

Dokument: SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0010-01

Model for styrketab ved svejsning i aluminium

Del. 2

SASAK
Projekt 2 - Varmepåvirkning

Carsten Jørn Rasmussen
og
Steen Ussing

FORCE Instituttet, maj 2001

Sammenfatning

Når en designer skal dimensionere en aluminiumskonstruktion, i hvilken der indgår svejsninger, er det nødvendigt at korrigere for de svækkede styrkeegenskaber i den varmpåvirket zone. Dette gøres typisk ud fra oplysninger om en HAZ-bredde og en svejsfaktor (softening factor). Til det formål benyttes der i Danmark typisk en af standarderne Eurocode 9, BS 8118 eller DS 419.

Mht. svejsfaktoren har tidligere resultater under forsøgsarbejdet i SASAK-projektet vist en forholdsvis god overensstemmelse mellem målte svejsfaktorer og de værdier der er angivet i Eurocode 9.

Mht. bredden af HAZ har forsøgsresultaterne i SASAK vist, at Eurocode 9 og BS 8118 i mange tilfælde er meget konservative, hvilket også er andres erfaringer [4]. I den danske standard DS 419 er HAZ-bredden angivet til i alle tilfælde at være 25 mm (one-inch-rule), hvilket selvfølgelig er noget upræcist. Det skal dog anføres, at DS 419 på rapportens udgivelsestidspunkt er under revision.

Med anvendelse af Rosenthals analytiske løsninger til beregning af varmeudbredelse ved svejsning, er der opstillet en mere nøjagtig model til forudsigelse af HAZ-bredden ved svejsning i aluminium. Modellen er tiltænkt som erstatning for punkt (3) og (6) under afsnit 5.5.3 i Eurocode 9.

Med et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden er det gennem tidligere beregningseksempler påvist, at man i visse tilfælde i væsentlig grad kan undgå overdimensioneringer og dermed opnå lettere og billigere aluminiumsprodukter.

De hér beskrevne modeller for styrketab er udviklet til anvendelse i legeringer i 5000- og 6000-serierne.

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion.....	4
2	Varmepåvirkede zone (HAZ).....	4
2.1	Grænsetemperaturer.....	5
2.2	Definition af HAZ-bredde.....	6
2.3	Definition af svejsefaktoren (softening factor).....	7
3	SASAK-model for HAZ-bredde.....	7
3.1	HAZ-bredde for 5000-serien.....	8
3.2	HAZ-bredde for 6000-serien.....	9
3.3	Sammenhæng mellem varmetilførsel og areal af tilført svejsemetal.....	10
3.4	Udbredelse af HAZ.....	10
4	Svejsefaktoren.....	11
5	Konklusion.....	11

1 Introduktion

I Danmark benytter designere og konstruktører typisk standarder som eksempelvis Eurocode No. 9, BS 8118 eller DS 419 i forbindelse med dimensionering af svejste aluminiums-konstruktioner. Til forudsigelse af størrelsen af HAZ angiver disse standarder dels en HAZ-bredde og dels en svejsefaktor (softening factor). Svejsefaktoren er et udtryk for, hvor meget styrken er reduceret i den varmepåvirkede zone, dvs. inden for HAZ-bredden.

Hvad angår bredden af HAZ har forsøgsresultaterne i SASAK vist, at Eurocode 9 og BS 8118 i mange tilfælde er meget konservative, hvilket også er andres erfaringer [4]. I den danske standard DS 419 er HAZ-bredden angivet til i alle tilfælde at være 25 mm (one-inch-rule). Eftersom HAZ-bredden kan variere mellem få mm og op til over 20 mm, er DS 419 selvfølgelig noget upræcis. Det skal dog anføres, at DS 419 på rapportens udgivelsestidspunkt er under revision.

Gennem et litteraturstudie er det erfaret, at det især er den maksimale temperatur, en aluminiumslegering udsættes for i nærheden af en svejsning, der er afgørende for, om materialet mister styrke.

Gennem analytiske beregningsmodeller (Rosenthals ligninger) kan varmeudbredelsen i aluminium ved svejsning beregnes. Man kan bl.a. beregne den maksimale temperatur som materialet oplever fra svejseprocessen i vilkårlige afstande fra svejse sømmen.

Via sådanne beregninger er der opstillet en ”Sasak-model” der giver et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden ved svejsning på aluminiumskonstruktioner med kombinerede godstykkelser mindre end 30 mm. Modellen kan anvendes som erstatning for punkt (3) og (6) under afsnit 5.5.3 i Eurocode 9, hvis der ønskes et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden.

Formålet med et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden er, at man i designfasen for visse aluminiumskonstruktioner i højere grad kan undgå overdimensioneringer, og dermed opnå lettere og billigere aluminiumsprodukter.

2 Varmepåvirkede zone (HAZ)

Aluminium kan deles op i ikke-modningshærdbare og modningshærdbare legeringer. Med hensyn til varmepåvirkning og styrkeegenskaber opfører de to grupper sig meget forskelligt.

Ikke-modningshærdbare legeringer udglødes som regel omkring 350-400 °C, hvorved materialet kommer i en blød tilstand (rekrystalliserer). Det kan ikke senere bibringes forhøjet styrke ved en varmebehandling.

Modningshærdbare legeringer har mere varierende egenskaberne i HAZ. I HAZ-området op mod smeltelinien er grundmaterialet blevet påvirket af de største temperaturer med en efterfølgende bratkøling. Der er her foregået en opløsningsglødning (glødning sker normalt i intervallet 450 °C til 550 °C afhængig af legeringssammensætning) og herefter foregår der en koldmodning. Koldmodningen finder typisk sted over et antal uger afhængig af legering. I området hvor makstemperaturen har været omkring 400 °C falder hårdheden, fordi der har fundet en udglødningseffekt sted. Længere væk fra smeltebadet stiger hårdheden indtil den når op på grundmaterialets oprindelige hårdhed. Den stigende hårdhed skyldes, at effekten fra ældningsprocessen bliver mindre med den faldende temperatur.

2.1 Grænsetemperaturer

Gennem et litteraturstudier er det erfaret, at i forbindelse med svejsning er det især den maksimale temperatur, som en aluminiumslegering påvirkes med i en vilkårlig af stand til svejssømmen, der er afgørende for, om der mistes styrke. Den tid, som materialet er opvarmet i, er formentlig mindre afgørende.

Fra litteraturstudiet er det ligeledes erfaret, at aluminiumslegeringer i 5000-serien (ikke-modningshærdbare legeringer) mister styrke, når temperaturen overskrider omkring 370°C. Aluminiumslegeringer i 6000-serien (modningshærdbare legeringer), mister styrke når temperaturen overskrider omkring 240°C.

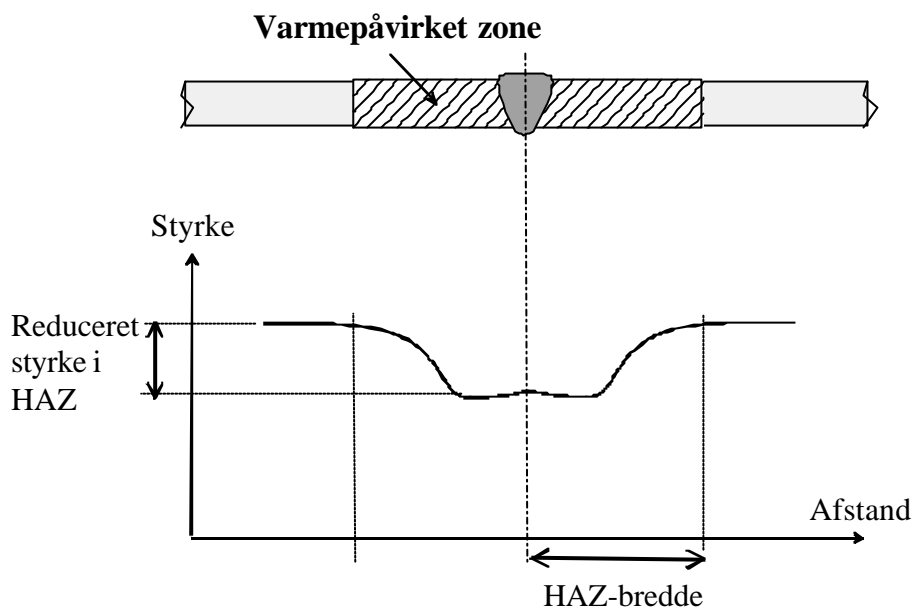
De to nævnte grænsetemperaturer, der angiver ved hvilken temperatur der sker en styrkereduktion, vil variere lidt afhængigt af en række forskellige forhold, herunder primært den eksakte legeringssammensætning.

Ved hjælp af Gleeble-tests for SASAK-projektet er det bekræftet, at legering 5083 begynder at få mindre hårdhedstab ved en temperatur mellem 360°C og 370°C.

Legering 6063 begyndte at miste hårdhed efter en kortvarig opvarmning til mellem 255°C og 270°C, altså ved en lidt højere temperatur end den før angivne for 6000-serien på 240°C. Legering 6082 begyndte at tabe hårdhed ved kortvarig opvarmning over 261°C – også lidt højere end de førnævnte 240°C.

Man må dog påregne, at legeringer i 6000-serien også i mindre omfang er påvirket af den tid legeringen er opvarmet. De nævnte grænsetemperaturer skal derfor kun betragtes som middelværdier, der afhængig af de eksakte forhold kan variere lidt.

På figur 2.1 ses en skitse af en stumpsøm, hvor den varmpåvirkede zone er vist. På den nederste del af figuren er der skitseret et typisk eksempel på, hvordan styrkeegenskaberne er reduceret indenfor denne varmpåvirkede zone. Som det ses af skitsen, varierer styrketabet typisk en hel del inden for bredden af den varmpåvirkede zone.



Figur 2.1: Typisk påvirkning af styrkeegenskaber omkring en svejsning, (varmpåvirket zone = HAZ)

For at simplificere de reducerede styrkeegenskaber i forbindelse med dimensionering af svejste aluminiumskonstruktioner, angiver de mest relevante standarder størrelsen af HAZ ved en bredde og en svejsefaktor (softening factor ρ_{haz} ifølge Eurocode 9).

2.2 Definition af HAZ-bredde

I denne undersøgelse er HAZ-bredden defineret som den afstand fra centerlinien af svejse sømmen og vinkelret ud til det sted, hvor hårdheden er oppe på niveau med resten af grundmaterialets hårdhed. Et eksempel på HAZ-bredden i en stumpsøm kan ses på figur 3.1. Se også figur 4.2.

De standarder som konstruktører, designere og beregnere i Danmark anvender til at forudsige HAZ-bredden er typisk en af følgende: Eurocode 9, BS 8118 eller DS 419.

2.3 Definition af svejsefaktoren (softening factor)

Softening factor (ρ_{haz}), der på dansk kaldes ”svejsefaktoren”, er defineret som den faktor styrken er nedsat i den varmepåvirkede zone. Den vil altid være mindre end eller lig med 1.

I denne undersøgelse er der på udvalgte svejste forsøgsemner benyttet hårdhedsmålinger til at bestemme hårdhedstab i HAZ. Hårdhedstab er defineret ved en midling af de 3 laveste målte hårdheder i HAZ i forhold til grundmaterialets hårdhed. Se evt. figur 4.2.

Hårdhedstab for en specifik aluminiumslegering forventes med en mindre usikkerhed at kunne sammenlignes med styrketabet.

Ved dimensionering skal styrken inden for et HAZ-område som hovedregel, beregnes som styrken af grundmaterialet ganget med svejsefaktoren (ρ_{haz}).

I Danmark benyttes ofte Eurocode 9, BS 8118 eller DS 419 til at forudsige svejsefaktoren.

For en nærmere beskrivelse af disse 3 standarder henvises der til den tidligere Sasak-rapport: ”SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0005-00, Model for styrketab ved svejsning i aluminium – 1. udgave”

3 SASAK-model for HAZ-bredde

Som nævnt indledningsvis er der gennem Rosenthals analytiske løsninger for varmeudbredelse opstillet en såkaldt ”Sasak-model” der giver et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden ved svejsning på aluminiumskonstruktioner.

Det er tiltænkt at Sasak-modellen kan erstatte punkt (3) og (6) under afsnit 5.5.3 i eurocode 9, der, som den er udformet i dag, angiver meget konservative estimater for HAZ-bredden ved henholdsvis MIG-og TIG-svejsning i aluminium.

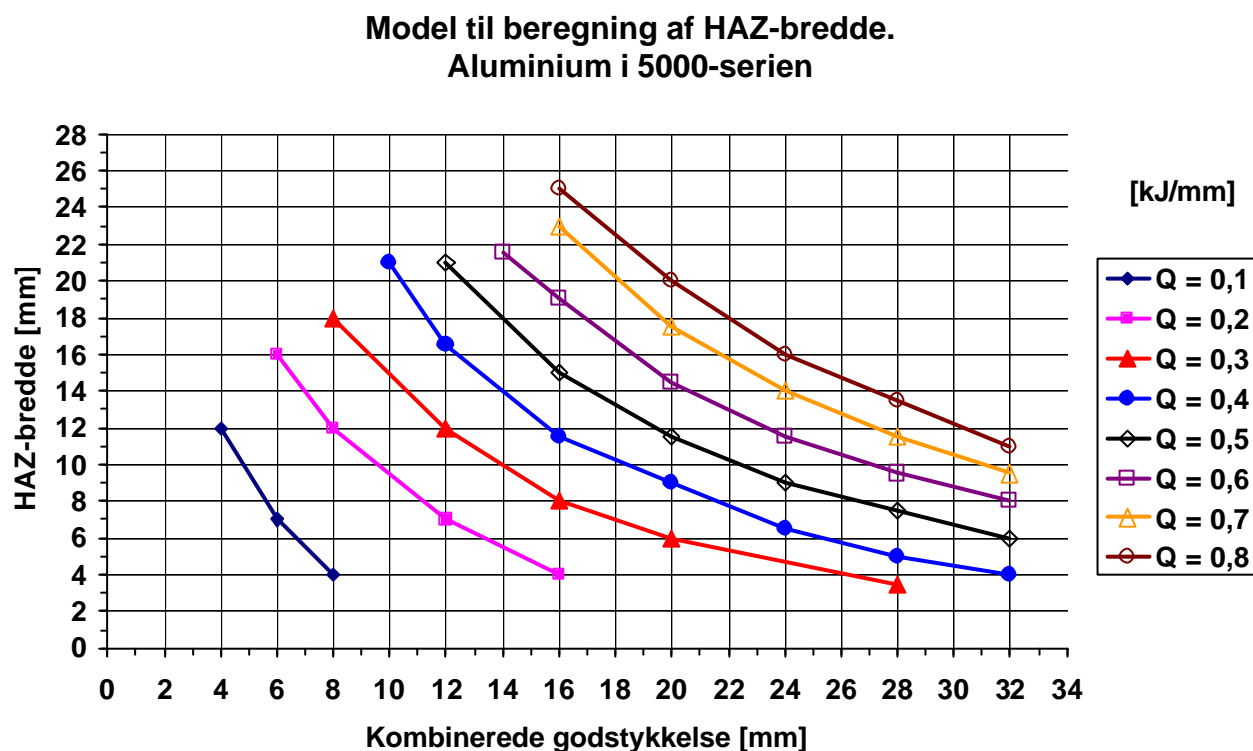
Sasak-modellen kræver kun kendskab til 3 parametre:

- Kombinerede godstykkelse,
- Varmetilførsel (kan erstattes af tværsnitsareal af tilført materiale)
- Legeringsserie (5000 eller 6000).

Disse 3 parametre vil en designer eller konstruktør med stor sandsynlighed have kendskab til på design-stadiet i forbindelse med udvikling af en aluminiumskonstruktion.

3.1 HAZ-bredde for 5000-serien

På figur 3.1 er Sasak-modellen til beregning af HAZ-bredden for 5000-serien vist som funktion af den kombinerede godstykkelse og varmetilførsel.



Figur 3.1: Sasak-model til beregning af HAZ-bredde (b_{haz}) ved MIG- og TIG-svejsning af stump- og kantsømme i 5000-serien med kombinerede godstykkelser under 30 mm.

Figur 3.1 gælder for stump- og kantsømme ved svejsning på kombinerede godstykkelser¹ under 30 mm

Hvis figur 3.1 giver HAZ-breder mindre end 5 mm, skal 5 mm anvendes som minimum.

¹ 2 gange godstykkelse i en stumpsøm

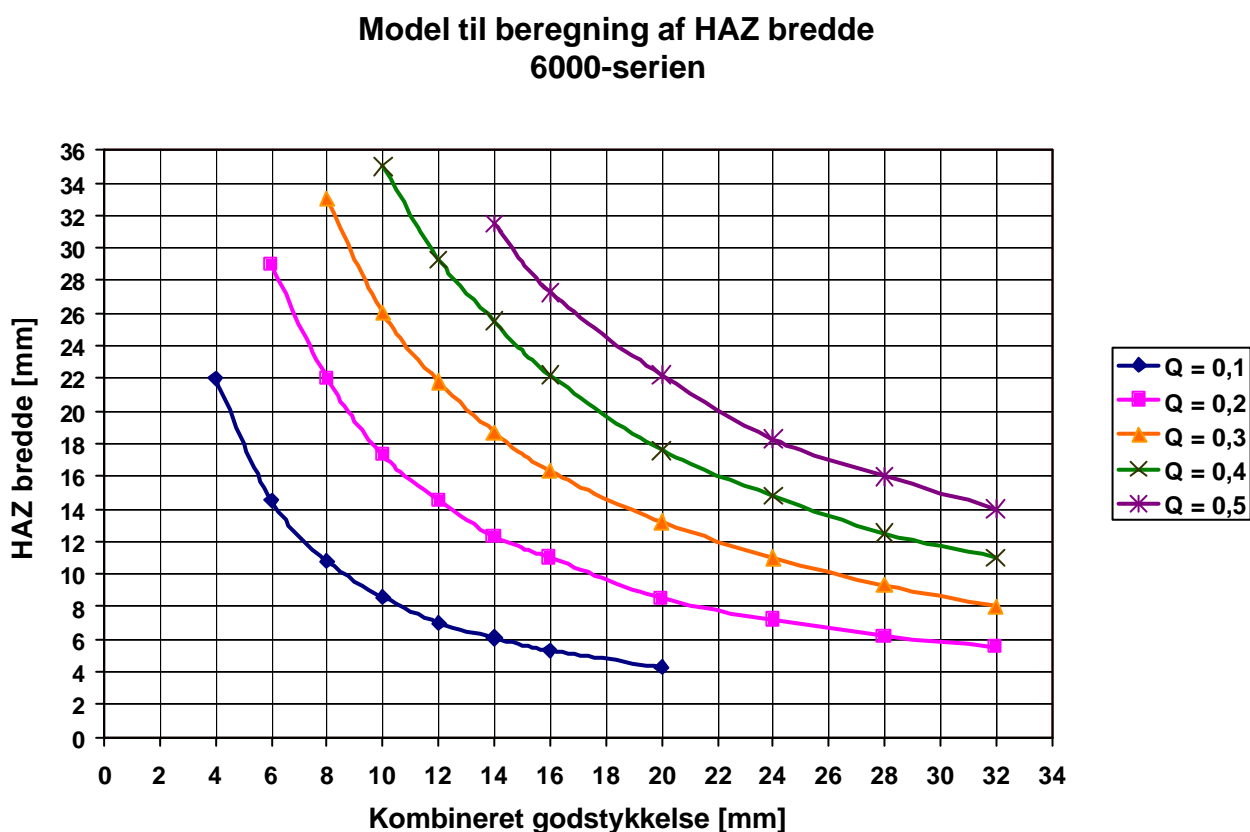
Hvis figur 3.1 giver HAZ-bredder over 25 mm, skal 25 mm anvendes som maksimum. (I tilfælde af kraftig køling fra fikstur eller backing i en svejseopstilling kan figur 3.1 overestimere HAZ-bredden).

Ved kombinerede godstykkelser over 30 mm skal 25 mm anvendes som HAZ-bredde.

Ved flerstrengssvejsning bestemmes HAZ-bredden efter figur 3.1 af den svejsestreng, der svejses med den største varmetilførsel.

3.2 HAZ-bredde for 6000-serien

Tilsvarende modellen for aluminiumslegeringer i 5000-serien, er der udviklet en model for aluminiumslegeringer 6000-serien. Den valgte grænsetemperatur er 240°C, hvilket nok må betegnes som lidt til den konservative side.



Figur 3.2: Sasak-model til beregning af HAZ-bredde (b_{haz}) ved MIG- og TIG-svejsning af stump- og kantsømme i 5000-serien med kombinerede godstykkelser under 30 mm.

Hvis figur 3.2 giver HAZ-bredder over 25 mm, skal 25 mm anvendes som maksimum. (I tilfælde af kraftig køling fra fikstur eller backing i en svejseopstilling kan figur 3.2 overestimere HAZ-bredden).

Ved kombinerede godstykkelser over 30 mm skal 25 mm anvendes som HAZ-bredde.

Ved flerstrengssvejsning bestemmes HAZ-bredden efter figur 3.2 af den svejsestreng, der svejses med den største varmetilførsel.

3.3 Sammenhæng mellem varmetilførsel og areal af tilført svejsemetal

På figur 3.1 er modellen afhængig af varmetilførslen (Q), hvilket dog ofte i designfasen er ukendt for konstruktøren. Ved MIG-svejsning følger varmetilførslen imidlertid som regel tværsnitsarealet af svejseømmen med en nogenlunde konstant faktor. Fra praktiske svejseforsøg under SASAK-projektet er denne faktor midlet til at være ca. 0,019, hvilket giver sammenhængen:

$$Q = 0,019 * A$$

Hvor (Q) er varmetilførslen i kJ/mm og (A) er arealet af det tilførte materiale i mm².

Areal af tilført materiale

Ved MIG-svejsning af stump- og kantsømme kan arealet af det tilførte materiale (A) for hver svejsestreng simplificeret beregnes som:

$$\text{For } \underline{\text{stumpsømme}}: \quad A = \frac{(t)^2}{s}$$

,hvor t er godstykkelsen, og s er antal svejsestreng

$$\text{For } \underline{\text{kantsømme}}: \quad A = \frac{(a)^2}{s}$$

,hvor a er a-målet, og s er antal svejsestreng

3.4 Udbredelse af HAZ

Som nævnt er det tiltænkt at Sasak-modellen kan erstatte punkt (3) og (6) under afsnit 5.5.3 i eurocode 9. Mht. udbredelsen af HAZ for forskellige fugetyper kan anvisningerne i Eurocode 9 anvendes – se figur 3.2.

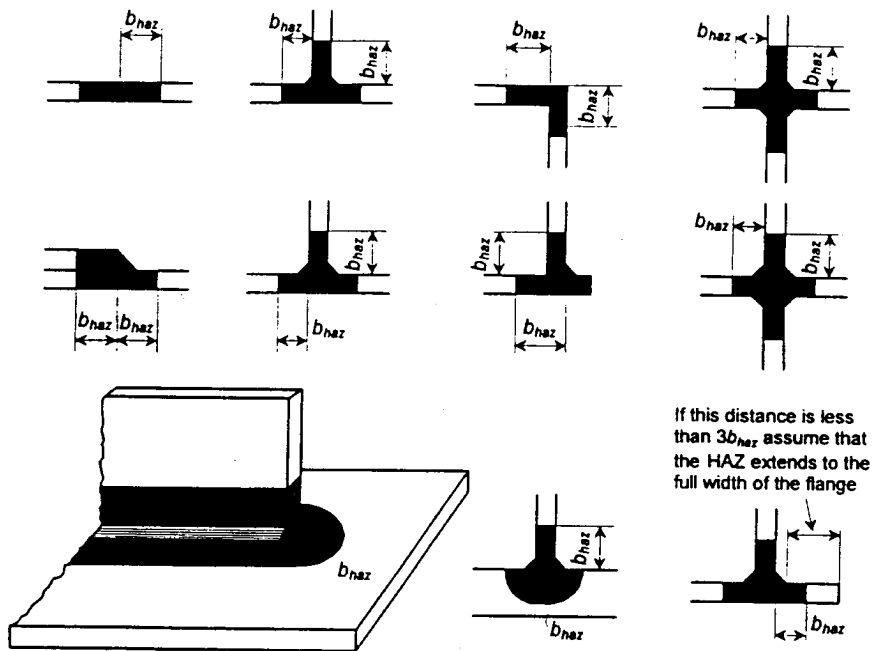


Figure 5.6: The extent of heat-affected zones (HAZ)

Figur 3.2: Udbredelse af HAZ afhængig af fugetypen (taget fra Eurocode 9)

4 Svejsefaktoren

Svejsefaktoren der også kaldes for softening factor (ρ_{haz}), er defineret som den faktor styrken er nedsat i den varmepåvirkede zone. Mht. svejsefaktoren har tidligere resultater under forsøgsarbejdet i SASAK-projektet vist en god overensstemmelse mellem målte svejsefaktorer, og de værdier der er angivet i Eurocode 9. Derfor henvises der i forbindelse med svejsefaktoren til Eurocode 9's angivelser (afsnit 5.5.2 i Eurocode 9).

5 Konklusion

Der er opstillet en simpel model til estimering af HAZ-bredden, hvilket er tiltænkt at kunne erstatte punkt (3) og (6) under afsnit 5.5.3 i eurocode 9, hvis der ønskes et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden. Baggrunden for dette har været at Eurocode 9 på dette punkt har vist sig i mange tilfælde at være meget konservativ. Beregningseksempler har vist, at et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden kan have betydelig indflydelse på dimensioneringen af en svejst aluminiumskonstruktion.

Den udviklede model gælder for MIG- og TIG-svejsning af stump- og kantsømme i aluminiumlegeringer i 5000- og 6000-serien.

I forbindelse med udviklingen af modellen til estimering af bredden af HAZ er der lagt vægt på, at den er simpel og let anvendelig.

Det skal bemærkes, at sasakmodellen, der giver et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden, (endnu) ikke officielt er godkendt til at kunne erstatte punkt (3) og (6) under afsnit 5.5.3 i eurocode 9.

Det er derfor en vurderingssag afhængig af den enkelte konkrete konstruktionsopgave, om man vil følge de normfaste regler i standarderne eller om man vil forsøge at opnå et mindre konservativt estimat af HAZ-bredden gennem SASAK-modellen.

Eurocode 9 rummer i lighed med en række andre normer og standarder muligheden for at afvige fra normen, såfremt det kan dokumenteres teknisk at det er forsvarligt.

Mht. udbredelsen af HAZ for forskellige fugetyper samt svejsefaktoren (softening factor) er det gennem praktiske forsøg og litteraturstudier vist, at Eurocode 9 stemmer godt overens med virkeligheden, og der henvises i den forbindelse til denne standard.

Litteraturliste

1. J. Hattel,
”Grundlæggende varmelære for termiske materialeprocesser”
Kompendium, IPT, DTU, 1995.
2. O.R.Myhr and Ø.Grong
”Dimensionless Maps for Heat Flow Analyses in Fusion Welding”
Acta metallurgica et Materialia, Vol. 38, No. 3, pp. 449-460, 1990
3. R.J. Brungraber and F.G. Nelson
”Effect of Welding Variables on Aluminium Alloy Weldments”
Welding Research Supplement, March 1973
4. J. Dwight and I. Robertson
”Extent of the Softened Zone at MIG Welds on 6XXX Aluminium”
INALCO, 1998
5. Clausen, B
”Lysbuesvejsning af deformations- og modningshærdede aluminiumslegeringer”
Svejsning 8, (5), oktober, 1981
6. G.O. Rading and J.T. Berry
”A Model for Heat.Affected Zone Hardness Profiles in Al-Li-X Alloys”
Welding Research Supplement, september 1998.
7. T. Ma og G. den Ouden
”Heat-affected zone softening during arc welding of Al-Zn-Mn alloys”
Joining of Materials 7, Helsingør, Denmark, 1995.