

Inverkan av spänningstillståndet på duktilitet i segjärnsinsats—En summering av experimentella data

Jonas Faleskog

December, 2012

Sammanfattning

För att kartlägga hur brottöjningen beror av spänningstillståndet i segjärnsinsatsen har tre olika typer av materialprov utförts på uppdrag av SKB. Dessa är enaxliga dragprov på runda standardprovstavar, prov utförda i plan töjning på en platt provstav försedd med en notch och prov utförda i ren skjuvning på en modifierad så kallad Iosipescuprovstav. Resultaten från dessa prov är sammanställda här. Materialproven visar att brottöjningen i segjärnsinsatsen beror starkt av graden av treaxlighet i spänningstillståndet, definierad som kvoten mellan medelspänningen och effektivspänning enligt von Mises. En enkel modell för detta är föreslagen. Slutligen verkar inte brottöjningen i segjärnsinsatsen vara känslig för devitortillståndet, det vill säga om spänningstillståndet vid en viss treaxlighet kan karaktäriseras som axisymmetriskt, som ett skjuvtillstånd eller som ett tillstånd däremellan.

Summary

To characterize how the failure strain depends on the stress state in the insert of nodular iron, three different material tests have been carried out under the commission of SKB. These are conventional uniaxial round bar tests, plane strain tests on plane sided notched specimens, and tests in pure shear on a modified Iosipescu type of specimen. The results of these tests are compiled and concluded here. The tests show that the strain to failure depends strongly on stress triaxiality, defined as the ratio between the mean stress and the effective von Mises stress. A simple model describing the relation between the strain to failure and stress triaxiality is proposed. Finally, the failure strain does not seem to exhibit a strong sensitive to variations of the deviatoric stress state for fixed value of stress triaxiality.

1. Introduktion

På uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har KTH Hållfasthetslära utfört en serie materialprov för att genomföra en begränsad kartläggning av hur duktiliteten i en segjärnsinsats beror av spänningstillståndet, se "Dragprovning och skjuvprovning av gjutjärn" (SKBdoc 1353646). Materialproven utfördes på provstavsgeometrier föreslagna i "Duktilitetssänkning på grund av treaxliga spänningstillstånd" (SKBdoc 1339835). Två olika prov utfördes: ett rent skjuvprov i form av ett modifierat Iosipescutest och ett så kallat plant deformationstest. Båda dessa prov kan karakteriseras som generaliserade skjuvprov då den mellersta huvudspänningen sammanfaller med medelspänningen i det område av testgeometrierna där brott uppstod. Proven skiljer sig dock åt vad gäller graden av treaxlighet i spänningstillståndet. Som en konsekvens fås duktilt brott vid markant olika nivåer på

effektivplastisk töjning, $\bar{\varepsilon}_f$, i testen. Det är sedan länge etablerat att duktiliteten i metalliska material beror av graden av treaxllighet i spänningstillståndet definierad som

$$T = \frac{\sigma_m}{\sigma_e}.$$

Här är σ_e effektivspänning enligt von Mises och σ_m medelspänningen. Experimentella, numeriska och teoretiska studier utförda vid låga T (< 1) har under den senaste 10-årsperioden visat att duktiliteten i vissa material även beror av deviatortillståndet (Barsoum och Faleskog 2007a, b, 2011, Barsoum et al. 2012, Faleskog och Barsoum 2013, Xue et al. 2013, Bao och Wierzbicki 2004, Bai och Wierzbicki 2008, 2010) vilket kan karaktäriseras med hjälp av den sk. Lodeparametern definierad som

$$L = \frac{2\sigma_{II} - \sigma_I - \sigma_{III}}{\sigma_I - \sigma_{III}},$$

där $\sigma_I \geq \sigma_{II} \geq \sigma_{III}$ är huvudspänningar och $-1 \leq L \leq 1$. Lodeparametern beskriver vilken typ av spänningsdeviatortillstånd som råder. För axisymmetriska tillstånd gäller att $|L| = 1$ och för skjuvtillstånd gäller i generell mening gäller att $L = 0$ (ren skjuvning plus ett eventuellt överlagrat hydrostatiskt tryck). Om duktiliteten i ett metalliskt material uppvisar känslighet för Lodeparametern är duktiliteten vanligtvis lägst för fallet $L = 0$ (generaliserat skjuvtillstånd), se Barsoum och Faleskog (2007a, b, 2011), Barsoum et al. (2012), Faleskog och Barsoum (2013), Xue et al. (2013) och referenser däri. För de båda proven utförda vid Hållfasthetslära gäller att spänningstillståndet karakteriseras av $L = 0$ (generaliserad skjuvning). För ingenjörbruk har ett fenomenologiskt brottkriterium för duktila brott föreslagits i Xue et al. (2013) som funktion av T och indirekt av L .

I tidigare analyser av segjärnsinsatsen där möjlighet till segt brott har undersökts har enbart data från exaliga dragförsök används. Det vill säga, den effektivplastiska töjning som noterats vid brott i de enaxliga dragproven har använts som kritisk töjning. Det är alltså av intresse att jämföra dessa data med de som erhållits i "Dragprovning och skjuvprovning av gjutjärn" (SKBdoc 1353646). En sådan jämförelse presenteras nedan.

2. Experimentella data

Den kompletterande provningen i "Dragprovning och skjuvprovning av gjutjärn" (SKBdoc 1353646) utfördes på material från segjärnsinsats I53 och ur en skiva belägen 2850 mm från botten, vilket ger en relativ position av ungefär 0.63 i axiell led (Jonsson 2012, personligt meddelande). Vid en jämförelse med de enaxliga testen är det mest relevant att jämföra med

data från sådana test utförda på material tagit från mittendelen. I Tabell 1 i “Mätning av kontraktion (Z) på dragprovstavar från segjärnsinsats I53 och I57” (SKBdoc 1355674) finns uppmätningar av relativ areareduktion, Z , listade. Om vi antar att den ursprungliga tvärsnittsarean är A_0 och den deformerade är A , fås den relativa areareduktionen som $Z = 1 - A/A_0$. Vidare, om den vi antar att den plastiska deformationen är inkompressibel gäller att $AL = A_0L_0$ (approximativt korrekt, även om materialet innehåller en ansenlig mängd porer). Då kan den effektivplastiska töjningen uttryckas som

$$\bar{\varepsilon} = \ln(L/L_0) = \ln(A_0/A) = -\ln(1 - Z).$$

Från data presenterade i “Mätning av kontraktion (Z) på dragprovstavar från segjärnsinsats I53 och I57” (SKBdoc 1355674) erhålles följande medelvärden och min/max-värden (totalt 6 prov utfördes vid varje position).

Toppdel:	$\bar{\varepsilon}_{\text{medelvärde}} = 0.145$,	$\bar{\varepsilon}_{\text{min}} = 0.102$,	$\bar{\varepsilon}_{\text{max}} = 0.171$
Mittendel:	$\bar{\varepsilon}_{\text{medelvärde}} = 0.172$,	$\bar{\varepsilon}_{\text{min}} = 0.140$,	$\bar{\varepsilon}_{\text{max}} = 0.212$
Bottendel:	$\bar{\varepsilon}_{\text{medelvärde}} = 0.202$,	$\bar{\varepsilon}_{\text{min}} = 0.161$,	$\bar{\varepsilon}_{\text{max}} = 0.237$

Dessa test är axisymmetriska till sin karaktär varvid $L = -1$ ($\sigma_I > 0$, $\sigma_{II} = \sigma_{III} = 0$). Som diskuterats i “Förstudie – Duktilitetssänkning på grund av treaxliga spänningstillstånd” (SKBdoc 1339835) avviker inte nivåerna på kritisk plastisk töjning nämnvärt från de nivåer där en diffus midjebildning kan förväntas börja utvecklas. Därför bortses här från en eventuell midja, vilket ger att $T = 1/3$.

Resultaten från testen redovisade i “Dragprovning och skjuvprovning av gjutjärn” (SKBdoc 1353646) sammanfattas här

Skjuvprov: totalt 9 giltiga test, med $T = 0$ och $L = 0$,

$$\bar{\varepsilon}_{\text{medelvärde}} = 0.522, \quad \bar{\varepsilon}_{\text{min}} = 0.468, \quad \bar{\varepsilon}_{\text{max}} = 0.558$$

Plant deformationsprov: totalt 13 giltiga test, med $T = 1/\sqrt{3} \approx 0.577$ och $L = 0$,

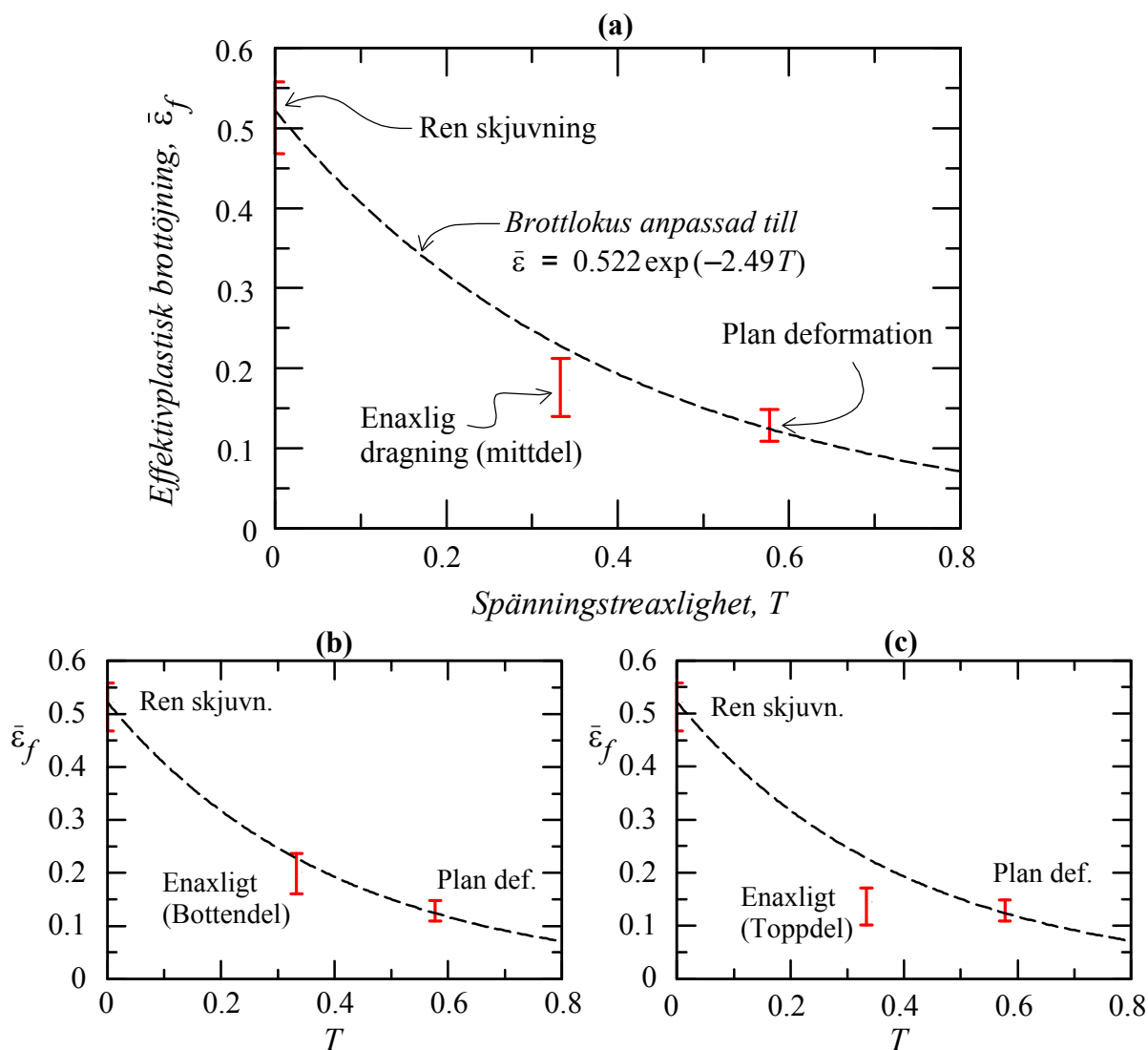
$$\bar{\varepsilon}_{\text{medelvärde}} = 0.124, \quad \bar{\varepsilon}_{\text{min}} = 0.109, \quad \bar{\varepsilon}_{\text{max}} = 0.148$$

I Figur 1(a) är effektivplastisk töjning vid brott plottat mot spänningstreaxligheten T för testen redovisade i “Dragprovning och skjuvprovning av gjutjärn” (SKBdoc 1353646) och “Mätning av kontraktion (Z) på dragprovstavar från segjärnsinsats I53 och I57” (SKBdoc 1355674). Den streckade kurvan i figuren är en exponentialfunktion som är anpassad till de två dataset utförda vid för $L = 0$. Valet av anpassningsfunktion är diskuterat i Xue et al. (2013) och har sitt ursprung i modellering av duktila brott baserat på tillväxt av mikrohål.

Notera att brotttöjningen utvärderad på de enaxliga dragproven på provstavar tagna från mittdelen ligger något under anpassningskurvan. I Figur 1(b) och (c) jämförs även brotttöjningsdata från provstavar tillverkade av material från övriga delar av segjärnsinsatsen. Resultatet visar att effekten av Lode-parametern (spänningsdeviatorstillståndet) inte verkar vara signifikant. Som nämnts ovan ger vanligtvis provning vid generaliserade skjuvtillstånd lägst brotttöjning om någon effekt av L kan observeras. Här är den trend som möjligtvis går att utskilja den motsatta. Möjliga orsaker till detta, förutom statistiska spridningseffekter Andersson et al. (2005), skulle kunna vara att den dukila brottmekanismen för segjärnsinsatsen inte helt kan beskrivas med bildande, tillväxt och sammanlänkning av mikrohål. Materialet har relativt låg brottseghet (se sammanställning i) och andra sprödare mekanismer verkar vara aktiva, se diskussion i Andersson et al. (2005).

3. Slutsatser och rekommendationer

De försök som utförts på provstavar där duktilt brott inträffat under skjuvdominerade spänningstillstånd ($L \approx 0$) visar, vid jämförelse med brotttöjningsresultat från enaxliga rundprovstavar, att inverkan av Lodeparametern på effektivplastisk brotttöjning sannolikt inte är stor för segjärnsinsatsen. Viktigt i sammanhanget, vilket speciellt bör betonas, är att den begränsade provningen som utförts visar att brotttöjningskurvan för skjuvdominerade spänningstillstånd ($L \approx 0$) ej verkar ligga under motsvarande kurva för axisymmetriska spänningstillstånd ($|L| \approx 1$), vilket är fallet för många stål. Alltså, enbart treaxligheten i spänningstillståndet verkar ha ett starkt inflytande på brotttöjningen i segjärnsinsatsen. En enkel modell av typen visad i Figur 1(a), där brotttöjningen enbart beror av treaxligheten T , bör därför vara tillräcklig som indikator på initiering av duktilt brott, t.ex. vid en FEM-analys eller en enklare skadeanalys. I SSM (2012) begär Strålsäkerhetsmyndigheten in kompletterande information av SKB. I en av de frågor som riktas till SKB, fråga 10, vill SSM bl.a. veta hur det hydrostatiska trycket påverkar segjärnets skadetålighet. Den materialprovning som hitintills har utfört visar tämligen tydligt att brotttöjningen beror starkt av hydrostatiska trycket i spänningstillståndet (treaxlighet T). Däremot visar materialprovningen att deviatorstillståndet, kvantifierat av Lodeparametern, inte verkar ha ett starkt inflytande på brotttöjningen.



Figur 1. Effektivplastisk brotttjning som funtion av treaxlighet

Referenser

Andersson C-G, Andersson M, Erixon B, Björkegren L-E, Dillström P, Minnebo P, Nilsson K-F, Nilsson F, 2005. Probabilistic analysis and material characterisation of canister insert for spent nuclear fuel. Summary report. SKB TR-05-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bao Y, Wierzbicki T, 2004. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences* 46, 81–98.

Bai Y, Wierzbicki T, 2008. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International Journal of Plasticity* 24, 1071–1096.

Bai Y, Wierzbicki T, 2010. Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture. *International Journal of Fracture* 161, 1–20.

Barsoum I, Faleskog J, 2007a. Rupture mechanisms in combined tension and shear – Experiments. *International Journal of Solids and Structures* 44, 1768–1786.

Barsoum I, Faleskog J, 2007b. Rupture mechanisms in combined tension and shear – Micromechanics. *International Journal of Solids and Structures* 44, 5481–5498.

Barsoum I, Faleskog J, 2011. Micromechanical analysis on the influence of the Lode parameter on void growth and coalescence. *International Journal of Solids and Structures* 48, 925–938.

Barsoum I, Faleskog J, Pingle S, 2012. The effect of stress state on ductility in the moderate stress triaxiality regime of medium and high strength steels. *International Journal of Mechanical Sciences* 65, 203–212.

Faleskog J, Barsoum I, 2013. Tension–torsion fracture experiments – Part I: Experiments and a procedure to evaluate the equivalent plastic strain. *International Journal of Solids and Structures* 50, 4241–4257.

SSM, 2012. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – kapselns mekaniska integritet. Dnr SSM2011-2426-58, Strålsäkerhetsmyndigheten.

Xue Z, Faleskog J, Hutchinson J W, 2013. Tension–torsion fracture experiments – Part II: Simulations with the extended Gurson model and a ductile fracture criterion based on plastic strain. *International Journal of Solids and Structures* 50, 4258–4269.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1339835 ver 2.0	Förstudie – Duktilitetssänkning på grund av treaxliga spänningstillstånd	SKB, 2012
1353646 ver 2.0	Dragprovning och skjuvprovning av gjutjärn	KTH, 2012
1355674 ver 2.0	Mätning av kontraktion (Z) på dragprovstavar från segjärnsinsats I53 och I57	Swerea SweCast AB, 2013
