดที่มีรอยร้าวแรงเค้นจะมีค่าสูงสุดบริเวณปลายแหลมของรอยร้าวและลดลงเป็นลำดับเมื่อห่างออกไป จนเข้าสู่แรงเค้นปกติ σ_0 หรือเข้าสู่หน้าตัดที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ และเนื่องจากบริเวณนี้สามารถขยายแรงเค้นที่กระทำดังนั้นบางครั้งจึงเรียกจุดบกพร่องเหล่านี้ว่า จุดเพิ่มแรงเค้น (stress raisers)



รูปที่ 3.1 a) ลักษณะรอยร้าวที่พื้นผิวและด้านในชิ้นทดสอบ

b) รูปแบบการขยายหรือการเพิ่มขึ้นของแรงเค้นบริเวณปลายแหลมรอยร้าว

สมมติรอยร้าวเป็นรูปไข่หรือวงกลมและมีการจัดทิศทางตั้งฉากกับแรงเค้นที่กระทำ แรงเค้นสูงสุดที่ปลายแหลมรอยร้าว σ_m มีค่าดังสมการ

$$\sigma_m = \sigma_0 [1+2(a/p_t)^{1/2}] \quad (3.1a)$$

เมื่อ σ_0 คือแรงเค้นดึงปกติ p_t คือรัศมีของปลายรอยร้าว (รูปที่ 3.1a) และ a คือความยาวรอยร้าวที่พื้นผิวหรือครึ่งหนึ่งของรอยร้าวภายในวัสดุ กรณีที่รอยร้าวเล็กและยาวทำให้รัศมีปลายรอยร้าวเล็กและตัวแปร $(a/p_t)^{1/2}$ มีค่าสูงมาก สมการจะเปลี่ยนรูปเป็นดังนี้

$$\sigma_m = 2\sigma_0 (a/p_t)^{1/2} \quad (3.1b)$$

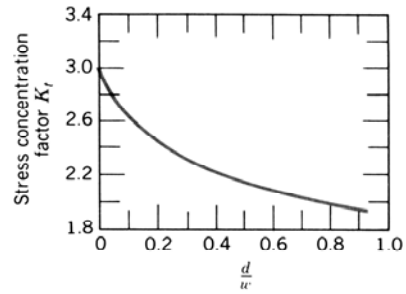
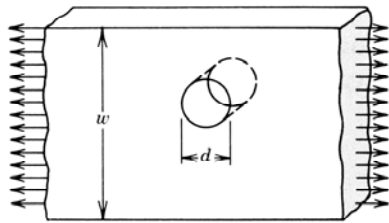
ยิ่งกว่านั้น σ_m มีค่าเป็นหลายเท่าตัวของ σ_0

บางครั้งอัตราส่วนระหว่าง σ_m / σ_0 จะแสดงเป็นตัวแปรของความเข้มข้นแรงเค้น K_t

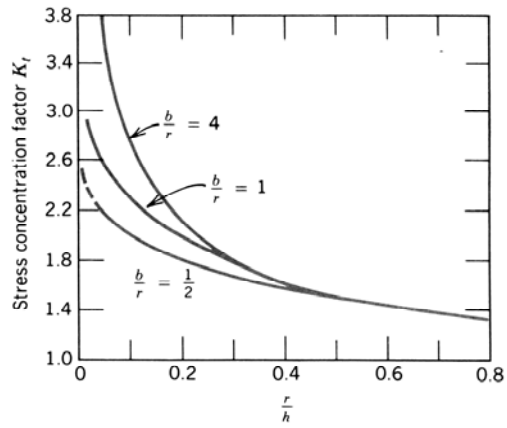
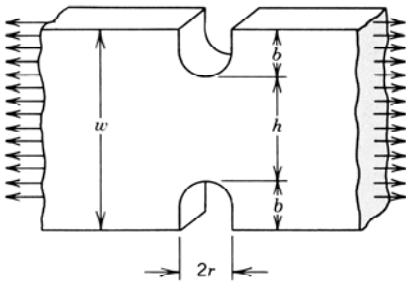
$$K_t = \sigma_m / \sigma_0 = 2 (a/p_t)^{1/2} \quad (3.2)$$

โดยเป็นการวัดระดับของแรงเค้นภายนอกที่ถูกขยายบริเวณปลายแหลมของรอยร้าว

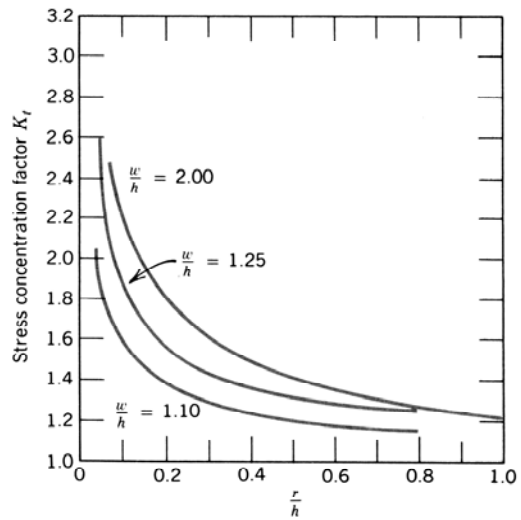
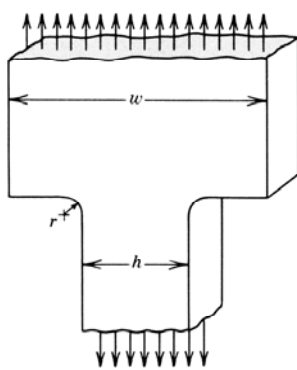
การเพิ่มขึ้นของแรงเค้นนี้อาจไม่จำกัดอยู่เฉพาะบริเวณที่เป็นจุดบกพร่องหรือรอยร้าวเล็กๆเท่านั้น แต่อาจเกิดกับรอยขนาดใหญ่ที่ไม่ต่อเนื่องภายในวัสดุ เช่น ฟองอากาศ บริเวณมุม



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.2 ตัวแปรความเข้มข้นแรงเค้นของชิ้นทดสอบสามรูปทรง

ยิ่งกว่านั้นผลกระทบของจุดเพิ่มแรงเค้นต่อวัสดุเปราะจะมากกว่าวัสดุเหนียว กล่าวคือ วัสดุเหนียวเมื่อแรงเค้นสูงสุดเกินความแข็งแรงจำนวนจะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายของแรงเค้นในบริเวณจุดเพิ่มแรงเค้นได้มากกว่า และการเพิ่มขึ้นของค่าตัวแปรความเข้มข้นแรงเค้นจะต่ำกว่าค่าในทางทฤษฎี ในขณะที่วัสดุเปราะจะไม่เกิดการกระจายแรงเค้นและการจํานนรอบรอยร้าวทำให้ได้ค่าความเข้มข้นแรงเค้นตามทฤษฎี

Griffith ให้ความเห็นว่าวัสดุเปราะจะมีรอยแตกและจุดบกพร่องเล็กๆ ซึ่งมีขนาดรูปร่างและการจัดเรียงทิศทางในแบบต่างๆ การแตกหักจะเกิดขึ้นเมื่อแรงเค้นดึงที่กระทำบริเวณปลายแหลมของจุดบกพร่องเกินความแข็งแรงการยึดเกาะทางทฤษฎีของวัสดุ เป็นเหตุทำให้เกิดการแตกหักลุกลามอย่างรวดเร็ว ถ้าไม่มีจุดบกพร่องความแข็งแรงแตกหักควรจะเท่ากับความแข็งแรงการยึดเกาะของวัสดุ ดังนั้นวิศวกรทางเซรามิกที่มีขนาดเล็กมากและปราศจากจุดบกพร่องจะมีความแข็งแรงการแตกหักใกล้เคียงค่าความแข็งแรงการยึดเกาะทางทฤษฎี

- ทฤษฎีการแตกเปราะของ Griffith (Griffith theory of brittle fracture)

ระหว่างการเติบโตของรอยแตกเทอมของพลังงานความเครียดช่วงยืดหยุ่นจะถูกขจัดออก โดยพลังงานบางส่วนที่กักเก็บในวัสดุจะใช้ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ยิ่งกว่านั้นในระหว่างกระบวนการดึงจนแตกหักจะเกิดพื้นผิวใหม่ด้านหน้ารอยแตกซึ่งจะเพิ่มพลังงานพื้นผิวของระบบ ขณะเดียวกัน Griffith ได้สร้างกฎเกณฑ์การลุกลามของรอยแตกรูปไข่ (รูปที่ 3.1a) ด้วยการสร้างสมดุลของสองพลังงานนี้ โดยแรงเค้นวิกฤต σ_c ที่จำเป็นในการลุกลามของรอยแตกในวัสดุเปราะอธิบายได้ดังสมการ

$$\sigma_c = (2E\gamma_s / \pi a)^{1/2} \quad (3.3)$$

เมื่อ E คือโมดูลัสของความยืดหยุ่น

γ_s คือพลังงานพื้นผิวจำเพาะ

a คือครึ่งหนึ่งของความยาวรอยแตกภายใน

จากสมการพบว่าไม่มีส่วนใดเกี่ยวข้องกับรัศมีของปลายรอยร้าว p_i ไม่เหมือนกับสมการความเข้มข้นแรงเค้น แต่อย่างไรก็ตามสันนิษฐานว่ารัศมีปลายรอยร้าวต้องแหลมเพียงพอที่จะทำให้แรงเค้นบริเวณปลายรอยร้าวเพิ่มขึ้นเกินความแข็งแรงการยึดเกาะของวัสดุ

ก่อนหน้านี้ส่วนกล่าวถึงเฉพาะวัสดุประะซึ่งไม่มีการเสียรูปแบบพลาสติก ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงโลหะส่วนใหญ่และพอลิเมอร์หลายชนิดที่มีการเสียรูปแบบพลาสติกระหว่างการแตกหัก การขยายตัวของรอยแตกจึงไม่ได้เกี่ยวข้องกับกระบวนการแตกหักเท่านั้น แต่ยังเป็น การเพิ่มพลังงานของพื้นผิว ความซับซ้อนนี้อาจแก้ได้ด้วยการแทน γ_s ด้วย $\gamma_s + \gamma_p$ เมื่อ γ_p แสดงถึงพลังงานการเสียรูปแบบพลาสติกที่สัมพันธ์กับการขยายตัวของรอยแตก ดังสมการ

$$\sigma_c = [2E(\gamma_s + \gamma_p) / \pi a]^{1/2} \quad (3.4a)$$

สำหรับวัสดุเหนียวสูงซึ่งเป็นกรณีที่ $\gamma_p \gg \gamma_s$ จะได้สมการเป็น

$$\sigma_c = (2E\gamma_p / \pi a)^{1/2} \quad (3.4b)$$

ในปี 1950 G.R. Irwin ได้รวมเทอมของ γ_s กับ γ_p เข้าด้วยกัน

$$y_c = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (3.5)$$

เมื่อ y_c คืออัตราการเสียพลังงานความเครียดวิกฤต เมื่อแทนสมการ 3.5 ลงในสมการ 3.4a แล้วจัดรูปใหม่จะได้สมการการแตกหักของ Griffith อีกรูปหนึ่งคือ

$$y_c = \pi \sigma^2 a / E \quad (3.6)$$

กล่าวคือการขยายตัวของรอยแตกจะเกิดถ้า $\pi \sigma^2 a / E$ มีค่าเกินค่า y_c ของวัสดุ

ตัวอย่าง 3.1

เมื่อแผ่นแก้วขนาดใหญ่ซึ่งพลังงานพื้นผิวจำเพาะ 0.3 J/m^2 และโมดูลัสความยืดหยุ่น 69 GPa รับแรงดึงขนาด 40 MPa จงหาความยาวสูงสุดของจุดบกพร่องที่พื้นผิวที่แผ่นแก้วจะสามารถทนต่อการแตกหักได้

การแก้โจทย์นี้ต้องใช้สมการ 3.3 แล้วจัดรูปใหม่พร้อมแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้เป็น

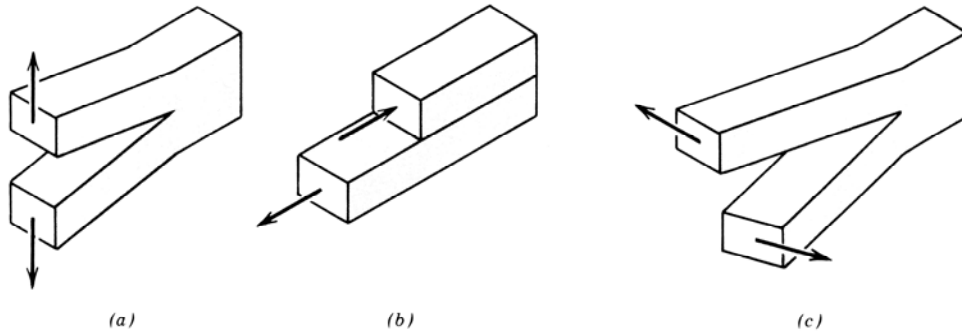
$$a = 2E\gamma_s / \pi \sigma^2$$

$$= \frac{(2)(69 \times 10^9 \text{ N/m}^2)(0.3 \text{ N/m})}{\pi (40 \times 10^6 \text{ N/m}^2)^2}$$

$$= 8.2 \times 10^{-6} \text{ m} \text{ หรือ } 8.2 \text{ } \mu\text{m}$$

- การวิเคราะห์แรงเค้นของรอยแตก (stress analysis of cracks)

กลไกการแตกหักเป็นเรื่องของการทดสอบการกระจายตัวของแรงเค้นบริเวณรอบๆ ปลายรอยร้าวขณะแตกหัก ซึ่งแรงที่จะสามารถดำเนินไปในการแตกหักมีอยู่สามรูปแบบ โดยแต่ละแบบจะส่งผลกระทบต่อพื้นผิวรอยร้าวแตกต่างกัน รูปแบบแรกเป็นการดึงดึงรูปที่ 3.3a และรูปแบบที่สองและสามคือการเลื่อนและการบิดตามลำดับ ส่วนใหญ่การแตกหักจะเป็นแบบแรกซึ่งจะได้กล่าวถึงกลไกการแตกหักต่อไป



รูปที่ 3.3 รูปแบบรอยแตกที่พื้นผิวสามแบบคือ a) แบบ I ดึง b) แบบ II เลื่อน และ c) แบบ III บิด

การแตกหักแบบแรกมีการกระทำของแรงเค้นกับวัสดุคงแสดงในรูปที่ 3.4 การใช้หลักการทางทฤษฎีช่วงยืดหยุ่นและรูปแบบของแรงเค้นดึง (σ_x และ σ_y) กับแรงเค้นเฉือน (τ_{xy}) ซึ่งล้วนเป็นฟังก์ชันกับค่าระยะรัศมี r และมุม θ ดังนี้คือ

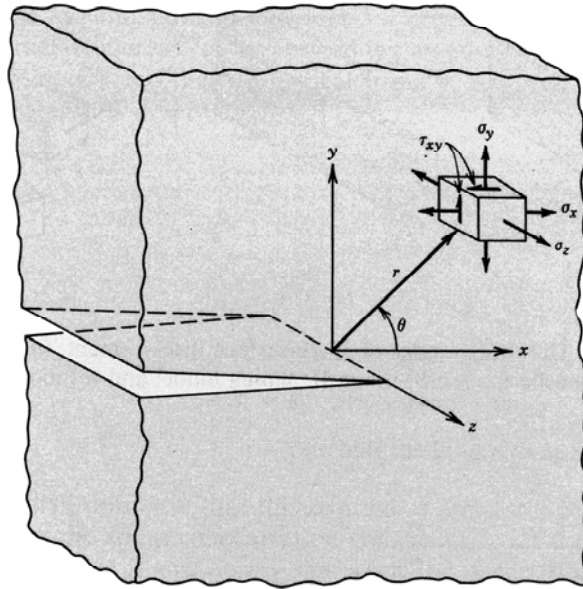
$$\sigma_x = [K/(2\pi r)^{1/2}] f_x(\theta) \quad \text{เมื่อ } f_x(\theta) = \cos\theta/2 [1 - (\sin\theta/2)(\sin 3\theta/2)] \quad (3.7a)$$

$$\sigma_y = [K/(2\pi r)^{1/2}] f_y(\theta) \quad \text{เมื่อ } f_y(\theta) = \cos\theta/2 [1 + (\sin\theta/2)(\sin 3\theta/2)] \quad (3.7b)$$

$$\tau_{xy} = [K/(2\pi r)^{1/2}] f_{xy}(\theta) \quad \text{เมื่อ } f_{xy}(\theta) = (\sin\theta/2)(\cos\theta/2)(\cos 3\theta/2) \quad (3.7c)$$

ถ้าขึ้นทดสอบค่อนข้างบางเมื่อเทียบกับรอยร้าวค่า $\sigma_z = 0$ เรียกว่าสภาวะการมีแรงเค้นในแนวระนาบ ส่วนในสภาวะที่ขึ้นทดสอบค่อนข้างหนา ค่า $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ และอยู่ในสภาวะที่มีความเครียดในแนวระนาบเนื่องจาก $\epsilon_z = 0$ เมื่อ ν คืออัตราพัวซอง (Poisson's ratio)

สมการ 3.7 พารามิเตอร์ K เป็นตัวแปรความเข้มแรงเค้น (stress intensity factor) ซึ่งใช้ในการหาการกระจายแรงเค้นรอบจุดบกพร่อง แม้ว่าตัวแปรความเข้มแรงเค้นและตัวแปรความเข้มข้นแรงเค้น K_I จะเป็นแบบเดียวกันแต่ทั้งสองค่านี้จะไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะแรงเค้นที่กระทำด้านหน้ารอยร้าวเมื่อขึ้นทดสอบรับแรงดึงแบบ I

ตัวแปรความเข้มแรงเค้นจะสัมพันธ์กับแรงเค้นที่กระทำและความยาวรอยร้าวดังสมการ

$$K = Y\sigma(\pi a)^{1/2} \quad (3.8)$$

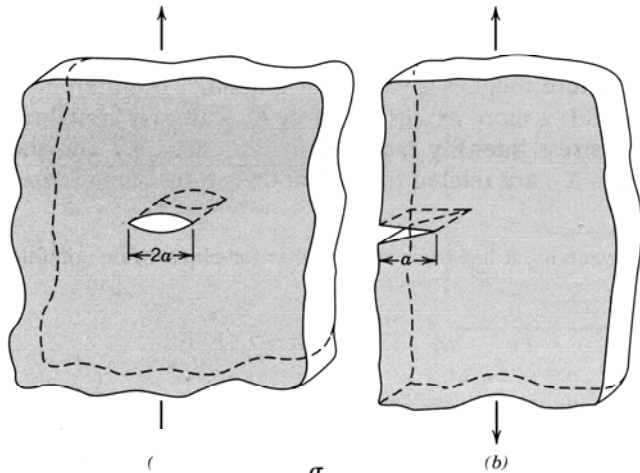
เมื่อ Y คือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับขนาดหรือฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับทั้งรอยร้าว ขนาดขึ้นทดสอบและรูปทรงของรอยร้าว รวมทั้งรูปแบบของแรงเค้นที่กระทำ โดยค่า Y จะมีหน่วยเป็น $\text{MPa(m)}^{1/2}$ หรือ $\text{psi(in)}^{1/2}$ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

- ความแกร่งการแตกหัก (fracture toughness)

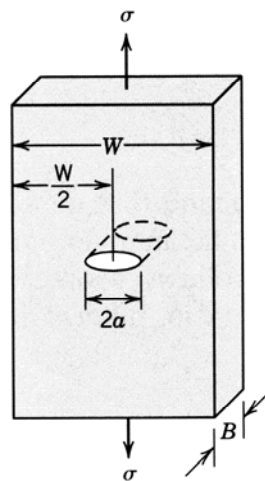
การแตกหักก่อนหน้านี้นี้เป็นการลุกลามของรอยแตกในวัสดุเปราะที่มีจุดบกพร่อง และการแตกหักเกิดขึ้นเมื่อแรงเค้นที่กระทำเกินค่าแรงเค้นวิกฤต (σ_c) ในสมการที่ 3.3 ในแบบเดียวกันแรงเค้นบริเวณรอบปลายแหลมรอยแตกสามารถนิยามในเทอมของตัวแปรความเข้มแรงเค้น ค่า K วิกฤตที่มีอยู่อาจใช้ระบุสภาวะการแตกเปราะของวัสดุ โดยอยู่ในรูปของความแกร่งการแตกหัก K_c และจากสมการ 3.8 จะได้เป็น

$$K_c = Y(a/W)\sigma_c(\pi a)^{1/2} \quad (3.9)$$

เมื่อ σ_c คือแรงเค้นวิกฤตของการรุดกลามของรอยแตก และ Y เป็นฟังก์ชันของความยาวรอยร้าว (a) กับความกว้าง (W) ได้เป็น $Y(a/W)$ โดยฟังก์ชัน $Y(a/W)$ ที่มีอัตราส่วน a/W เข้าใกล้ศูนย์ คือกรณีที่ชิ้นงานกว้างมากแต่มีรอยร้าวสั้น ค่า $Y(a/W)$ จะเข้าใกล้หนึ่ง เช่นแผ่นทดสอบที่มีความกว้างไม่จำกัดและมีรอยร้าวยาวตลอดความหนา ดังรูปที่ 3.5a $Y(a/W) = 1$ ในขณะที่แผ่นทดสอบที่มีความกว้างจำกัดด้านเดียว คือด้านที่มีรอยร้าวที่ขอบยาวเท่ากับ a ดังรูปที่ 3.5b ค่า $Y(a/W) \cong 1.1$ ทั้งนี้สูตรในทางคณิตศาสตร์สำหรับฟังก์ชัน $Y(a/W)$ เทอมของ a/W บ่อยครั้งมีความซับซ้อนและต้องการขนาดกว้างที่มีค่าจำกัด เช่นแผ่นทดสอบที่มีรอยร้าวตรงกลางตลอดความหนาซึ่งมีค่าความกว้างเท่ากับ W ดังรูปที่ 3.6



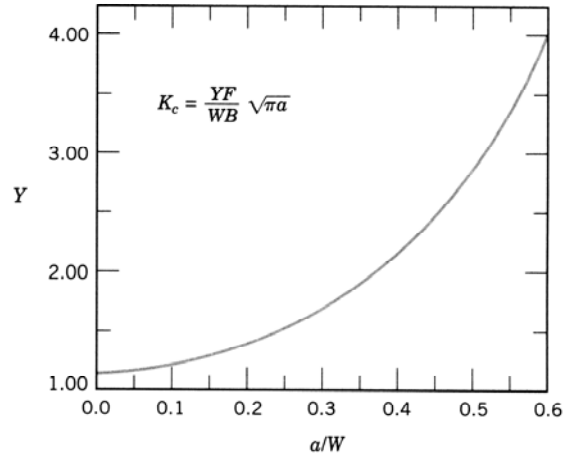
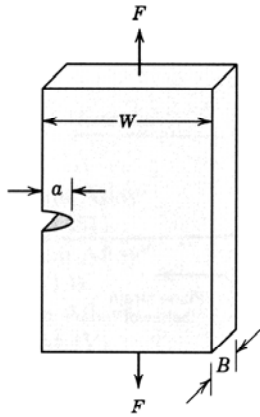
รูปที่ 3.5 a) รอยร้าวยาวตลอดความหนาภายในวัสดุที่มีความกว้างทุกด้านไม่จำกัด
b) รอยร้าวที่พื้นผิววัสดุซึ่งมีความกว้างจำกัดด้านเดียว



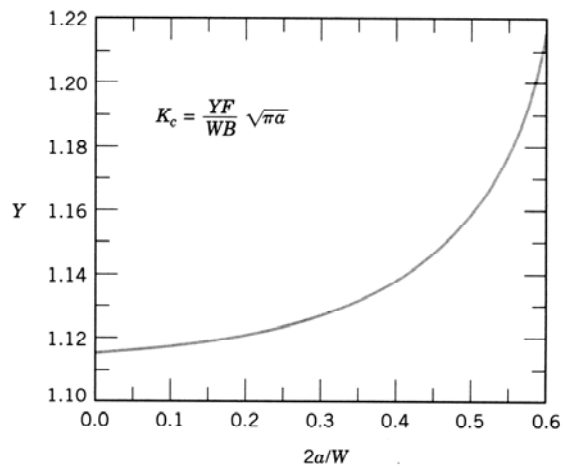
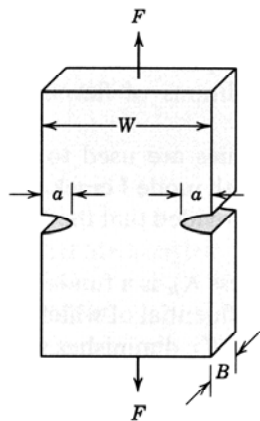
รูปที่ 3.6 ภาพชิ้นทดสอบแผ่นเรียบที่มีความกว้างจำกัดและมีรอยร้าวยาวตลอดความหนา

$$Y(a/W) = [(W/\pi a) \tan(\pi a/W)]^{1/2} \quad (3.10)$$

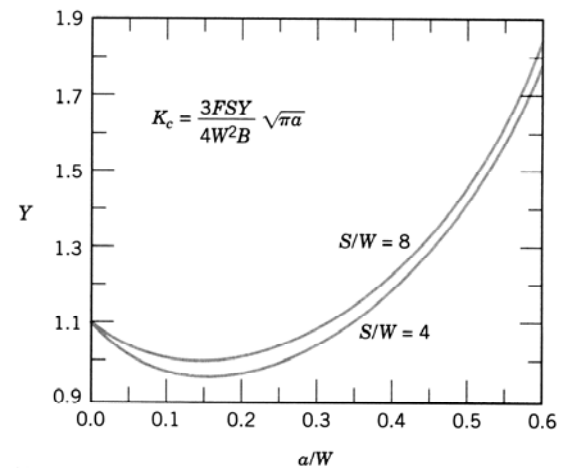
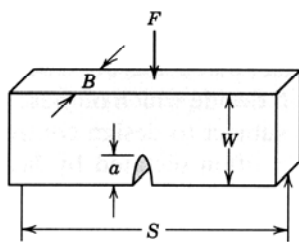
ในที่นี้ค่าแทนเจนต์ของ $\pi a/W$ ให้แสดงในรูปของเรเดียนไม่ใช่องศา และบ่อยครั้งที่รอยร้าวมีรูปแบบเฉพาะในแบบต่างๆ เมื่อนำค่า $Y(a/W)$ มาพล็อตกับค่า a/W จะได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.7a,b และ c รวมถึงสมการที่ปรากฏอยู่ในรูปซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่า K_c ต่างๆ



(a)



(b)



(c)

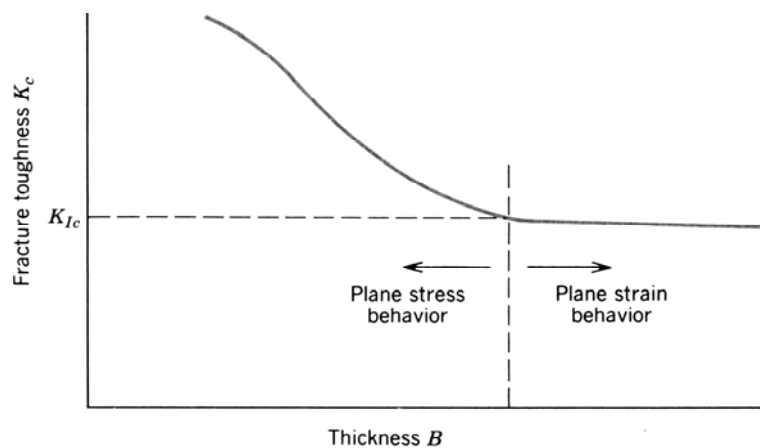
รูปที่ 3.7 กราฟสอบเทียบของ Y สำหรับชั้นทดสอบที่มีรอยร้าวแตกต่างกันสามแบบ

ความต้านทานของวัสดุในการเกิดการแตกหักแบบเปราะเมื่อมีรอยร้าวปรากฏอยู่จะวัดด้วยสมบัติความแข็งแกร่งการแตกหัก ซึ่งจะมีหน่วยเหมือนกับค่าตัวแปรความเข้มแรงเค้น คือ $\text{MPa(m)}^{1/2}$ หรือ $\text{psi(in.)}^{1/2}$

สำหรับชั้นงานที่ค่อนข้างบางค่า K_c จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นทดสอบ B ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งค่า K_c จะขึ้นอยู่กับค่า B ในสถานะที่มีความเครียดแนวระนาบ ดังสมการ

$$B \geq 2.5 (k_{Ic}/\sigma_y)^2 \quad (3.11)$$

เมื่อ σ_y คือความแข็งแรงจํานนออฟเซต 0.002 ความเครียดของวัสดุ



รูปที่ 3.8 แสดงอิทธิพลความหนาของชั้นทดสอบต่อความแข็งแกร่งการแตกหัก

ส่วนค่าคงที่ K_c สำหรับชั้นงานที่หนาจะอยู่ในรูปของค่าความแข็งแกร่งการแตกหักจากความเครียดแนวระนาบ (plane strain fracture toughness) K_{Ic} ซึ่งนิยามได้ดังสมการ

$$K_{Ic} = Y\sigma(\pi a)^{1/2} \quad (3.12)$$

ค่าความแข็งแกร่งการแตกหักนี้ปกติจะถูกอ้างอิงถึงบ่อยครั้งเนื่องจากมีค่าต่ำกว่าค่า K_c เสมอ สัญลักษณ์ I ในค่า K_{Ic} หมายถึงค่า K วิกฤตของการแตกหักแบบที่หนึ่งจากสามแบบในรูปที่

ตัวแปรความเข้มแรงเค้น K ในสมการ 3.7 และความถี่การแตกหักจากความเครียด
 แนวระนาบ K_{Ic} สัมพันธ์กันในแง่ของแรงเค้นและความแข็งแรงจำนวน วัสดุอาจรับแรงเค้นได้
 หลายค่าแต่อย่างไรก็ตามจะมีระดับแรงเค้นค่าหนึ่งที่วัสดุเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกนั่นคือ
 ความแข็งแรงจำนวน ทำนองเดียวกันกับค่า K ซึ่งสามารถมีได้หลายค่า ในขณะที่ค่า K_{Ic} จำกัด
 จำเพาะวัสดุบางอย่างและบ่งบอกเฉพาะเงื่อนไขของขนาดรอยร้าวและแรงเค้นที่จำเป็นต่อการ
 แตกหักแบบเปราะเท่านั้น

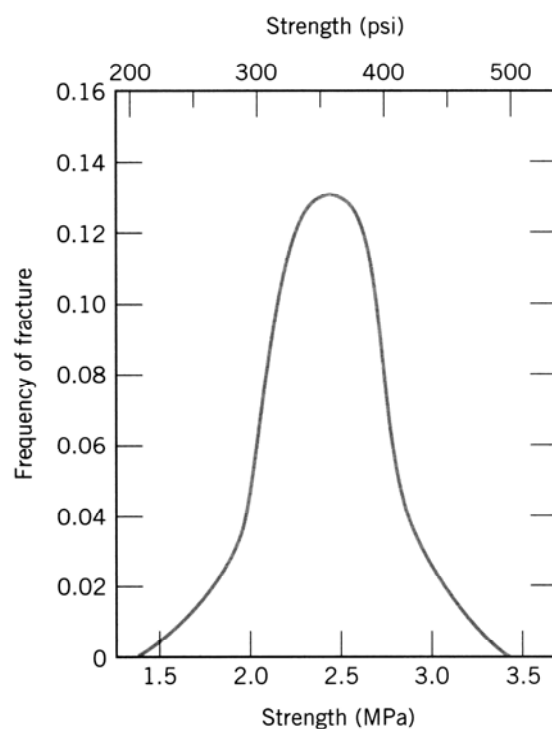
<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>K_{Ic}</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa√m</i>	<i>ksi√in.</i>
Metals				
Aluminum Alloy ^a (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum Alloy ^a (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium Alloy ^a (Ti-6Al-4V)	830	120	55	50
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
Ceramics				
Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
Soda-Lime Glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum Oxide	—	—	2.7–4.2	2.5–3.8
Polymers				
Polystyrene (PS)	—	—	0.7–1.1	0.64–1.0
Polymethyl Methacrylate (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

ตารางที่ 3.1 ความแข็งแรงจํานนและความแรงแรงการแตกหักจากความเครียดแนวระนาบที่
อุณหภูมิห้องของวัสดุชนิดต่างๆ

การหาค่า K_{Ic} มีหลายวิธีการทดสอบ (ASTM standard E399) สำหรับชั้นทดสอบที่มี
รูปทรงและขนาดแบบเดียวกับการแตกหักแบบ I ให้แทนค่าพาริเตอร์สเกล Y ในสมการ 3.12

ความแรงแรงการแตกหักจากความเครียดแนวระนาบ K_{Ic} เป็นสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่
ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว และที่มีอิทธิพลมากที่สุดได้แก่อุณหภูมิ อัตราความเครียดและ
โครงสร้างจุลภาค โดยขนาดของ K_{Ic} จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดและการ
ลดลงของอุณหภูมิ ยิ่งกว่านั้นการเพิ่มความแข็งแรงจํานนด้วยวิธีการต่างๆ เช่นการทำให้เป็น
สารละลายของแข็ง การเติมธาตุผสม หรือด้วยการขึ้นรูปเย็นจะทำให้ค่า K_{Ic} ลดลง และในทาง
กลับกันค่า K_{Ic} จะเพิ่มขึ้นถ้าขนาดเกรนและจํานวนองค์ประกอบลดลง

โดยทั่วไปความแข็งแรงการแตกหักของวัสดุเซรามิกเปราะมีอยู่หลายลักษณะ สังกัด
การกระจายตัวความแข็งแรงการแตกหักของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นรูปแบบ
หนึ่งของความแข็งแรงการแตกหักที่ขึ้นอยู่กับการมีอยู่ของจุดบกพร่องต่างๆ ที่สามารถเป็น
จุดเริ่มต้นของรอยแตก และจะเปลี่ยนไปในแต่ละชั้นทดสอบแม้ว่าจะเป็นวัสดุเดียวกันก็ตาม
นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับเทคนิคการทดสอบกับกระบวนการปรับสภาพ (treatment) ต่างๆ
รวมทั้งขนาดหรือปริมาตรของชั้นทดสอบ กล่าวคือชั้นทดสอบที่มีขนาดใหญ่กว่ามีความเป็นไปได้
ที่จะมีจุดบกพร่องต่างๆ ได้มากกว่า ซึ่งส่งผลทำให้ชั้นทดสอบมีความแข็งแรงการแตกหักต่ำกว่า



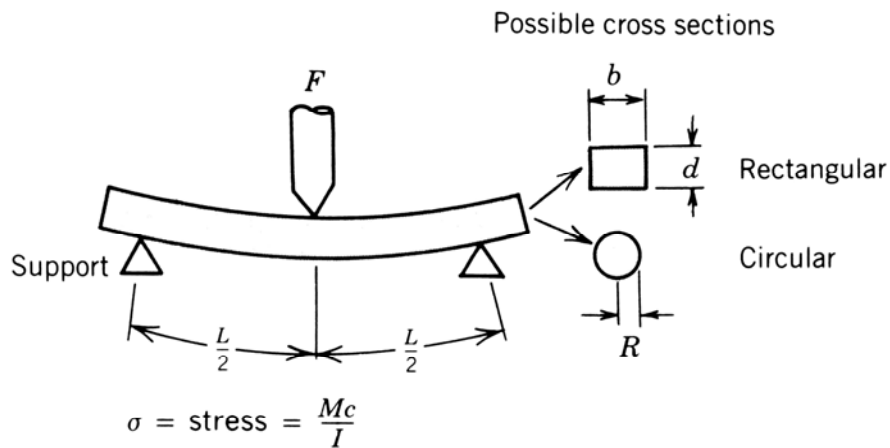
รูปที่ 3.9 การกระจายความถี่ของความแข็งแรงการแตกหักสำหรับซีเมนต์พอร์ตแลนด์

สำหรับแรงเค้นอัดจะไม่มี的增加ขนาดของแรงเค้นบริเวณที่เป็นจุดบกพร่องจึงทำให้เซรามิกเปราะมีความแข็งแรงอัดสูงกว่าความแข็งแรงดึงเป็นอย่างมาก ดังนั้นการนำวัสดุเซรามิกเปราะไปใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นการรับแรงกดหรือแรงอัด นอกจากนี้ความแข็งแรงการแตกหักของเซรามิกเปราะจะเพิ่มขึ้นถ้ามีแรงเค้นอัดตกค้างอยู่ที่พื้นผิวชิ้นงาน ทางหนึ่งที่สามารถทำได้คือการอบคลายตัวทางความร้อน (thermal tempering) กับวัสดุ

4. พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของเซรามิก (stress-strain behaviors)

- ความแข็งแรงการดัดงอ (flexural strength)

พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของเซรามิกเปราะปกติจะไม่ทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง เนื่องจากประการแรกเป็นเรื่องยากที่จะเตรียมชิ้นทดสอบให้มีรูปทรงตามที่ต้องการ ประการที่สองเป็นการยากที่จะทำการจับยึดวัสดุที่แข็งเปราะ โดยที่ไม่ให้เกิดการแตกร้าวใดๆ และประการที่สามคือเซรามิกโดยทั่วไปจะเกิดการแตกหักเมื่อมีการเสียรูปแม้เพียงร้อยละ 0.1 ของความเครียด ดังนั้นถ้าจะทำการทดสอบแรงดึงจำเป็นต้องปรับชิ้นทดสอบให้เป็นแท่งตรงเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแรงเค้นดัดงอซึ่งคำนวณได้ยาก ในทางปฏิบัติเพื่อให้สะดวกมากขึ้นการทดสอบแรงดึงกับวัสดุเปราะจะใช้การทดสอบการดัดงอในแนวขวางแทน โดยจะใช้ชิ้นทดสอบที่มีลักษณะเป็นแท่งซึ่งมีทั้งที่เป็นแบบแท่งกลมทรงกระบอกและแบบแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยจะทำการดัดงอจนชิ้นงานแตกหักด้วยเทคนิคการทดสอบแบบดัดงอสามหรือสี่จุด (three or four-point bending technique, ASTM Standard C1161) การทดสอบดัดงอสามจุดได้แสดงในรูปที่ 3.10 โดยมีจุดที่ใส่น้ำหนักด้านบนซึ่งทำให้พื้นผิวชิ้นทดสอบด้านบนอยู่ในรูปของการรับแรงกด ในขณะที่บริเวณพื้นผิวด้านล่างจะอยู่ในรูปของการรับแรงดึง แรงเค้นจะคำนวณจากความหนาของชิ้นทดสอบ โมเมนต์การดัดงอ (bending moment) และโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด โดย พารามิเตอร์เหล่านี้ได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3.10 สำหรับชิ้น



$$\sigma = \text{stress} = \frac{Mc}{I}$$

where M = maximum bending moment
 c = distance from center of specimen to outer fibers
 I = moment of inertia of cross section
 F = applied load

	$\frac{M}{4}$	$\frac{c}{2}$	$\frac{I}{12}$	$\frac{\sigma}{2bd^2}$
Rectangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

รูปที่ 3.10 การทดสอบความแข็งแรงการดัดงอแบบรับแรงสามจุด (three point bending) กับชิ้นทดสอบที่มีหน้าตัดแบบต่างๆ รวมทั้งสูตรคำนวณการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

แรงเค้น ณ จุดแตกหักที่ได้จากการทดสอบการดัดงอจะใช้เป็นความแข็งแรงการดัดงอสำหรับโมดูลัสการแตกหัก ความแข็งแรงการแตกหักหรือความแข็งแรงการดัดงอล้วนเป็นพารามิเตอร์ทางกลที่สำคัญของเซรามิกเปราะ สำหรับชิ้นทดสอบที่มีภาคตัดเป็นสี่เหลี่ยม ความแข็งแรงการดัดงอหาได้ดังสมการ

$$\frac{3FL}{2bd^2}$$

$$\sigma_{sf} = \frac{F_f L}{\pi R^3} \quad (3.13a)$$

เมื่อ F_f คือแรงกระทำ ณ จุดแตกหัก L คือระยะห่างระหว่างสองจุดด้านล่างชิ้นทดสอบ และพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และถ้าหน้าตัดชิ้นทดสอบเป็นแบบวงกลมค่าความแข็งแรงการค้ำองหาได้ดังสมการ

$$\sigma_{sf} = \frac{F_f L}{\pi R^3} \quad (3.13b)$$

เมื่อ R คือรัศมีของหน้าตัดชิ้นทดสอบ

ค่าความแข็งแรงการค้ำองของวัสดุเซรามิกบางชนิดได้แสดงในตารางที่ 3.2 ในระหว่างการค้ำองชิ้นทดสอบจะรับทั้งแรงเค้นกดและดึง โดยความแข็งแรงการค้ำองจะมีค่ามากกว่าความแข็งแรงการแตกหักจากการดึง ยิ่งกว่านั้น σ_{sf} ยังขึ้นอยู่กับขนาดชิ้นทดสอบดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้นี้เกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่จะมีปริมาณของจุดบกพร่องได้มากกว่าสำหรับชิ้นทดสอบที่มีปริมาตรมากกว่า

Material	Flexural Strength		Modulus of Elasticity	
	MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	700–1000	100–145	304	44
Zirconia ^a (ZrO ₂)	634	92	200	29
Silicon carbide (SiC)	552–862	80–125	430	62
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	275–550	40–80	393	57
Glass-ceramic (Pyroceram)	241	35	120	17
Mullite (3Al ₂ O ₃ -2SiO ₂)	185	27	145	21
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	110–245	16–35.5	260	38
Fused silica (SiO ₂)	110	16	73	11
Magnesium oxide (MgO)	105 ^b	15 ^b	225	33
Soda-lime glass	69	10	69	10

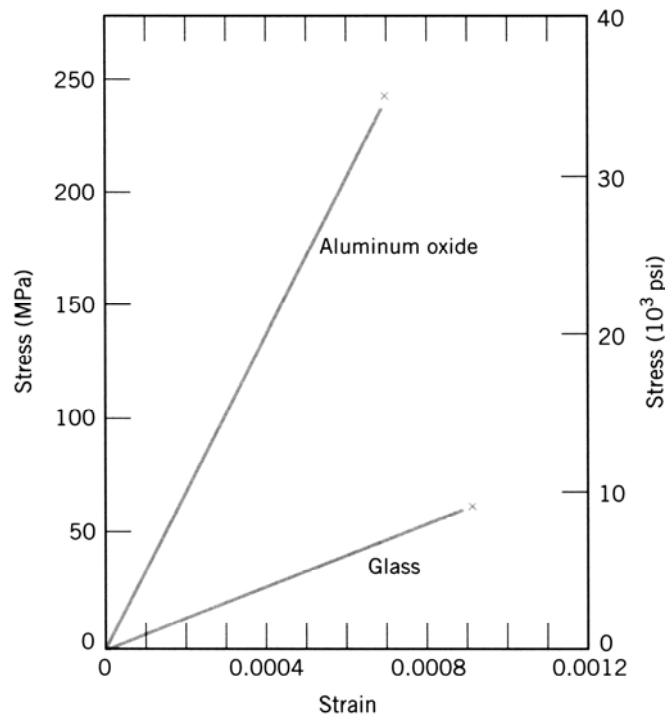
^a Partially stabilized with 3 wt% MgO.

^b Sintered and containing approximately 5% porosity.

ตารางที่ 3.2 ค่าความแข็งแรงการค้ำองและโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเซรามิกบางชนิด

- พฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic behavior)

พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดแบบยืดหยุ่นของวัสดุเซรามิกที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการค้ำองนี้จะเหมือนกับผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟแรงเค้นความเครียดของอะลูมิเนียมออกไซด์กับแก้วจากการทดสอบการดัดงอ

5. กลไกการเสียรูปแบบพลาสติกของเซรามิก (mechanisms of plastic deformation)

แม้ที่อุณหภูมิห้องวัสดุเซรามิกจะมีการแตกหักก่อนที่จะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเซรามิกที่เป็นแบบผลึกกับแบบอสัณฐานมีกลไกการเสียรูปแบบพลาสติกที่แตกต่างกัน ซึ่งได้มีการศึกษากลไกการเสียรูปแบบพลาสติกนี้พอสมควร

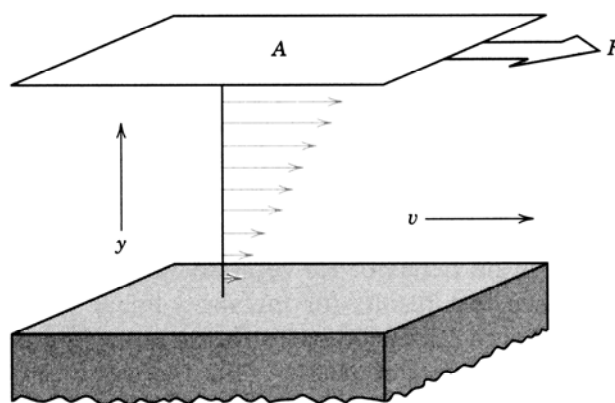
- เซรามิกแบบผลึก

สำหรับวัสดุเซรามิกแบบผลึกการเสียรูปแบบพลาสติกเกิดขึ้นในแบบเดียวกันกับโลหะ โดยการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน เหตุผลหนึ่งที่ทำให้วัสดุเหล่านี้มีความแข็งและเปราะ คือความยากในการเกิดการเคลื่อน (slip) ของอะตอมใน โครงผลึก และสำหรับวัสดุเซรามิกกลุ่ม

ส่วนเซรามิกที่มีพันธะแบบโควาเลนต์สูงการเคลื่อนเกิดขึ้นได้ยากและมีความเปราะเนื่องจากพันธะโควาเลนต์เป็นพันธะที่ค่อนข้างแข็งแรง และมีจำนวนระบบการเคลื่อนที่จำกัดรวมทั้งโครงสร้างของดิสโลเคชันมีความซับซ้อน

- เซรามิกแบบอสัณฐาน

สำหรับวัสดุเซรามิกอสัณฐานการเสีรูปร่างแบบพลาสติกไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนตัวของดิสโลเคชัน เนื่องจากมีโครงสร้างอะตอมที่ไม่เป็นระเบียบ แต่จะเกิดการเสีรูปร่างเป็นแบบไหลหนืด (viscous flow) เช่นเดียวกันที่เกิดขึ้นในของเหลว อัตราการเสีรูปร่างจะเป็นสัดส่วนกับแรงที่กระทำ ในการตอบสนองต่อแรงเค้นเฉือนที่กระทำอะตอมหรือไอออนจะเลื่อนผ่านอะตอมอื่นๆ โดยการแตกและสร้างพันธะขึ้นใหม่ระหว่างอะตอม แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบและทิศทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นไม่ได้มีการอธิบายอย่างชัดเจนเหมือนกับรูปแบบของดิสโลเคชันการไหลหนืดในระดับมหภาคได้แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงการไหลหนืดของของเหลวหรือแก้วเหลวที่ตอบสนองต่อแรงเฉือนที่กระทำ

สมบัติการไหลหนืดหรือความหนืด (viscosity) เป็นการวัดความต้านทานการเสียรูปของวัสดุ อัสัฐาน โดยการไหลหนืดในของเหลวจะเริ่มจากแรงเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นที่สองระนาบที่ขนานกัน โดยที่ความหนืด η เป็นอัตราส่วนของแรงเค้นเฉือน τ ที่กระทำต่อความเร็วที่เปลี่ยนไป dv ในระยะห่าง dy ในทิศทางตั้งฉากกับแนวระนาบ ดังสมการ

$$\eta = \frac{\tau}{dv/dy} = \frac{F/A}{dv/dy} \quad (3.14)$$

พารามิเตอร์ต่างๆได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3.12

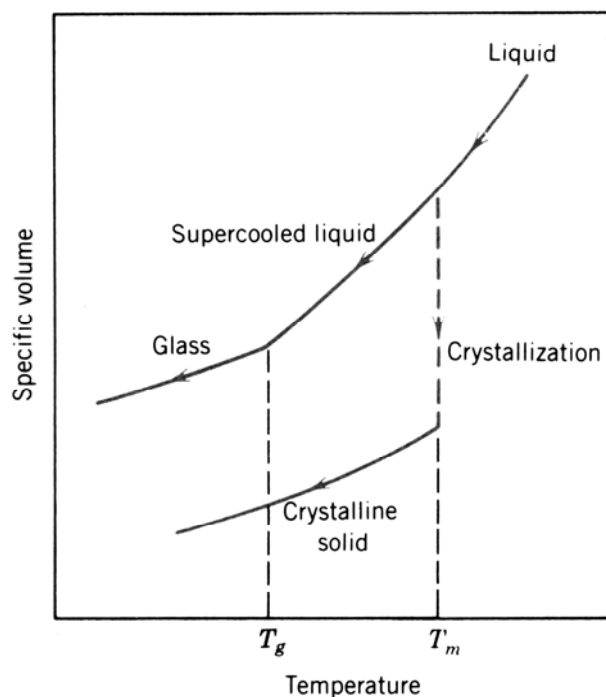
หน่วยความหนืดคือพอยซ์ (poises,P) และพาสกาลวินาที (Pa-s) โดย $1 P = 1 \text{ dyne-s/cm}^2$ ซึ่ง $\text{dyne} = \text{cm-g-s}$ และ $1 \text{ Pa-s} = 1 \text{ N-s/m}^2$ เมื่อต้องการเปลี่ยนหน่วยทำได้โดย $10 P = 1 \text{ Pa-s}$ ของเหลวจะมีความหนืดค่อนข้างต่ำ เช่นความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิห้องประมาณ 10^{-3} Pa-s ตรงกันข้ามแก้วจะมีความหนืดสูงมากที่อุณหภูมิห้องซึ่งเกิดจากความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความแข็งแรงของพันธะจะลดลง การเลื่อนและการไหลตัวของอะตอมหรือไอออนจะง่ายขึ้นทำให้ความหนืดลดลง โดยอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

6. สมบัติของวัสดุแก้ว

ในกระบวนการเย็นตัวของแก้ว เมื่ออุณหภูมิลดลงแก้วจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ไม่ทราบอุณหภูมิของการกลายเป็นของแข็งที่แน่นอนไม่เหมือนกับในกรณีของวัสดุแบบผลึก ความแตกต่างหนึ่งระหว่างวัสดุผลึกกับวัสดุอสัฐานคือความแตกต่างของปริมาตรจำเพาะ (ปริมาตรต่อน้ำหนักหรือส่วนกลับของความหนาแน่น) ที่ขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 สำหรับวัสดุผลึกที่อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) จะมีการลดลงของปริมาตรจำเพาะแบบไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่วัสดุแก้วจะมีการลดลงของปริมาตรจำเพาะต่อการลดลงของอุณหภูมิแบบต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามถ้าตามถัดมาจะพบว่ามีการลดลงของความชันเล็กน้อยซึ่งจุดนี้เรียกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมินี้วัสดุจะมีสภาพเหมือนแก้ว และที่เหนืออุณหภูมินี้วัสดุจะมีสภาพเหมือนของเหลวเย็นจัด (supercooled liquid) และเหนือขึ้นไปอีกวัสดุจะมีสภาพเป็นของเหลว

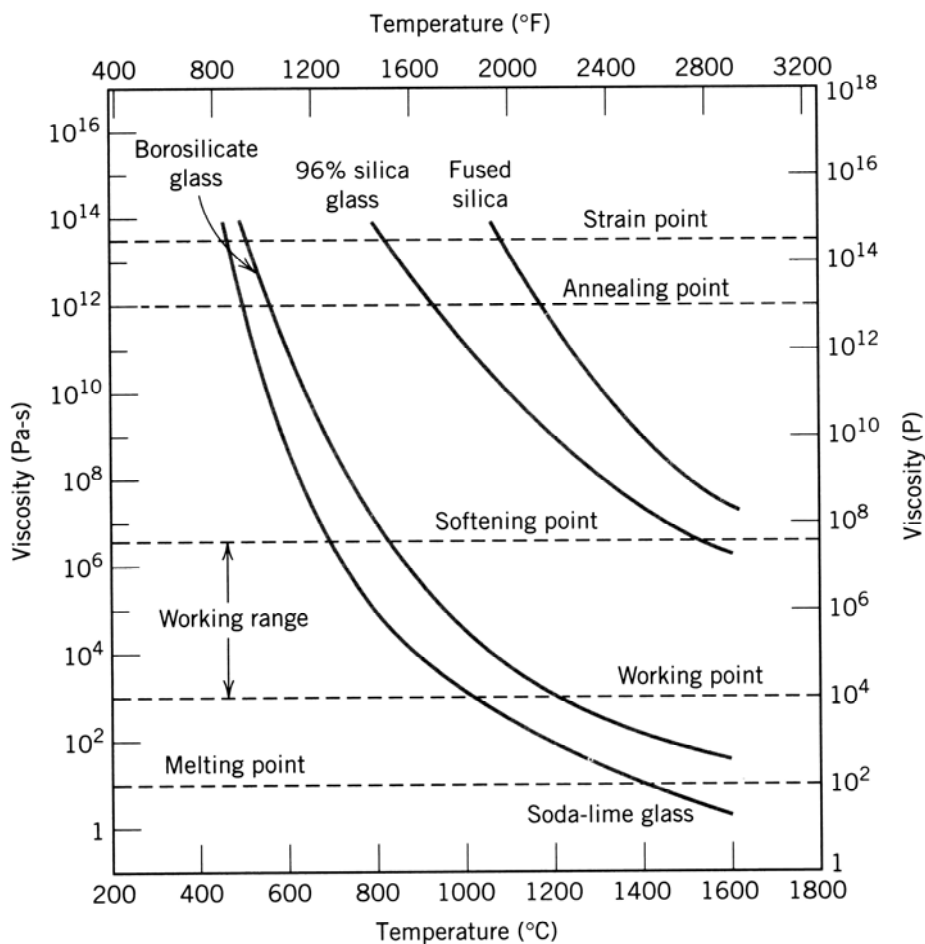
ความสำคัญของกระบวนการเกิดแก้วคือคุณลักษณะของความหนืดต่ออุณหภูมิของแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นกราฟล็อกของความหนืดเทียบกับอุณหภูมิของซิลิกาหลอมเหลว แก้วร้อยละซิลิกาสูง แก้วโบโรซิลิเกตและแก้วโซดาแลม ในแนวสเกลความหนืดจะพบจุดจำเพาะหลายจุดที่มีความสำคัญในการนำไปใช้งานและการขึ้นรูปแก้วได้แก่

1. จุดหลอมเหลว (melting point) เป็นอุณหภูมิที่วัสดุมีความหนืด 10 Pa-s (100P) ซึ่งแก้วจะมีความหนืดต่ำพอที่จะเรียกว่าของเหลว
2. จุดสำหรับการขึ้นรูป (working point) ได้แก่จุดที่มีอุณหภูมิซึ่งให้ค่าความหนืด 10^3 Pa-s (10^4 P) เป็นจุดที่แก้วมีความหนืดพอที่จะสามารถเกิดการเสียรูปได้ง่าย
3. จุดอ่อนตัว (softening point) เป็นอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุมีความหนืด 4×10^6 Pa-s (4×10^7 P) ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่วัสดุจะสามารถจัดการได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาด
4. จุดอบอ่อน (annealing point) เป็นอุณหภูมิที่วัสดุมีความหนืด 10^{12} Pa-s (10^{13} P) ที่อุณหภูมินี้การแพร่ของอะตอมจะรวดเร็วพอที่จะขจัดแรงเค้นตกค้างในวัสดุได้ภายใน 15 นาที
5. จุดความเครียด (strain point) เป็นอุณหภูมิที่วัสดุมีความหนืด 3×10^{13} Pa-s (3×10^{14} P) ต่ำกว่าอุณหภูมินี้วัสดุจะเกิดการแตกหักก่อนเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (T_g) จะอยู่เหนือจุดความเครียดนี้



รูปที่ 3.13 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะของวัสดุผลึกกับวัสดุอสัณฐาน

กระบวนการขึ้นรูปแก้วส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูป คือในช่วงระหว่างอุณหภูมิการขึ้นรูปกับการอ่อนตัว แน่นอนว่าอุณหภูมิต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ เช่นจุดอ่อนตัวของแก้วโซดาตามกับแก้วร้อยละ 96 ซิลิกาจากรูปที่ 3.14 จะอยู่ประมาณ 700 กับ 1550 °C (1300 กับ 2825 °F) ตามลำดับ ดังนั้นอุณหภูมิการขึ้นรูปแก้วโซดาตามจะต่ำกว่าของแก้วร้อยละ 96 ซิลิกาอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นระดับความสามารถในการขึ้นรูปของแก้วจึงมีช่วงกว้างมากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีเป็นสำคัญ

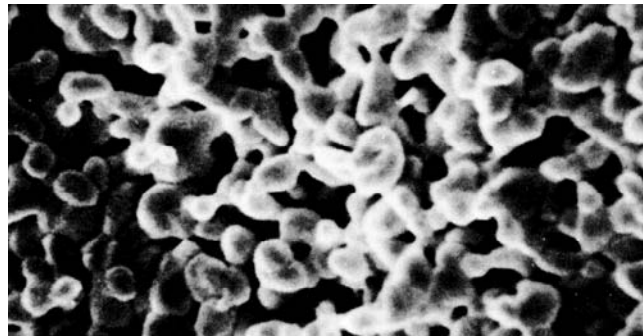


รูปที่ 3.14 กราฟความหนืดกับอุณหภูมิของซิลิกาหลอมเหลวกับแก้วซิลิกาบางชนิด

7. สมบัติทางกลอื่นๆ ของวัสดุเซรามิก (miscellaneous mechanical properties)

- อิทธิพลของความพรุนตัว

เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปทางเซรามิกบางอย่างจะเตรียมวัสดุในรูปของผง โดยการขึ้นรูปอนุภาคผงเหล่านี้ให้อยู่ในรูปทรงที่ต้องการ ซึ่งจะมีช่องว่างหรือช่องอากาศระหว่างอนุภาคเหล่านั้น และในระหว่างที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนความพรุนตัวเหล่านี้จะถูกขจัดออก แต่อย่างไรก็ตามบ่อยครั้งที่กระบวนการขจัดความพรุนตัวเหล่านี้ไม่สมบูรณ์ทำให้ยังคงมีความพรุนตัวเหลือค้างอยู่ในโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.15

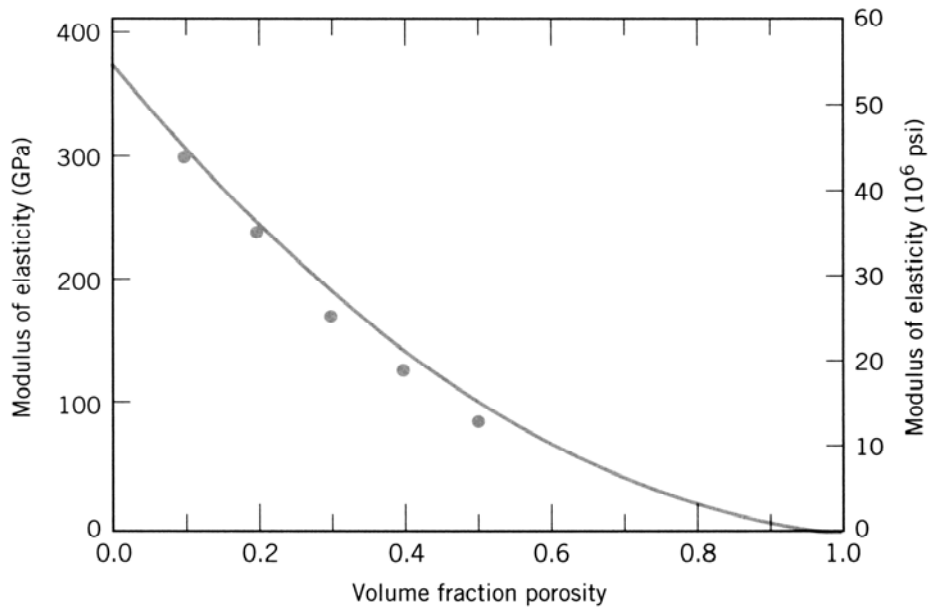


รูปที่ 3.15 ภาพความพรุนตัวตกค้างในอลูมิเนียมออกไซด์ (เผาที่ 1,700 °C 2.5 นาที) 5000x

ความพรุนตัวที่หลงเหลืออยู่เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อทั้งสมบัติความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของวัสดุ โดยพบว่าวัสดุเซรามิกจะมีขนาดของโมดูลัสความยืดหยุ่น E ลดลงต่อเศษส่วนปริมาตรของความพรุนตัว P ดังสมการ

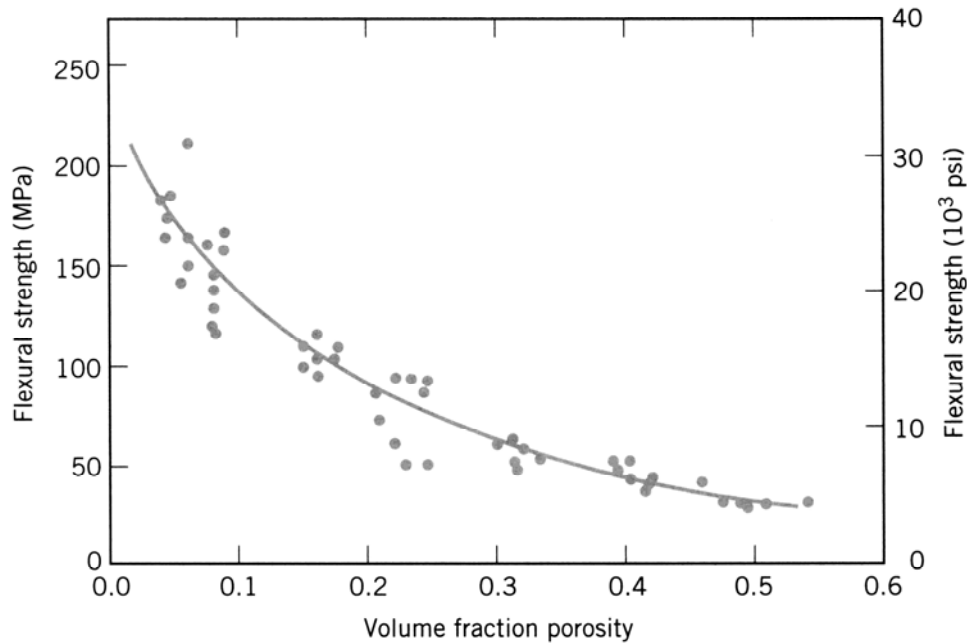
$$E = E_0(1 - 1.9P + 0.9P^2) \quad (3.15)$$

เมื่อ E_0 คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุปราศจากความพรุนตัว อิทธิพลของสัดส่วนปริมาตรความพรุนตัวต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นของอะลูมิเนียมออกไซด์ได้แสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งเส้นกราฟที่ปรากฏจะเป็นไปตามสมการที่ 3.15



รูปที่ 3.16 อิทธิพลของความพรุนตัวต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของอลูมิเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง

ความพรุนตัวจะส่งผลทำให้ความแข็งแรงการดัดงอลดลงด้วยสองเหตุผลคือ ช่องอากาศจะทำให้ขนาดของพื้นที่หน้าตัดซึ่งทดสอบลดลงในการรับแรงกระทำ และช่องอากาศจะประพฤติตัวเป็นบริเวณความเข้มข้นแรงเค้น (stress concentrators) โดยแรงเค้นที่กระทำจะถูกขยายเพิ่มเป็นสองเท่า ความพรุนตัวมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของวัสดุค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งแสดงอิทธิพลของปริมาณความพรุนตัวต่อความแข็งแรงการดัดงอของอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าความพรุนตัวร้อยละ 10 ของปริมาตรทำให้ความแข็งแรงการดัดงอของวัสดุลดลงร้อยละ 50 เทียบกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนตัว



รูปที่ 3.17 อิทธิพลความพรุนตัวต่อความแข็งแรงการคดงของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง

จากกราฟผลการทดสอบในรูปที่ 3.17 จะได้ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงการคดงที่ลดลงกับเศษส่วนปริมาตรความพรุนตัว (volume fraction porosity, P) ในรูปของสมการเอกซ์โปเนนเชียล ดังสมการ

$$\sigma_{sf} = \sigma_0 \exp(-nP) \quad (3.16)$$

เมื่อ σ_0 และ n เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบ

- ความแข็ง

ความแข็งเป็นสมบัติทางกลหนึ่งที่สำคัญของวัสดุเซรามิก โดยบ่อยครั้งจะถูกนำมาใช้ในงานที่ต้องการวัสดุที่มีสมบัติความต้านทานการขีดสีหรือการสึกหรอที่ดี และเป็นที่ทราบกันดีว่าเซรามิกเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ดังเช่นตัวอย่างค่าความแข็งแบบนูฟ (Knoop) ของ

<i>Material</i>	<i>Approximate Knoop Hardness</i>
Diamond (carbon)	7000
Boron carbide (B ₄ C)	2800
Silicon carbide (SiC)	2500
Tungsten carbide (WC)	2100
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	2100
Quartz (SiO ₂)	800
Glass	550

ตารางที่ 3.3 ความแข็งแรงของเซรามิกบางชนิดที่น้ำหนักกด 100 กรัม

- การคราก

บ่อยครั้งที่วัสดุเซรามิกเกิดการเสีรูปร่างแบบการครากเมื่อรับแรงกระทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยพฤติกรรมครากของเซรามิกซึ่งเป็นการเสีรูปร่างที่ขึ้นกับเวลาจะเป็นแบบเดียวกันกับที่เกิดขึ้นกับวัสดุโลหะ เพียงแต่การครากของเซรามิกจะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า สำหรับวัสดุเซรามิกการทดสอบการครากจะกระทำด้วยแรงกดภายใต้อุณหภูมิสูง โดยหาค่าการเสีรูปร่างแบบการครากในรูปของอุณหภูมิเทียบกับระดับของแรงเค้น

8. สรุป (summery)

โดยปกติที่อุณหภูมิห้องวัสดุเซรามิกส่วนใหญ่จะเกิดการแตกหักแบบเปราะ การเกิดรอยร้าวระดับจุลภาคเป็นเรื่องที่ยากมากที่จะควบคุม และรอยร้าวเล็กๆเหล่านี้ยังเป็นบริเวณที่เกิดการขยายขนาดของแรงเค้นที่กระทำ ส่งผลทำให้วัสดุมีความแข็งแรงการแตกหักค่อนข้างต่ำ แต่การขยายขนาดของแรงเค้นนี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีของการรับแรงกด ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้วัสดุเซรามิกมีความแข็งแรงสูงกว่าความแข็งแรงดึง อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของวัสดุเซรามิกจะวัดด้วยวิธีการทดสอบการดึงตามขวางจนกระทั่งขึ้นทดสอบแตกหัก

การศึกษากลไกการแตกหักทำให้สามารถเข้าใจกระบวนการแตกหัก ส่วนความแตกต่างระหว่างความแข็งแรงแตกหักทางทฤษฎีกับค่าที่วัดได้ของวัสดุเปราะ สามารถอธิบายได้โดยจุดบกพร่องขนาดเล็กซึ่งเป็นตัวขยายแรงเค้นดึงในบริเวณรอยร้าวนำไปสู่การเกิดการแตกหัก แรงเค้นที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงสุดในกรณีที่จุดบกพร่องมีลักษณะยาวและรัศมีปลายแหลม

การกระจายตัวของแรงเค้นหน้ารอยแตกอาจเขียนในเทอมของการจัดวางเป็นฟังก์ชันองศาและรัศมีเช่นเดียวกันกับตัวแปรความเข้มแรงเค้น ค่าตัวแปรวิกฤตของความเข้มแรงเค้นจะอยู่ในเทอมของความแกร่งการแตกหัก ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับของแรงเค้น ความยาวรอยแตก และตัวแปรทางเรขาคณิต ความแกร่งการแตกหักแสดงถึงความต้านทานต่อการแตกเปราะของวัสดุที่มีรอยร้าวปรากฏอยู่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน และสำหรับชิ้นงานที่ค่อนข้างหนาจะอยู่ในรูปของความแกร่งการแตกหักจากความเครียดแนวระนาบ (plane strain) ซึ่งปกติจะนำไปใช้ในงานการออกแบบ สำหรับวัสดุเหนียวพารามิเตอร์นี้จะมีค่าสูงมากและเป็นฟังก์ชันของโครงสร้างจุลภาค อัตราความเครียดและอุณหภูมิ

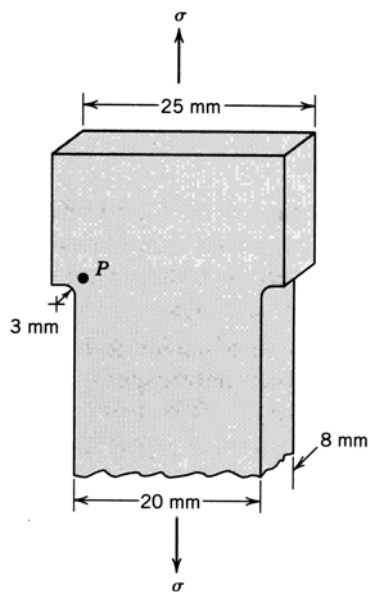
การเสีรูปร่างพลาสติกของวัสดุเซรามิกแบบผลึกเป็นผลการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน โดยความเปราะของวัสดุเหล่านี้จะอธิบายในรูปของระบบการเลื่อน (slip system) ภายในโครงสร้างที่มีจำนวนจำกัด และการเสีรูปร่างพลาสติกของเซรามิกแบบอสัณฐานจะอยู่ในรูปของการไหลหนืด (viscous flow) คือความต้านทานการเสีรูปร่างของวัสดุจะอยู่ในรูปของค่าความหนืด โดยที่อุณหภูมิห้องค่าความหนืดของวัสดุเซรามิกแบบไม่เป็นผลึกจะมีค่าสูงมาก

ชิ้นงานเซรามิกส่วนมากจะมีความพรุนตัวตกค้าง ซึ่งจะส่งผลทำให้โมดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งแกร่งการแตกหักลดลง นอกจากนั้นยังเพิ่มความเปราะของเซรามิกอีกด้วย วัสดุเซรามิกส่วนใหญ่เป็นที่ทราบกันดีว่ามีความแข็งสูงมาก และบ่อยครั้งวัสดุเซรามิกถูกนำไปใช้ในสภาวะที่มีการรับแรงกระทำภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จึงจำเป็นต้องทำการพิจารณาคุณลักษณะการครากของวัสดุที่อุณหภูมิเหล่านั้น

เนื่องจากแก้วมีการฟอร์มตัวที่อุณหภูมิในช่วงกว้างโดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของอุณหภูมิกับความหนืดเป็นสำคัญ จุดหลอมเหลว จุดสำหรับการขึ้นรูป จุดอ่อนตัว จุดบอบอ่อน และจุดความเครียดเป็นจุดที่มีค่าอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนืดจำเพาะของแก้ว

9. คำถามท้ายบท (Questions)

1. แรงเค้นบริเวณปลายแหลมของรอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจะถูกขยายขึ้นมาสูงสุดเท่าไร ถ้ารอยร้าวมีส่วนโค้งปลายแหลมเท่ากับ 1.9×10^{-4} mm. (7.5×10^{-6} in.) และยาว 3.8×10^{-2} mm (1.5×10^{-3} in.) เมื่อชิ้นงานรับแรงเค้นถึง 140 MPa (20000 psi)
2. หาความแข็งแรงการแตกหักของวัสดุเปราะที่แตกหักจากรอยร้าวที่บริเวณพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งมีส่วนโค้งปลายแหลม 1.2×10^{-3} mm (4.7×10^{-5} in.) และยาว 0.25 mm (0.01 in.) เมื่อมีแรงเค้นกระทำ 1200 MPa (174000 psi)
3. ชิ้นงานเซรามิกซึ่งมีโมดูลัสความยืดหยุ่น 300 GPa (43.5×10^6 psi) จะเกิดการแตกหักหรือไม่ถ้าถูกดึงด้วยแรงเค้น 900 MPa (130000 psi) โดยที่ภายในชิ้นงานมีรอยร้าวยาว 0.3 mm (0.012 in.) และส่วนโค้งปลายแหลมรอยร้าว 5×10^{-4} mm (2×10^{-5} in.) เพราะเหตุใด
4. ถ้าแก้วโซดาไลม์มีพลังงานพื้นผิวจำเพาะ 0.3 J/m^2 จงหาแรงเค้นวิกฤตที่จะทำให้รอยร้าวขนาด 0.05 mm. เกิดการแตกลุกลาม โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.2
5. อธิบายความแตกต่างระหว่างตัวแปรความเข้มแรงเค้น (stress intensity factor) ความแกร่งต่อการแตกหักจากแรงเค้นแนวระนาบ (plane stress fracture toughness) และความแกร่งต่อการแตกหักจากความเครียดแนวระนาบ (plane strain fracture toughness)
6. วัสดุหนึ่งที่มีความแกร่งต่อการแตกหักจากความเครียดแนวระนาบ (plane strain fracture toughness) $45 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($41 \text{ ksi}\cdot\text{in.}^{1/2}$) ถามว่าวัสดุจะแตกหักหรือไม่ถ้ารับแรงเค้น 1000 MPa (145000 psi) โดยที่ชิ้นงานมีรอยร้าวที่ผิวใหญ่สุดยาว 0.75 mm (0.03 in.) และสมมติให้ค่า Y เท่ากับ 1 เพราะเหตุใด
7. จากชิ้นส่วนเซรามิกดังรูปให้ตอบคำถามต่อไปนี้



7.1 แรงเค้นที่ถูกขยายขึ้นบริเวณจุด P มีค่าเท่าไร ถ้าแรงเค้นจากภายนอก 100 MPa (14500 psi)

7.2 จุด P ต้องมีส่วนโค้งเพิ่มขึ้นเท่าไรจึงจะลดแรงเค้นนี้ลงร้อยละ 20

8. ท่อนเซรามิกหนา 15 mm (0.6 in.) กว้าง 100 mm (4 in.) และยาว 400 mm (15.75 in.) ซึ่งเจาะรูตลอดความหนาชิ้นงานเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm. (1 in.)
- รูปที่ 3.2a ประกอบ แล้วตอบคำถามต่อไปนี้
- 8.1 กำหนดแรงเค้นบริเวณรอบๆ รู เมื่อใส่แรงเค้นดึง 50 MPa (7250 psi) ในแนวยาว
- 8.2 กำหนดแรงเค้นบริเวณรอบๆ รู แบบเดียวกันกับข้อ 9.1 แต่ใส่แรงในแนวขวาง
9. ชิ้นส่วนเครื่องบินทำมาจากโลหะผสมอลูมิเนียมซึ่งมีค่าฟิเนสการแตกหักแนวระนาบ $35 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (31.9 ksi.in.^{1/2}) เมื่อทดสอบพบว่าเกิดการแตกหักที่แรงเค้น 250 MPa (36250 psi) โดยมีรอยร้าวภายในชิ้นงานยาวที่สุด 2 mm (0.08 in.) ถามว่าชิ้นส่วนนี้จะเกิดการแตกหักหรือไม่ถ้าให้รับแรงเค้น 325 MPa (47125 psi) โดยมีความยาวรอยร้าวภายในชิ้นงานสูงสุด 1 mm (0.04 in.) เพราะเหตุใด
10. ชิ้นส่วนใบพัดเครื่องยนต์เครื่องบินทำจากโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีค่าฟิเนสการแตกหักแนวระนาบ $40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (36.4 ksi.in.^{1/2}) และเกิดการแตกหักด้วยแรงเค้น 365 MPa (53000 psi) โดยที่มีความยาวรอยร้าวภายในสูงสุด 2.5 mm (0.1 in.) จงหาว่าชิ้นส่วนเดียวกันนี้จะเกิดการแตกหักด้วยแรงเค้นเท่าไร ถ้าความยาวรอยร้าวภายในสูงสุดเปลี่ยนไปเป็น 4 mm (0.16 in.)

11. แผ่นชิ้นงานขนาดใหญ่อันหนึ่งมีทัฟเนสการแตกหักแนวระนาบ $55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($50 \text{ ksi}\cdot\text{in.}^{1/2}$) โดยที่ขณะใช้งานแผ่นชิ้นงานนี้ต้องรับแรงเค้น 200 MPa (29000 psi) จงหารอยร้าวที่พื้นผิวชิ้นงานต่ำสุดที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก โดยให้ค่า Y เท่ากับ 1
12. จงหาความยาวรอยร้าวภายในชิ้นงานสูงสุดที่ชิ้นงานอลูมิเนียมผสม 7075-T651 (ตารางที่ 3.1) โดยขณะใช้งานชิ้นงานต้องรับแรงเค้นเท่ากับครึ่งหนึ่งของความแข็งแรงจํานน และให้ค่า Y เท่ากับ 1
13. ชิ้นงานเซรามิกหนึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นกว้างและมีค่าทัฟเนสการแตกหักแนวระนาบ $77 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($70.1 \text{ ksi}\cdot\text{in.}^{1/2}$) กับความแข็งแรงจํานน 1400 MPa (205000 psi) และเมื่อตรวจรอยร้าวพบว่ามีความยาว 4 mm (0.16 in.) ถามว่าชิ้นงานสามารถออกแบบให้นำไปใช้งาน โดยให้รับแรงเค้นหนึ่งเท่าครึ่งของความแข็งแรงจํานนได้หรือไม่ (Y เท่ากับ 1)
14. ชิ้นส่วนโครงสร้างแผ่นเรียบหนา 12.5 mm (0.5 in.) มีความแข็งแรงจํานน 350 MPa (50750 psi) และทัฟเนสการแตกหักแนวระนาบ $33 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($30 \text{ ksi}\cdot\text{in.}^{1/2}$) โดยรูปทรงลักษณะนี้จะมีค่า Y เท่ากับ 1.75 และได้รับการออกแบบให้ใช้งานที่ต้องรับแรงเค้นหนึ่งเท่าครึ่งของความแข็งแรงจํานน ถามว่าจากข้อมูลที่ให้สามารถคำนวณความยาวรอยร้าวที่ผิวชิ้นงานสูงสุดได้หรือไม่ ถ้าได้มีค่าเท่าไร และถ้าไม่ได้เพราะอะไร
15. เมื่อทดสอบความแข็งแรงดึงกับชิ้นงานแก้วโซดาไลม์ (ดูตารางที่ 3.2) ซึ่งมีรอยร้าวที่ผิวยาว 10^{-2} mm . พบว่าเกิดการแตกหักที่แรงเค้น 70 MPa (10000 psi) ถามว่าส่วนโค้งปลายแหลมของรอยร้าวต่ำสุดเท่าไร เมื่อความแข็งแรงการแตกหักในทางทฤษฎีเท่ากับ $E/10$ (E คือโมดูลัสความยืดหยุ่น)
16. เมื่อทดสอบแรงดึงกับแท่งสี่เหลี่ยมของวัสดุ spinel (MgAl_2O_3) ขนาดหน้าตัดสูง 3.8 mm (0.15 in.) กว้าง 9 mm (0.35 in.) ด้วยกรรมวิธีกดสามจุด (three point bending) โดยมีระยะห่างของสองจุดรองรับใต้ชิ้นงาน 25 mm (1 in.) จงหาความแข็งแรงการดัดงอหรือความแข็งแรงดึงของวัสดุนี้ ถ้าเกิดการแตกหักด้วยแรง 350 N (80 lb_f)
17. ถ้าแท่งทรงกระบอกแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งมีความแข็งแรงการดึง 105 MPa (15000 psi) ต้องรับแรง 5560 N (1250 lb_f) ในลักษณะการรับแรงแบบสามจุดที่มีระยะห่างของจุดรองรับใต้ชิ้นงาน 45 mm (1.75 in.) ถามว่าชิ้นงานที่ใช้ต้องมีรัศมีเท่าไร

18. เมื่อทดสอบแรงดึงแบบกดสามจุดกับแท่งทดสอบอลูมิเนียมออกไซด์ขนาดรัศมี 3.5 mm (0.14 in.) พบว่าชิ้นงานแตกหักด้วยแรง 950 N (215 lb_f) โดยจุดรองรับใต้ชิ้นงานห่างกัน 50 mm (2 in.) ถามว่าถ้าทำการทดสอบกับวัสดุนี้ที่มีหน้าตัดชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 12 mm (0.47 in.) ต้องใช้แรงกระทำเท่าไรจึงจะทำให้ชิ้นงานแตกหัก ถ้าจุดรองรับใต้ชิ้นงานห่างกัน 40 mm (1.6 in.)
19. เพราะเหตุใดวัสดุเซรามิกโดยทั่วไปจึงมีความแข็งและเปราะกว่าวัสดุโลหะ
20. ถ้าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเบริลเลียมออกไซด์ (BeO) ที่มีความพรุนตัวร้อยละ 5 โดยปริมาตรเท่ากับ 310 GPa (45×10^6 psi) จงตอบคำถามต่อไปนี้
- 20.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุนี้ที่ไม่พรุนตัว
- 20.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุนี้ที่พรุนตัวร้อยละ 10 โดยปริมาตร
21. ถ้าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุโบรอนคาร์ไบด์ (B₄C) ที่มีความพรุนตัวร้อยละ 5 โดยปริมาตรเท่ากับ 290 GPa (42×10^6 psi) จงตอบคำถามต่อไปนี้
- 21.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุนี้ที่ไม่พรุนตัว
- 21.2 หากร้อยละความพรุนตัวของวัสดุนี้ถ้ามีโมดูลัสลดลงเป็น 235 GPa (34×10^6 psi)
22. ใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.2 ตอบคำถามต่อไปนี้
- 22.1 หาค่าความแข็งแรงดึงของแมกนีเซียมออกไซด์ที่ไม่พรุนตัว ถ้า n ในสมการที่ 3.16 เท่ากับ 3.75
- 22.2 หาเศษส่วนปริมาตรความพรุนตัวของแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีความแข็งแรงการค้ำอง 62 MPa (9000 psi)
23. วัสดุเซรามิกหนึ่งมีความแข็งแรงการค้ำอง 70 และ 60 MPa เมื่อมีเศษส่วนปริมาตรความพรุนตัว 01 และ 0.15 ตามลำดับ จากข้อมูลนี้ให้ตอบคำถามต่อไปนี้
- 23.1 หาค่าความแข็งแรงการค้ำองของวัสดุนี้กรณีที่ไม่พรุนตัว
- 23.2 หาค่าความแข็งแรงการค้ำองกรณีที่มีเศษส่วนปริมาตรความพรุนตัว 0.2