

Dokument: SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0007-02

Retning af aluminium

SASAK
Projekt 2 - Varmepåvirkning

Carsten Jørn Rasmussen
og
Steen Ussing

FORCE Instituttet, maj 2001

Forord

Denne rapport er delt op i en teoretisk og en praktisk del vedrørende retning i aluminium.

Den teoretiske del omhandler en generel beskrivelse af de forskellige muligheder for retning af svejsedeformationer i aluminium.

Den praktiske del omhandler resultater fra orienterende forsøg med varmretning udført på FORCE Institutet i forbindelse med SASAK-projektet.

Indhold

1	RETNING AF ALUMINIUM - TEORI	4
1.1	Introduktion.....	4
1.2	Mekanisk retning.....	4
1.2.1	Hamring.....	4
1.2.2	Presning.....	4
1.3	Varmretning	5
1.3.1	Princip ved varmetretning	5
1.3.2	MIG og TIG	5
1.3.2.1	Vinkelknæk	6
1.3.2.2	Buler.....	6
1.3.3	Gasbrænder.....	7
1.3.4	Styrketab.....	7
1.3.5	Øvrige ulemper.....	7
2	VARMRETNING MED TIG-BRÆNDER - ORIENTERENDE FORSØG	8
2.1	Forsøg med legering 5754.....	8
2.2	Resultater.....	8
2.3	Vurdering	9
2.4	Orienterende sammenligning mellem forskellige legeringer.....	10
2.5	Optimering af data – afsluttende kommentarer	12

1 RETNING AF ALUMINIUM - TEORI

1.1 INTRODUKTION

Som udgangspunkt bør man forsøge at undgå uacceptable store svejsedeformationer ved at anvende egnede svejserækkefølger, forspænde emner, reducere varmetilførslen m.m. Allerede i designfasen bør man være opmærksom på at minimere svejsedeformationer, eksempelvis ved at placere svejsesømmene passende steder.

I de tilfælde hvor man ikke kan undgå uacceptable store svejsedeformationer, er der forskellige muligheder for efterfølgende at rette en aluminiumskonstruktion op. Metoderne kan deles op under hhv. mekanisk retning og varmretning.

1.2 MEKANISK RETNING

Mekanisk retning i aluminium kan sammenlignes med mekanisk retning i stål. De to væsentligste metoder er hamring og presning.

1.2.1 HAMRING

Hamring er en hurtig og effektiv metode til at rette svejsedeformationer op med. Derudover vil hamring som oftest reducere størrelsen af spændinger omkring svejsefugen. Man skal dog være opmærksom på risikoen for revner især ved hamring af bundstrengene. Af andre ulemper kan det nævnes, at hamring afsætter mærker de steder, hvor der hamres, og at det er forbundet med en kraftig støj.



Figur 1. Svejste plader med spræld, der efterfølgende blev rettet op ved hamring.

Eksempel:

Ved MIG-svejsning af 2 stumpsømme på store 2,7x4 m paneler i 5 mm godstykkelse, blev pilehøjderne reduceret ved hamring fra gennemsnitlig ca. 12 mm til gennemsnitlig ca. 2 mm - se figur 1.

1.2.2 PRESNING

Regulære udbøjninger af profiler eller vinkelknæk kan i nogen tilfælde rettes op i en presse. Hvis eksempelvis en bøjet plade skal rettes op, skal pladen kontrabøjes tilstrækkelig i pressen, så pladens elasticitet efter udtagning af pressen får pladen til at rette sig op til at være lige.

Sikkerhedsmæssigt skal man være opmærksom på, at genstande, der ikke er fastlåste, kan komme flyvende ud af pressen.

1.3 VARMRETNING

Varmretning i aluminium adskiller sig noget fra varmrretning i stål, hvilket især skyldes den noget større varmeudbredelseshastighed i aluminium. Ved opretning af svejsedeformationer i aluminium er det mest anvendelige TIG- og MIG-svejsning.

For at varmrretning af aluminium skal lykkes, kræver det en god erfaring med den forestående retteopgave, og det kan i visse tilfælde være nødvendigt først at udføre praktiske forsøg på prøveemner, inden varmrretningen på den egentlige konstruktion påbegyndes.

1.3.1 PRINCIP VED VARMRETNING

Ved en lokal opvarmning på en metalplade, vil det opvarmede område forsøge at udvide sig. Med stigende temperatur falder flydespændingen imidlertid, og pga. det omkringliggende koldere materiale forekommer der i en eller anden udstrækning en stukning af det opvarmede materialet. Efterhånden som materialet nedkøler trækker det sig sammen, hvilket giver anledning til store spændinger omkring det nedkølet område. Når spændingerne overstiger materialets flydespænding deformeres konstruktionen.

Ved varmrretning udnyttes i princippet de samme temperatur- og spændingsforhold, der forårsagede svejsedeformationerne.

For at opnå den største retteeffekt er det vigtigt, at der forekommer en hurtig koncentreret opvarmning gennem en passende varmetilførsel og en efterfølgende hurtig nedkøling. Dette giver den største retteeffekt, hvilket kan opnås med bl.a. TIG- eller MIG-svejsning.

1.3.2 MIG OG TIG

MIG-svejsning er den mest effektive metode til varmrretning i aluminium, da processen giver en koncentreret varmepåvirkning dvs. hurtig opvarmning og hurtig nedkøling i et lille område, hvilket resulterer i en forholdsvis stor retteeffekt. Ulempen er, at man i mange tilfælde ikke kan acceptere svejsesømmen, hvilket betyder, at den efterfølgende skal fjernes evt. ved slibning.

TIG-svejsning anvendes ligeledes til varmrretning, selvom der ikke i samme grad er muligheder for at opnå en koncentreret varmepåvirkning som ved MIG-svejsning.

Ved TIG-svejsning anvendes der ofte tilsatsmateriale af hensyn til risikoen for revner, og den resulterende svejsesøm skal ligeledes fjernes, hvor den ikke kan accepteres.

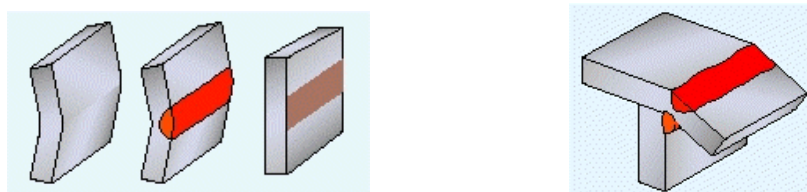
Især varmetilførselsniveau (J/m) ved både TIG- og MIG-svejsning er meget afgørende for retteeffektens størrelse. Hvis varmetilførslen bliver for stor, opvarmes et stort område og den efterfølgende sammentrækning ved afkøling bliver mere ensartet over et større område, hvilket resulterer i en ringe retteeffekt. Hvis varmetilførslen derimod bliver for lille, opnås der ikke tilstrækkelig udvidelse og efterfølgende sammentrækning, og retteeffekten bliver derfor ligeledes lille.

Den optimale varmetilførsel, som resulterer i den maksimale retteeffekt, afhænger meget af:

- **Legering.** De forskellige aluminiumlegeringer har især forskellige varmeledningsevner. For 6000-serien (de ekstruderbare AlMgSi-legeringer) gælder ydermere, at varmeledningen varierer med modningsgraden (leveringstilstanden). [Se også afsnit 2.4.](#)
- **Pladetykkelse**

1.3.2.1 Vinkelknæk

Hvis vinkelknæk skal rettes op, varmepåvirkes der på bagsiden af den oprindelige svejsning enten med en TIG- eller en MIG-brænder, som vist på figur 2. Den overflødig svejsning på bagsiden fra varmretningen kan om nødvendigt efterfølgende fjernes ved slibning. Som nævnt ovenfor er varmetilførslen i den forbindelse meget afgørende for vinkelknækkets størrelse.



Figur 2. Eksempler på varmretning af stump- og kantsømme.

Eksempel:

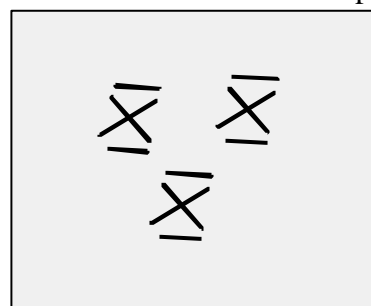
Forsøg på FORCE Institutet i forbindelse med SASAK-projektet har eksempelvis vist, at der ved varmepåvirkning med en TIG-brænder uden tilsat materiale på en 5 mm 5754-plade kunne opnås et maksimalt vinkelknæk på ca. 1,2° ved en varmetilførsel på 0,08 kJ/mm. Den vigtigste parameter for retteeffektens størrelse var niveauet af den resulterende varmetilførsel, hvorimod niveauet af hhv. svejsehastigheden og strømstyrken var mindre afgørende.

1.3.2.2 Buler

Buler kan være uønskelige af kosmetiske grunde, eller uacceptable af strukturelle grunde. Således vil der ofte være kriterier hos skibsklassifikationsselskaberne for maksimale buler på skibskonstruktioner.

Ved opretning af buler kan der ligeledes anvendes både TIG- og MIG-svejsning. Placeringen og størrelsen af passende svejsninger afhænger af en kompleks sammenhæng mellem bulernes størrelse, bulernes placering, pladetykkelse m.m., og det bestemmes som regel på baggrund af tidligere erfaringer med varmretning af den konkrete konstruktion.

Svejsninger på udbulinger kan evt. udføres som mindre krydsende svejsninger i passende omfang, se figur 3. Der svejses i den forbindelse på den side, der buler ud (konvekse side).



Figur 3. Eksempel på placering af MIG-svejsning til opretning af buler

1.3.3 GASBRÆNDER

Ved varmretning af stålkonstruktioner er det i visse tilfælde muligt at anvende gasbrændere til opvarmning med efterfølgende bratkøling med vand. Denne teknik er mindre egnet til aluminiumskonstruktioner, da man med en gasbrænder uundgåeligt vil opvarme et forholds stort område, hvilket pga. den forholdsvis hurtige varmeudbredelse i aluminium hurtigt bliver endnu større. Hvis det opvarmede område bliver for stort, bliver stukningen og den efterfølgende sammentrækning ensartet over et stort område, og retteeffekten bliver lille.

I sjældne tilfælde kan en gasbrænder dog anvendes til opretning af buler, ved at opvarme gennem en plade med et passende antal huller. Med denne teknik opnås en mere koncentreret opvarmning, hvilket resulterer i en større retteeffekt. Der varmes i det tilfælde på den side, der buler ud (konvekse side). Teknikken kræver stor erfaring med den forestående retteopgave.

1.3.4 STYRKETAB

Ved varmretning skal man være opmærksom på at styrkeegenskaberne i det varmepåvirkede område i en vis udstrækning vil være reduceret. Modningshærdbare legeringer (6000- og 7000-serierne) mister styrke, når temperaturen overskrider ca. 250°, mens valselegeringer (ikke-modningshærdbare - 1000, 3000 og 5000-serierne) mister styrke, når temperaturen overskrider ca. 370°. Man bør derfor så vidt muligt begrænse størrelsen af de områder, der opvarmes til mere end disse temperaturer, hvis styrkeegenskaberne i disse områder ønskes bevaret.

Ved gennemvarmning for stukning af områder med buler må man regne med, at styrken i de varmede zoner er faldet til blødgødet tilstand i fuld tykkelse, altså svarende til en svejsning.

Ved linievarmer med MIG eller TIG skal man regne med, at der sker et styrketab i en del af pladetykkelsen. Det kan dreje sig om ca. halv pladetykkelse for legeringer i 5000-serien, hvis retningen vel at mærke bliver udført korrekt. Orienterende forsøg på FORCE på 5 mm plade har vist, at der ved en maksimal retteeffekt opstod en meget lille, smeltet zone i overfladen, mens maksimaltemperaturen på bagsiden nåede i størrelsesorden 150-200°C.

Man *kan* risikere at stå i et dilemma mellem at skulle acceptere enten lokale, delvise styrketab eller deformationer.

1.3.5 ØVRIGE ULEMPER

En anden ulempe ved varmretning især med MIG-svejsning er, at der pålægges svejsmetal, der om uønsket efterfølgende skal fjernes. Hvis svejsningerne fjernes ved slibning vil der stadig være spor og mærker tilbage på konstruktionen fra slibearbejdet.

Endeligt må det generelt siges, at varmretning er en kompliceret affære, der kræver erfaring med den retteopgave, man står overfor.

2 VARMRETNING MED TIG-BRÆNDER - ORIENTERENDE FORSØG

2.1 FORSØG MED LEGERING 5754

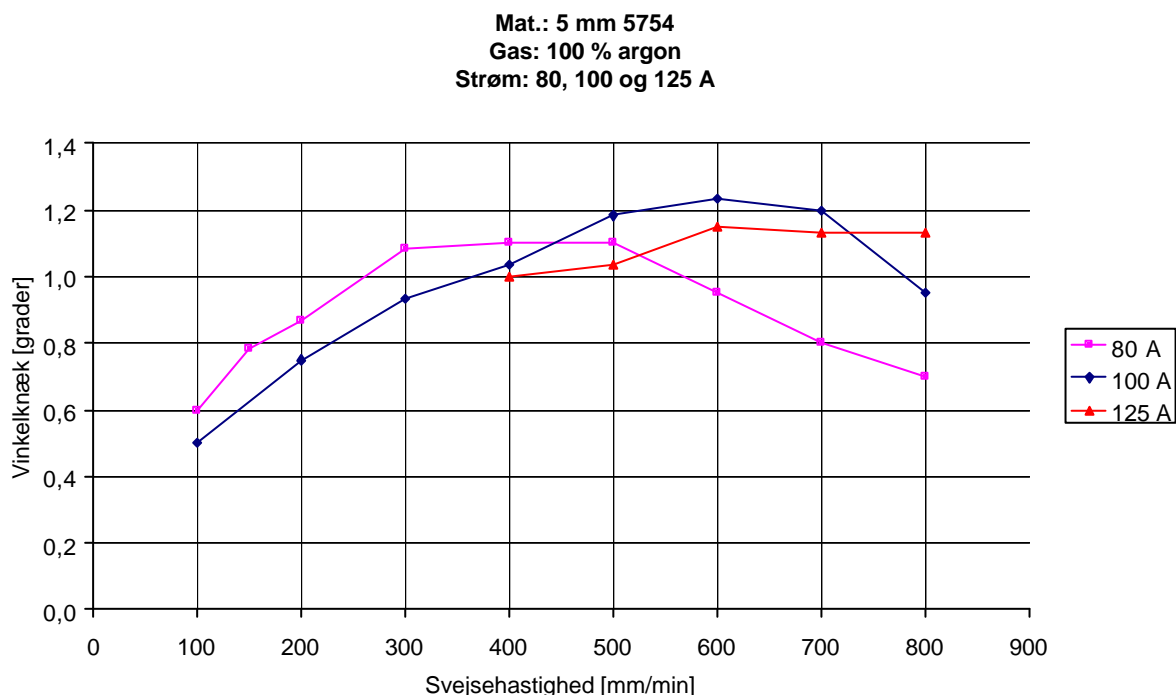
På FORCE Instituttet er der udført orienterende forsøg med varmepåvirkning oven på forsøgsplader med en TIG-brænder. Vinkelknækkene der opstod i forsøgspladerne blev målt med en speciel egnet vinkelmåler.

Forsøgsemnerne var plader i legeringen AlMg3 (5754) med dimensionen 5 X 200 X 500 mm

Forsøgspladerne blev påvirket med strømstyrker på 80, 100 og 125 ampere med fremføringshastigheder varierende mellem 100 og 800 mm/min i pladernes længderetning.

2.2 RESULTATER

På figur 4 er resultatet af vinkelmålingerne fra de indledende forsøg vist som funktion af hastigheden.



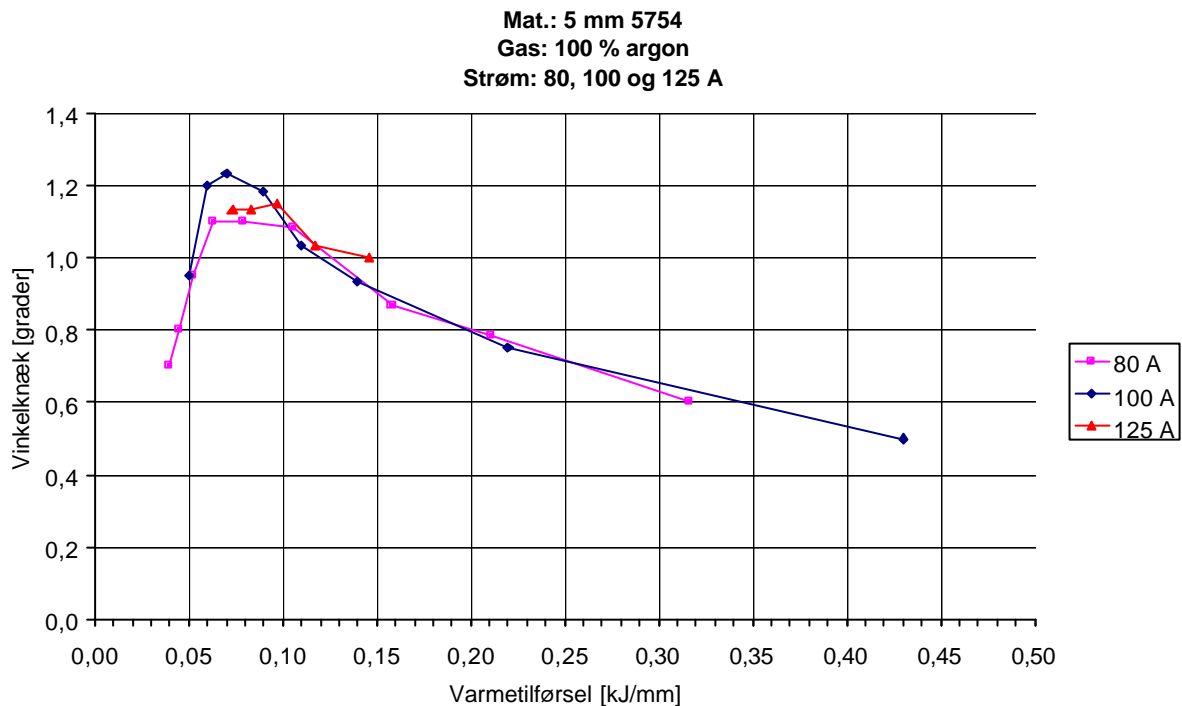
Figur 4. Vinkelknæk i 5 mm AlMg3 efter varmepåvirkning fra TIG-brænder med 80 og 100 A med varierende hastigheder.

Som det ses af figur 4, er der ved påvirkning med 80 ampere et maksimalt vinkelknæk på ca. 1,1 grader ved hastigheder i området 300 til 500 mm/min.

Ved påvirkning med 100 ampere er det største vinkelknæk ca. 1,2 grader med hastigheder i området 500 og 700 mm/min

Ved påvirkning med 125 ampere ligger det største vinkelknæk ligeledes i nærheden af 1,2 grader med hastigheder i området 600 og 800 mm/min

På figur 5 er vinkelknækkene vist som funktion af varmetilførsel.



Figur 5. Vinkelknæk i 5 mm AlMg3 efter varmepåvirkning fra TIG-brænder med 80 og 100 A med varierende varmetilførsel

Af figur 5 ses en klar sammenhæng mellem varmetilførslen og vinkelknækkets størrelse. Tilnærmelsesvis uafhængig af strømstyrken skal varmetilførslen være i området 0,07 til 0,1 kJ/mm, for at der opnås det største vinkelknæk.

I det konkrete tilfælde er det således i højere grad varmetilførslen, der er bestemmende for vinkelknækkets størrelse, hvorimod strømstyrken er mindre afgørende.

2.3 VURDERING

Resultaterne viste, at det især er varmetilførslen, der er bestemmende for hvor stor retteeffekten bliver, og at strømstyrken i den forbindelse er mindre afgørende.

Dette resultat hænger godt sammen med andre erfaringer opnået i forbindelse med arbejdet med svejsedeformationer under projekt varmepåvirkning. Det afgørende for hvor stort et vinkelknæk bliver, er den temperaturforskel som materialet oplever i tykkelsesretning.

Hvis materialet opvarmes for kraftigt, bliver temperaturen mere ensartet i godstykkelsens retning, og den efterfølgende sammentrækning på tværs af pladen blive ligeledes mere ensartet, hvilket giver et lille vinkelknæk.

Hvis varmetilførslen derimod bliver for lille, bliver pladen ikke opvarmet tilstrækkelig, hvilket ligeledes giver et lille vinkelknæk.

Det kan derfor med rimelig sikkerhed konkluderes, at retteeffekten har et maksimum ved et bestemt niveau af varmetilførsel.

Kort sagt handler det om at finde en passende varmetilførsel, så der er en passende temperaturforskel i godstykkelsens retning, hvilket giver en efterfølgende uensartet sammentrækning i godstykkelsens retning, og dermed et større vinkelknæk.

Ifølge denne undersøgelses resultater vil man ved varmepåvirkning med en TIG-brænder på en 5 mm tyk aluminiumsplade i legeringen AlMg3, opnå den største retteeffekt med en varmetilførsel i området 0,07 til 0,1 kJ/mm.

2.4 ORIENTERENDE SAMMENLIGNING MELLEM FORSKELLIGE LEGERINGER

For at opnå en god retteeffekt er det afgørende, at der opnås en *stor termisk gradient* ned gennem pladens tykkelse. Dette hænger som beskrevet ovenfor sammen med svejsedata. Den opnåede termiske gradient hænger imidlertid også sammen med den *termiske ledningsevne*.

Jo højere termisk ledningsevne, desto sværere bliver det at få en mærkbar retteeffekt – pladen bliver for nemt gennemvarm. Omvendt nytter det ikke noget, hvis kun et meget lille område i overfladen bliver varmet op. Der skal være et vist tværsnit, som varmes op.

Den termiske ledningsevne for de mest anvendte valselegeringer i 5000-serien ligger relativt lavt i forhold til renaluminium og legeringerne i 6000-serien. For 6000-serien gælder i øvrigt typisk, at den termiske ledningsevne varierer selv inden for den samme legering, afhængigt af leveringstilstanden. En kvalitet T6 kan således have 25% lavere varmeledningsevne end en blød kvalitet.

Øvrige faktorer: Den termiske udvidelse har også betydning for retteeffekten. Den er til gengæld temmeligt ens for alle legeringerne. Det samme gælder den specifikke varmekapacitet. Styrken for den enkelte legering ved forskellige temperaturer spiller også ind.

Orienterende forsøg er gennemført for at sammenligne retteeffekten for forskellige legeringer med det sæt data, som viste sig optimalt for 5754 i 5 mm tykkelse. Se tabel 1.

Varmretning med TIG - forskellige materialer			
t=5 mm, 100 amp, 600 mm/min			
Materiale	5083	5754	6063 T6
Målt vinkelknæk [grader]	1,40	1,00	0,40
	1,30	1,20	0,50
	1,10	1,10	0,45
	1,40	1,00	0,50
	1,35	1,10	0,45
Gennemsnit	1,3°	1,1°	0,5°
Varmeledningsevne [W/(mxK)]	117	135	200

Tabel 1. Retteeffekt ved varmretning med TIG med data optimeret for legering 5754

På figur 6 er retteeffekten (vinkelknækket) fra tabel 1 sammenstillet med den termiske ledningsevne, idet alle andre parametre er holdt konstant. Det fremgår, at retteeffekten som tidligere nævnt falder, når den termiske ledningsevne stiger.

Figuren skal dog også aflæses med et gran salt: De anvendte data er optimerede for legering 5754. Det er ikke sikkert, at de ligeledes er optimale for legering 6063. Det er muligt, at en anden strøm og fremføringshastighed vil give en (lidt) større retteeffekt.

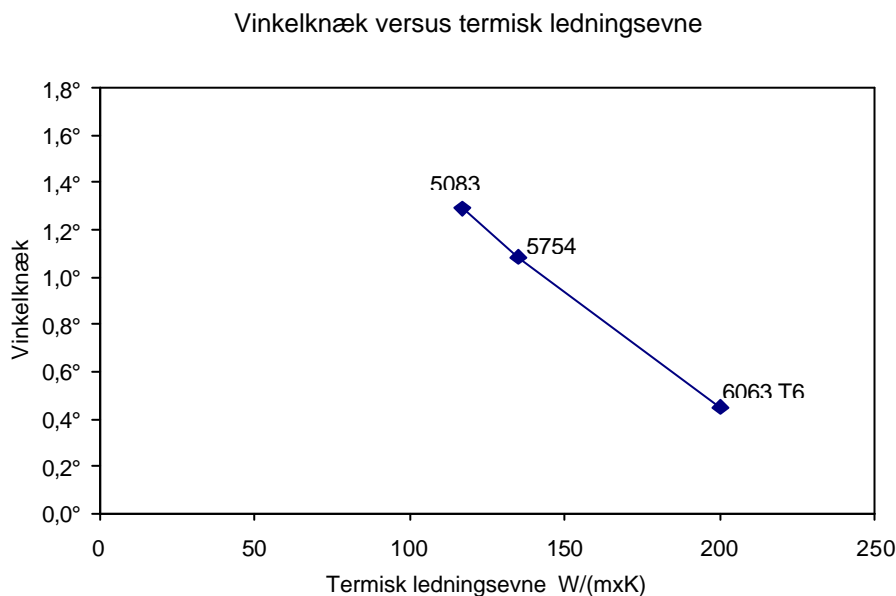


Fig. 6 Sammenstilling af vinkelknæk som funktion af termisk ledningsevne. Pladetykkelse: 5 mm. Strøm: 100 amp. Fremføringshastighed: 600 mm/min.

2.5 OPTIMERING AF DATA – AFSLUTTENDE KOMMENTARER

Det kan være nærliggende at spørge sig, om det analytiske beregningsværktøj for termisk varmeudbredelse beskrevet i rapporterne SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0001 og -0011 kan bruges til at forudsige optimale rettedata. Den umiddelbare konklusion er imidlertid, at begrænsningerne i rammebetingelserne gør dette beregningsværktøj uegnet til formålet.

Til gengæld kunne yderligere eksperimentelt arbejde formentlig give grundlaget for en decideret udvikling af parametriske sammenhænge, som kan bruges til at optimere data ved varmretning af aluminiumslegeringer.