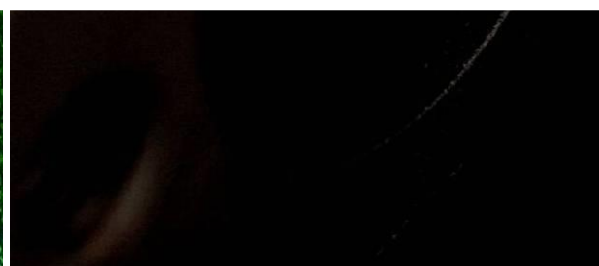




2013-032

Aluminium som konstruktionsmaterial

Sargon Jidah, Johan Haglind



Swerea SWECAST AB
Box 2033, 550 02 Jönköping
Telefon 036 - 30 12 00
Telefax 036 - 16 68 66
swecast@swerea.se
<http://www.swereawecast.se>

Sammanfattning

Bakgrunden till detta projekt är ett behov av samlat underlag som ska underlätta när man vill byta material i komponent. Framför allt konvertering av detaljer till gjuten aluminium från annat material och andra tillverkningsprocesser. Förhoppningen är att konverteringshandboken ska bidra till ökad användning av aluminium inom Svensk industri.

Syftet med denna skrift är tänkt att ge en överblick över områden som är viktiga att tänka på vid val av material, specifikt för gjutna aluminiumdetaljer. Det är viktigt att denna kunskap finns samlad och är lättillgänglig för att underlätta konvertering. Målgruppen för konverteringshandboken är i första hand konstruktörer inom svensk industri, främst fordons- och verkstadsindustri.

Ett mål för detta projekt är att identifiera minst 10 specifika ”kunskapsgap” som är viktiga att ta hänsyn till vid konvertering av en komponent till gjuten aluminium

Användningsområdet för aluminium är mycket stort och fördelarna med materialet är många. För att kunna dra nytta av fördelarna är det viktigt att som konstruktör ha god kännedom om materialets egenskaper, fördelar och begränsningar. Om man som konstruktör väljer gjutning som tillverkningsmetod och aluminium som material så har man stor frihet i utformningen av sin detalj.

Summary

The background for this project is the need for a gathered material that will facilitate the change of material in a component. Especially to convert components from other materials and manufacturing processes to cast aluminium. The expectations is that this handbook will contribute to increased usage of aluminium in Swedish industry.

The purpose of this publication is to present an overview of the areas of importance when it comes to choosing a material, specifically for cast aluminium. It is important that this information is gathered and made easily accesible to facilitate conversion. The target group for this publication are designers within Swedish industry, primarily in the engineering and automotive industry.

A goal for this project is to identify at least 10 areas of knowledge gaps that are of significance when converting a component to cast aluminium.

Aluminium is a versatile material and can be used in many different areas. In order to fully benefit from it as a designer it is important to have knowledge of the materials properties, its advantages and limitations.

Designing a component using cast aluminium gives a great deal of freedom.

Innehållsförteckning

1	TILLKOMST	1
2	INLEDNING.....	1
3	SYFTE OCH MÅL.....	2
4	ALUMINIUM SOM KONSTRUKTIONSMATERIAL	2
4.1	MEKANISKA OCH FYSIKALISKA EGENSKAPER.....	3
4.1.1	<i>Egenskaper aluminium i allmänhet.....</i>	<i>3</i>
4.1.2	<i>Egenskaper gjuten aluminium.....</i>	<i>8</i>
4.2	KONSTRUKTIONSANVISNINGAR	9
4.3	BROTTSEGHET OCH SLAGSEGHET	10
4.4	KVALITETSINDEX	12
4.5	SKRUVFÖRBAND OCH BULTFÖRBAND	15
4.5.1	<i>Klämkraft</i>	<i>15</i>
4.5.2	<i>Smörjmedel</i>	<i>16</i>
4.5.3	<i>Värmeutvidgningskoefficient.....</i>	<i>17</i>
4.5.4	<i>Andra faktorer som påverkar klämkraft.....</i>	<i>17</i>
4.5.5	<i>Åtgärder för att reducera klämkraftförlust</i>	<i>18</i>
4.6	KLÄMFÖRBAND	18
4.7	VÄRMEBEHANDLING	19
4.7.1	<i>Legeringssammansättning</i>	<i>19</i>
4.7.2	<i>Tider och temperaturer</i>	<i>20</i>
4.8	YTBEHANDLING.....	21
4.9	UTNYTTJANDE AV VOLYM	22
4.10	KORROSION	22
4.10.1	<i>Galvanisk korrosion</i>	<i>23</i>
4.10.2	<i>Gropfrätning</i>	<i>23</i>
4.10.3	<i>Spaltkorrosion.....</i>	<i>23</i>
4.11	NITNING.....	23
4.12	UTMATTNING.....	24
5	FORTSATT ARBETE	26
6	REFERENSER	27

1 Tillkomst

Detta projekt, G878M, har sitt ursprung ur Forskningsgrupp Metall där det identifierades ett kunskapsbehov för att underlätta konvertering av en komponent till gjuten aluminium. Som utgångspunkt består komponenten av ett annat material och/eller är tillverkad med en annan metod än gjutning.

Projektets budget är 300 000 SEK och finansieras av Svenska Gjuteriföreningen.

I projektgruppen ingår

Bo Mattson Fundo Components AB

Sargon Jihad Swerea SWECAST AB

2 Inledning

Bakgrunden till detta projekt är ett behov av samlat material som ska underlätta en konvertering av detaljer till gjuten aluminium från annat material och tillverkningsprocess. Förhoppningen är att konverteringshandboken ska bidra till ökad användning av aluminium inom svensk industri. Ökad användning av aluminium underlättar jakten på allt lättare produkter med bibehållen eller ökad styrka.

Mindre ger mer heter det och i detta fall stämmer det väldigt väl. Genom att använda sig av aluminium i större omfattning kan man få produkter med lägre egenvikt. I vissa typer av produkter leder det dessutom till en ökad kapacitet, eg. får en lastbil ökad tjänstevikt eller en robotarm ökad lyftkapacitet.

De finns också stora miljömässiga fördelar med att använda sig av aluminium. Det är en metall som kan återvinnas i princip oändligt antal gånger. Återvinningen kräver endast 5 % av den energi som krävs för att framställa aluminium första gången. Dessutom förbränner lättare fordon mindre bränsle vilket också bidrar till miljövinsten.

3 Syfte och mål

Tanken med detta projekt är att det ska vara en del i ett större projekt. Projektets slutmål är att det ska bidra till ökad användning av gjuten aluminium i Svensk industri.

Syftet med denna skrift är tänkt att ge en överblick över områden som är viktiga att tänka på vid val av material, specifikt för gjutna aluminiumdetaljer. Det är viktigt att denna kunskap finns samlad och är lättillgänglig för att underlätta konvertering. Målgruppen för konverteringshandboken är i första hand konstruktörer inom Svensk industri, främst fordons- och verkstadsindustri.

Ett mål för detta projekt är att identifiera minst 10 specifika ”kunskapsgap” som är viktiga att ta hänsyn till vid konvertering av en komponent till gjuten aluminium.

4 Aluminium som konstruktionsmaterial

Användningsområdet för aluminium är mycket stort och fördelarna med materialet är många. För att kunna dra nytta av fördelarna är det viktigt att som konstruktör ha god kännedom om materialets egenskaper, fördelar och begränsningar. Om man som konstruktör väljer gjutning som tillverkningsmetod och aluminium som material så har man stor frihet i utformningen av sin detalj.

Materialet har många goda egenskaper, förutom sin låga densitet och goda korrosionsbeständighet har vissa legeringar mycket hög hållfasthet. Materialet är lätt att bearbeta och kan med fördel sammanfogas med andra material genom att svetsas, lödas, limmas, nitas eller skruvas samman.

Om man ska tillverka ett fåtal artiklar kan man gjuta i sandform och om serierna är stora kan pressgjutning eller kokillgjutning med fördel användas. Vid pressgjutning kan detaljen konstrueras så att minimalt med efterbearbetning krävs.

Till skillnad från t.ex. svetsade plåt detaljer som måste klippas, stansas och svetsas så får man en färdig produkt direkt.

Aluminium är också mycket lätt att återvinna.

I följande delkapitel ges en överblick över områden att tänka på vid val av material.

4.1 Mekaniska och fysikaliska egenskaper

Att ange mekaniska materialegenskaper hos aluminium är komplicerat. Egenskaperna varierar mycket beroende på vilken legering det är man talar om och vilken typ av värmebehandling materialet har genomgått. Dessutom kan egenskaperna i en och samma komponent variera beroende på var man tagit provet.

4.1.1 Egenskaper aluminium i allmänhet

Vissa egenskaper hos aluminium och stål förändras inte avsevärt vid bearbetning och vid variationer av legeringsämnen. Densiteten för stål är ca 7,8 kg/dm³ och för aluminium är den 2,7 kg/dm³. E-modulen är för stål 210 GPa och för aluminium 70 GPa.

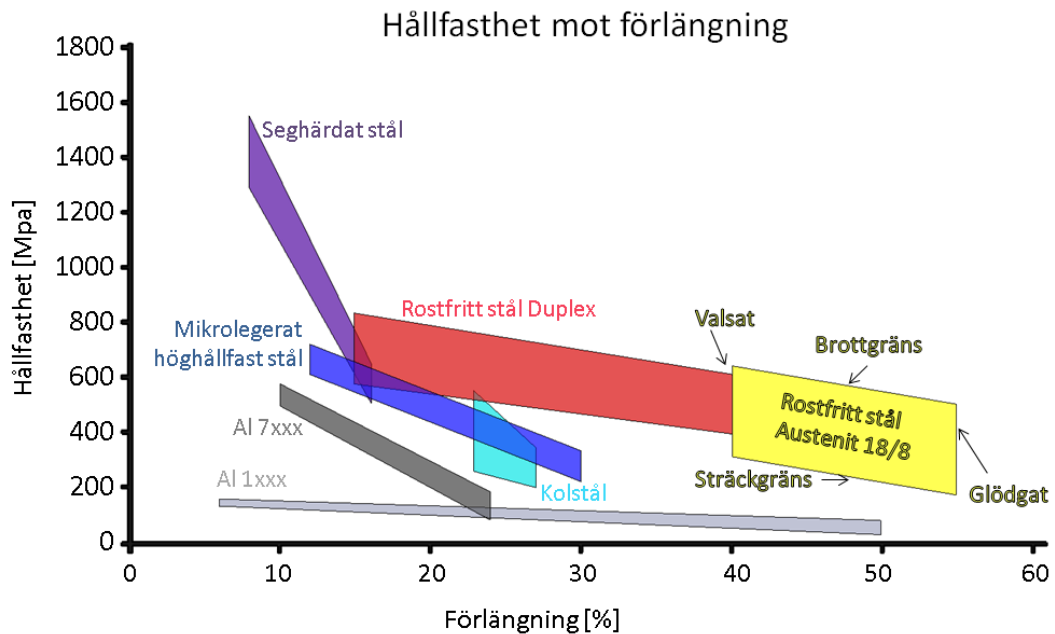
Andra egenskaper som är viktiga att ta hänsyn till vid val av material är exempelvis korrosionsegenskaper, svetsbarhet, bearbetningsbarhet, formbarhet, värmeledningsförmåga och förmågan att leda elektricitet. Nedan visas en översiktstabell, Tabell 1, som jämför aluminium med andra material. Exempelvis så har aluminium dubbelt så stor längdutvidgningskoefficient som järn. Av de angivna metallerna har aluminium med god marginal lägst densitet.

Tabell 1. Jämförelsetabell över de vanligaste bruksmetallerna och konstruktionsplasterna, värdena gäller rena metaller [1].

	Al	Fe	Cu	Zn	Nylon	Delrin
Densitet, g/cm ³	2.7	7.9	8.9	7.1	1.1	1.4
Smältpunkt, °C	658	1540	1083	419	255	175
Värmekapacitet J/kg, °C	900	450	390	390	1680	1470
Värmekonduktivitet, W/m, °C	230	75	390	110	0.23	0.23
Längdutr.koeff., x 10 ⁻⁶ /°C	24	12	16	26	70-100	80-90
El. konduktivitet, % I.A.C.S *	60	16	100	30	-	-
El. resistivitet, x 10 ⁻⁹ Ωm	29	105	17	58	-	-
Elasticitetsmodul, GPa	70	220	120	93	3	3

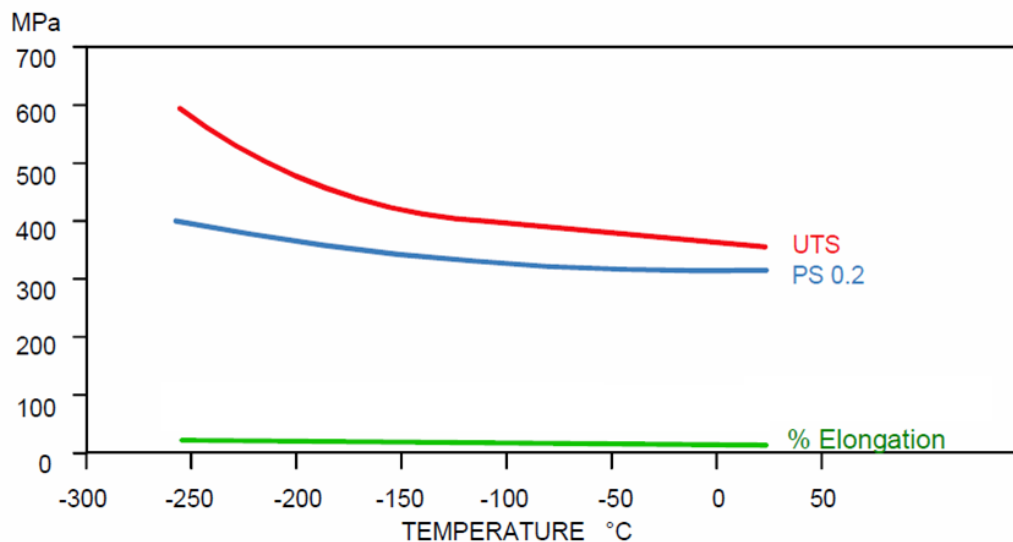
Det som man först tänker på när man vill använda aluminium i en konstruktion är just den låga vikten jämfört med järn och stål. Samtliga aluminiumlegeringar har en densitet som är ungefär en tredjedel av stålets och är därför lämpligt där en låg vikt är ett krav. Vid val av material är det fler egenskaper som är viktiga för att uppfylla de krav som finns på den slutgiltiga konstruktionen. Två av de viktigaste egenskaperna hos materialet är sträckgränsen och duktiliteten. Duktiliteten anger hur mycket materialet kan deformeras innan det går till brott. Dessa två egenskaper är omvänt proportionella mot varandra vilket innebär att ju högre hållfasthet materialet man väljer har, desto lägre duktilitet har det.

Trots den låga vikten hos aluminium finns det legeringar som har en sträckgräns strax över 500 MPa, Figur 1 från [2]. Den undre linjen av de färgade rutorna visar sträckgränsen och den övre linjen visar brottgränsen. Variationer i hållfasthet hos de olika materialen beror på olika värmebehandlingar och bearbetning. Materialen får högre hållfasthet, men samtidigt lägre brottförlängning.



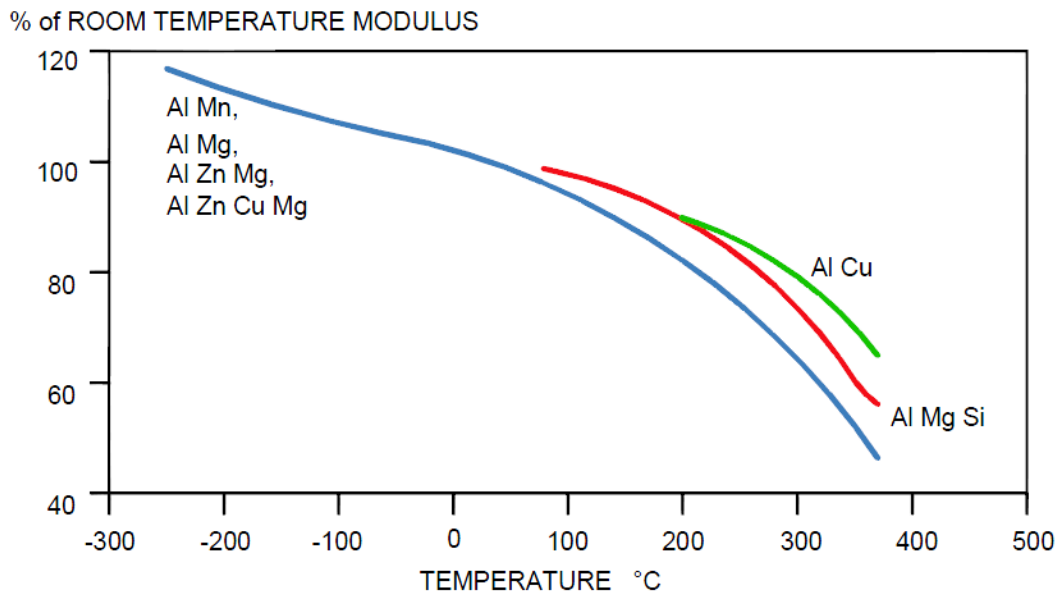
Figur 1. Hållfasthet och förlängning hos aluminium och stål, [2].

Vid låga temperaturer behåller aluminium sin brottförlängning till skillnad från låglegerat stål som blir sprött vid låga temperaturer. Draghållfastheten ökar t.o.m. vid sjunkande temperatur. Ökningen är försumbar ner till -50°C , det är först vid temperaturer lägre än -100°C som ändringen är märkbar, se Figur 2 tagen från [3].



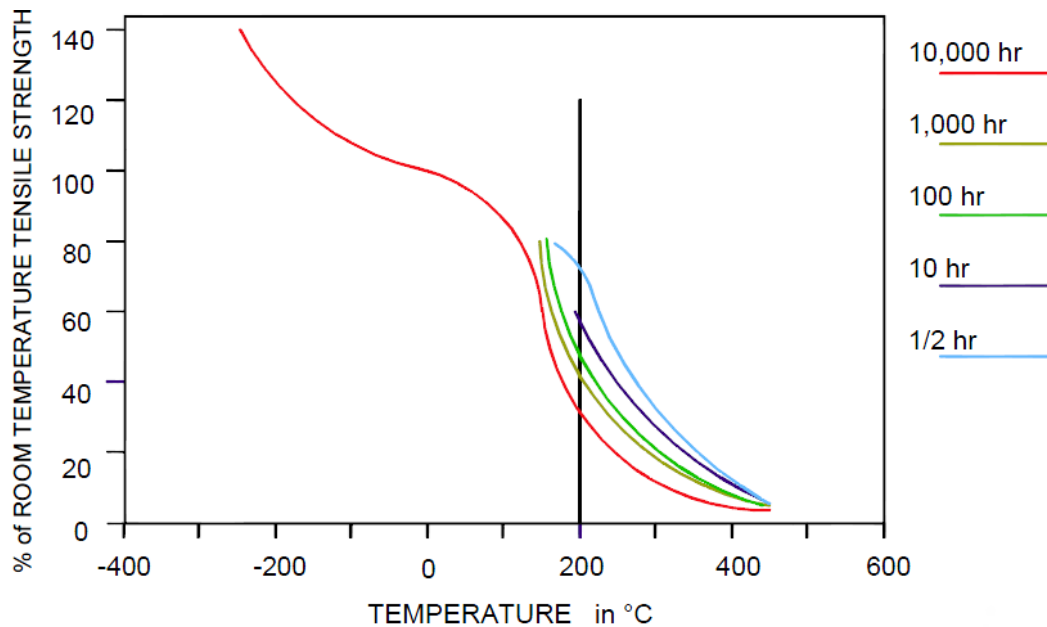
Figur 2. Egenskaper vid lägre temperaturer hos aluminium (värmebehandlad 6061), [3].

Även E-modulen ökar med sjunkande temperatur enligt Figur 3. Grafen visar hur E-modulen varierar med varierande temperaturer. Y-axeln anger i procent E-modulen vid aktuell temperatur i förhållande till E-modulen i rumstemperatur.



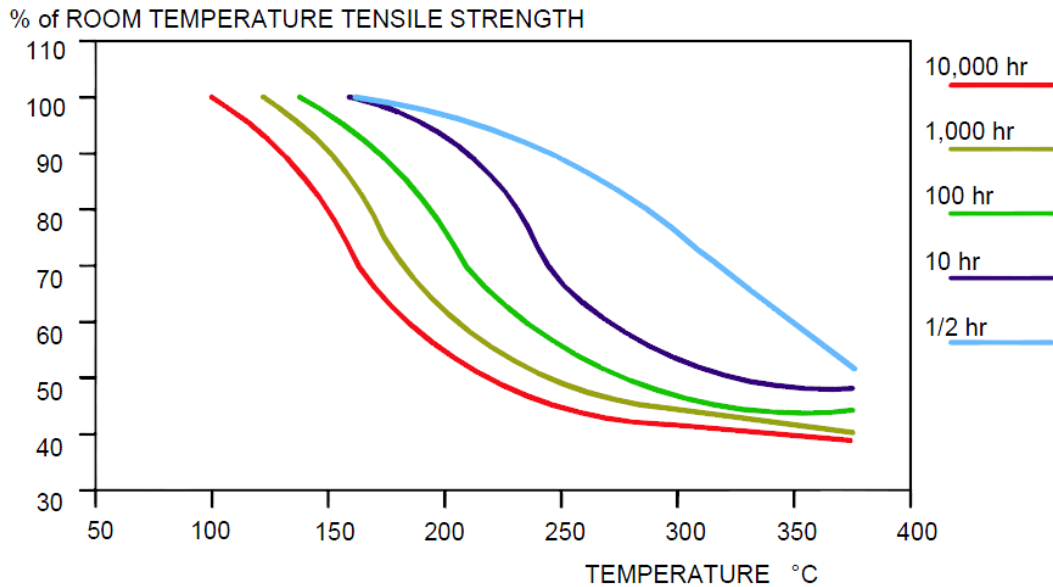
Figur 3. E-modul som funktion av temperatur, [3].

Vid höga temperaturer så sjunker dock aluminiums E-modul och hållfasthet. Figur 4 visar hur draghållfastheten hos T6-behandlad aluminium varierar med varierande temperaturer och exponering. Exempelvis så visar den röda kurvan hur stor draghållfastheten är vid varje temperatur efter 10000 timmars exponering. Y-axeln visar aktuell draghållfasthet i förhållande till draghållfastheten i rumstemperatur. Draghållfastheten är framtagen vid respektive temperatur.



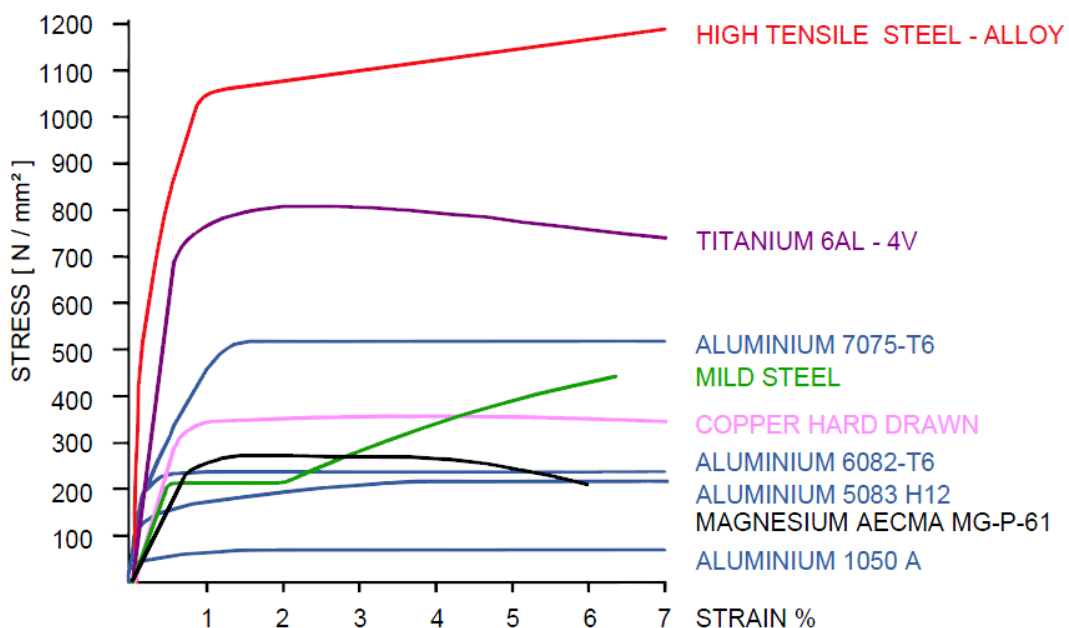
Figur 4. Draghållfasthet provad vid respektive temperatur (T6-behandlad 2014), [3].

I Figur 5 visas kurvor för draghållfasthet som tagits fram i rumstemperatur efter att materialet varit exponerat för hög temperatur. Graferna visar att vissa aluminiumlegeringar tappar stor del av sin hållfasthet med ökande temperaturer.

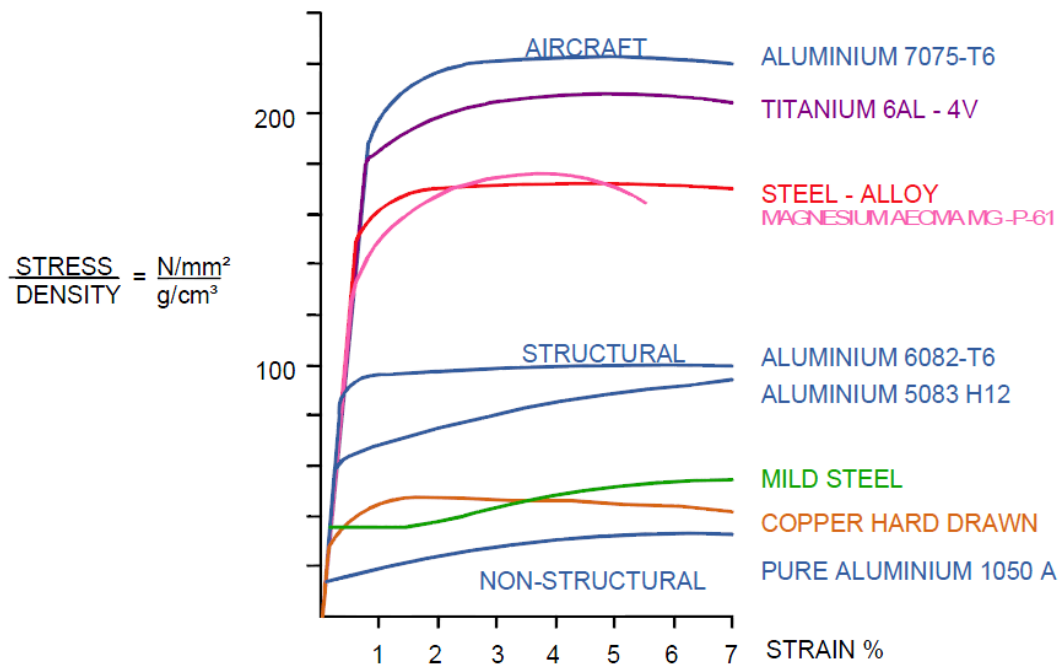


Figur 5. Draghållfasthet provad vid rumstemperatur efter exponering (T6-behandlad 2014), [3].

Vid en jämförelse med andra metaller så måste man alltid ta hänsyn till aluminiums densitet för att det ska bli en rättvis sådan. Om man först jämför faktiska värden på hållfastheten så framstår aluminium som ett relativt svagt material. Om man däremot beaktar densiteten som en faktor så ser förhållandet till övriga material helt annorlunda ut. Detta innebär att om man använder aluminium, kan man i vissa fall ha grövre geometrier men ändå lättare och starkare konstruktioner.



Figur 6. Spänning-töjningsdiagram. Jämförelse aluminium(7075-T6, 6082-T6, 5083-H12 och 1050-A) med andra material, [3].



Figur 7. Spänning/densitet-töjningsdiagram. Jämförelse av aluminium med andra material, (7075-T6, 6082-T6, 5083-H12 och 1050-A) [3].

4.1.2 Egenskaper gjuten aluminium

Förutom legeringssammansättning och värmebehandling så påverkar även valet av gjutmetod de mekaniska egenskaperna i en komponent. Olika gjutmetoder ger olika stelningshastigheter och gjutdefekter, båda dessa faktorer är direkt kopplade till hållfastheten i slutlig komponent. I Figur 8 visas fysiska data och mekaniska egenskaper hos vanliga aluminiumlegeringar som används vid gjutning.

	Aluminium casting alloys												Cast iron	
	AlSi12			AlSi10Mg			AlSi7Mg		AlSi9Cu3		Magnesium	Zinc		Cast iron
	PDC	G / LP	S / SM	As cast	G / LP	S / SM	As cast	Heattr. T6	G / LP	S / SM				
Yield strength	140 -180	80-110	70-100	140 -200	90-120	210-280	80-110	180-260	200-280	190-240	140-240	150-170	230	-
Tensile strength	220 -280	170 -230	150 -200	230 -300	180 -240	240-320	160 -210	220-320	150-340	230-310	240-310	200-250	335	200 -290
Break elongation	1-3	6-12	5-10	1-3	2-6	1-4	2-6	1-4	5-9	2-5	0.5-3	0.5-3	9	0.7
Hardness	60-100	50-65	45-60	70-100	60-80	85-115	50-60	80-110	80-110	75-110	80-120	65-85	85-92	140 -200
Bending fatigue strength	60-90	70-90	50-70	60-90	70-90	80-110	50-70	70-100	80-110	70-100	70-100	50-70	57	100 -110
Modulus of elasticity		75			74				73		75	40-45	127	90-115
Density		2.65			2.65				2.65		2.75	1.8	6.7	7.2
Thermal coeff. of exp.		21			22				22		21	27	27	10-11
Thermal conductivity	120	130-190		120 -150		130-190			160-170		110-130	50-84	110	45-55
Specific heat		900-960			910-960				900-960		880-960	1005-1050	420	450 -550
Electrical conductivity	16-20	17-26		16-20		17-26			22-24		14-17	6-10	15	1-2

Figur 8. Översiktsbild för gjutna aluminiumlegeringar. PDC=Pressure Die Casting, LP=Low Pressure Die Casting, G=Gravity Casting, S=Sand Casting, SM=Shell Mould Casting, [4].

Nedan ges exempel på materialegenskaper hos provstavar tagna från gjutna komponenter tillverkade med sandgjutning, gipsgjutning och pressgjutning, [4].

- De pressgjutna ämnena är gjutna i $AlSi_9Cu_3(Fe)$.
- De sandgjutna ämnena är gjutna i $AlSi_{10}Mg$.
- De gipsgjutna ämnena är gjutna i $AlSi_7Mg_{0,3}$.

Tabell 2. Resultat av mekanisk provning av provstavar, [5].

	R_m (MPa)	R_{p0,2} (MPa)	A (%)	HBW (5/250)
Pressgjutn. (Ø 5 mm)	204	130	0,8	101
Sandgjutn. (Ø 7 mm)	143	94	2,0	60
Gipsgjutn. (Ø 7 mm)	127	76	1,7	53

Efter varmåldring i 190°C under 8 timmar av de sandgjutna komponenterna fås följande värden, [5].

Tabell 3. Hållfasthetsvärden efter varmåldring av provstavar tagna ur sandgjutna komponenter, [5].

	R_m MPa)	R_{p0,2} (MPa)	A (%)	HBW (5/250)
190°C/8 tim	161	132	0,9	68

Om man T6-behandlar provstavarna ökar hållfastheten ytterligare, [5]. T6-behandling innebär 520°C under 6 timmar, släckning i vatten och sedan 165°C under 8 timmar.

Tabell 4. Hållfasthetsvärden på T6-behandlade provstavar tagna ur sandgjutna komponenter, [5].

	R_m (MPa)	R_{p0,2} (MPa)	A (%)	HBW (5/250)
T6	271	261	<1	109

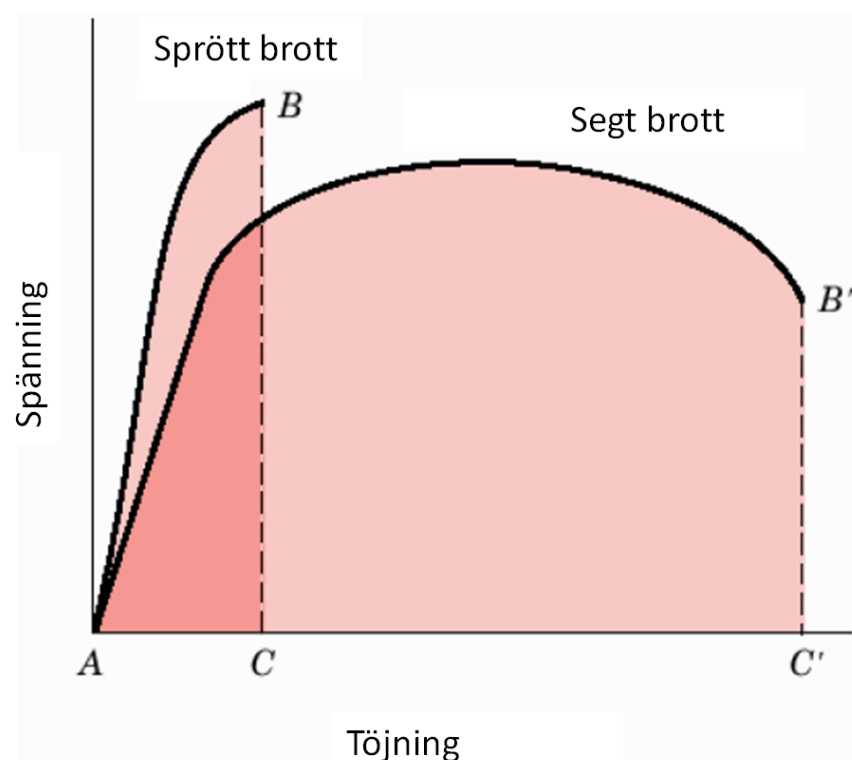
4.2 Konstruktionsanvisningar

Mycket arbete har gjorts inom området för konstruktion av gjutna detaljer. Det är mycket man bör tänka på som konstruktör förutom hållfastheten av komponenten. Gjutning är en komplex process där man måste ta hänsyn till tillverkningsprocessen väldigt tidigt. Beroende av hur man utformar detaljen och även ingjutsystemet kan man få olika god kvalitet på slutprodukten. Defekter som t.ex. porositet, formändring, restspänningar måste beaktas.

Mer finns att läsa i ämnet i ”Guidelines” för utformning av gjutna komponenter, [6], och *Ingjutsteknik, En litteratur- och videostudie*, [7].

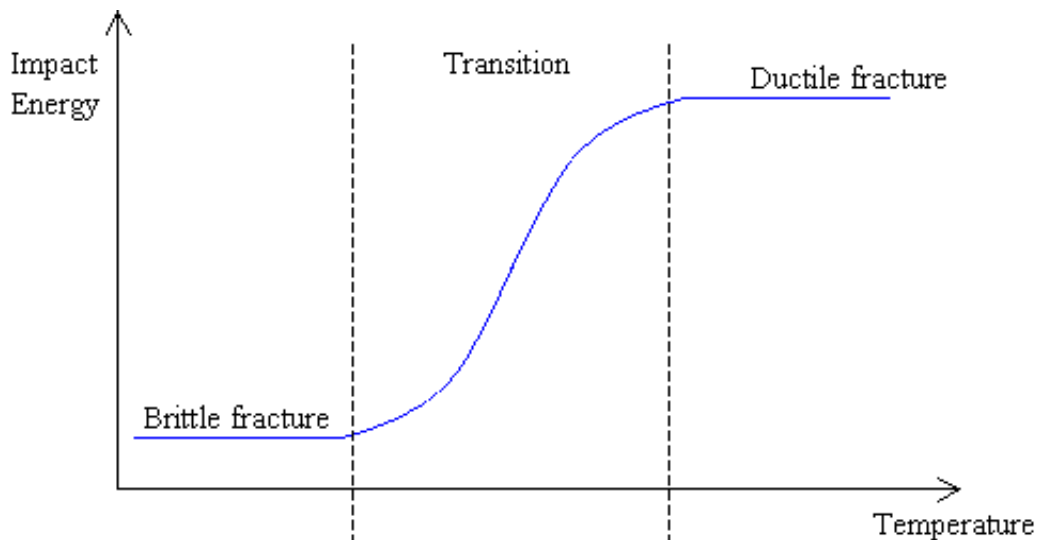
4.3 Brottseghet och slagseghet

Brottseghet är materialets förmåga att ta upp energi vid statisk belastning. Slagseghet är materialets förmåga att ta upp energi vid dynamisk belastning. I ett spänning-töjningsdiagram representeras slagsegheten av arean under kurvan. I ett sådant diagram ser man också om brottet är sprött eller segt. För att åstadkomma ett sprött brott krävs energi för att separera atomer och blottlägga nya ytor, sega brott kräver förutom det energi för att plasticera materialet. Därför kan man säga att sega brott generellt kan ta upp mer energi, [8].



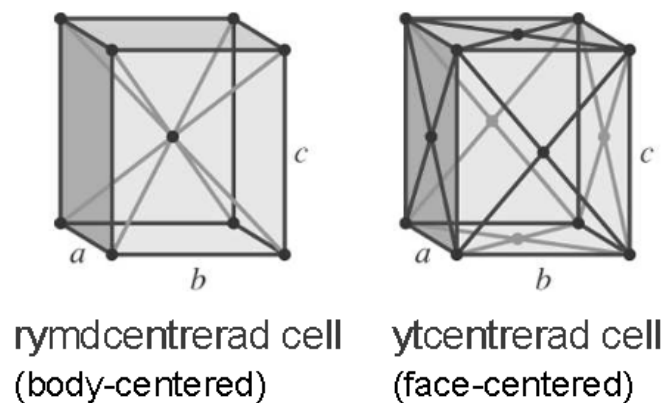
Figur 9. Jämförelse mellan spröda och sega brott, [8].

Brott- och slagsegheten varierar med temperaturen hos de flesta material. I Figur 10 visas en principskiss för stål där slagsegheten ökar med temperaturen. Den temperatur där den stora ändringen av slagsegheten ändras kallas för omslagstemperatur, [9].



Figur 10. Slagseghet som funktion av temperatur, [9].

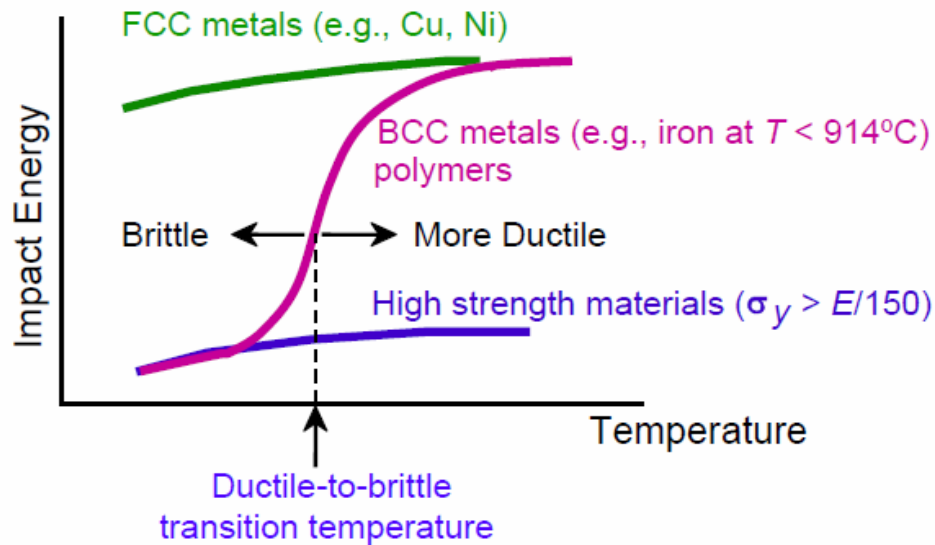
Beroende på kristallstrukturen så ser sambandet mellan temperatur och slagseghet olika ut. Hos stål kallas en cell i strukturen rymdcentrerad cell, vilket innebär att cellen har en punkt i varje hörn och en i mitten av kuben, (BCC=Body Centered Cell). Aluminium består av ytcentrerade celler, vilket innebär en punkt i varje hörn och en i centrum på varje kubsida, (FCC=Face Centered Cell), Figur 11, [10].



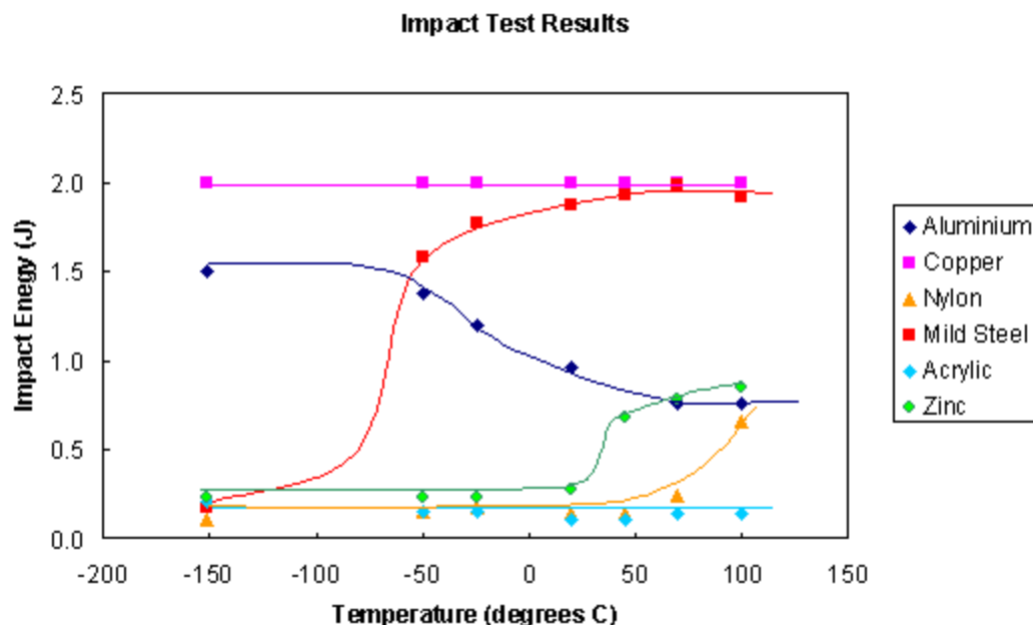
Figur 11. Exempel på olika cellstrukturer, [10].

I Figur 12 och Figur 13 visas kurvor på hur slagsegheten kan variera med temperaturen hos olika material. I första bilden ser man skillnaden mellan metaller med FCC-struktur som t.ex. aluminium uppträder och strukturer med BCC-struktur. Stål och järn blir sprödare med lägre temperaturer medan aluminium inte blir avsevärt sprödare.

I Figur 13 visas resultat från experiment i University of Cambridge där man jämför 6 olika material vid 7 olika temperaturer. I det fallet har man provat ren aluminium. Där ökar till och med slagsegheten hos aluminium med sjunkande temperatur. Medan det för stål sjunker drastiskt mellan -50°C till -80°C .



Figur 12. Slagseghet som funktion av temperaturen, [8].



Figur 13. Slagseghet hos olika material som funktion av temperaturen, [9].

4.4 Kvalitetsindex

När man pratar om kvalitet hos gjutgods talar man ofta i termer som porositet, inneslutningar och andra defekter. Som konstruktör är man mer intresserad av de mekaniska egenskaperna hos gjutgodset. När man väljer ett material med hög hållfasthet betyder det generellt att man får ett material med lägre duktilitet och vice versa. Genom att använda sig av ett kvalitetsindex utvärderas materialet utifrån flytgräns, duktilitet och slagseghet, [11]. Begreppet är mer förklarat i [12] och [13].

I 'Quality index chart for different alloys and temperatures: a case study of aluminium die-casting alloys' [14], har man gjort försök att ta fram ett diagram för kvalitetsindex. Dragprov har gjorts på 16 olika gjutlegeringar i rumstemperatur

(RT), 100°C och 200°C. Tabell 5 visar kemisk sammansättning på de legeringar som provats.

Tabell 5. Kemisk sammansättning på de legeringar som använts i studien, [14].

Chemical compositions of the alloys used in this study [16]

Alloy No.	Composition (wt%)									
	Si	Mg	Fe	Cu	Ni	Cr	Mn	Ti	Zn	Sr
1	7.15	0.03	0.68	1.24	0.01	0.01	0.01	0.01	0.44	0.000
2	6.99	0.01	0.56	1.15	0.01	0.01	0.47	0.24	2.87	0.000
3	6.98	0.04	1.49	4.99	0.44	0.13	0.01	0.01	0.47	0.018
4	6.94	0.04	1.48	4.74	0.47	0.15	0.45	0.16	2.69	0.000
5	7.05	0.44	0.67	1.18	0.53	0.14	0.01	0.01	2.76	0.000
6	6.98	0.44	0.57	1.13	0.48	0.13	0.45	0.18	0.38	0.002
7	6.92	0.50	1.63	4.94	0.03	0.01	0.02	0.01	2.73	0.022
8	6.79	0.46	1.49	4.77	0.01	0.01	0.45	0.20	0.42	0.000
9	12.71	0.05	0.63	4.96	0.06	0.14	0.01	0.20	0.50	0.017
10	12.69	0.03	0.73	5.09	0.07	0.11	0.37	0.01	2.73	0.000
11	12.86	0.04	1.59	1.21	0.45	0.01	0.01	0.18	0.49	0.000
12	12.95	0.05	1.55	1.29	0.46	0.01	0.43	0.01	2.91	0.023
13	13.03	0.46	0.58	4.70	0.44	0.01	0.01	0.17	2.61	0.021
14	12.94	0.48	0.74	3.94	0.50	0.01	0.57	0.01	0.55	0.000
15	12.78	0.47	1.51	1.27	0.06	0.14	0.01	0.18	2.94	0.000
16	12.86	0.41	1.63	1.21	0.06	0.14	0.44	0.01	0.46	0.024

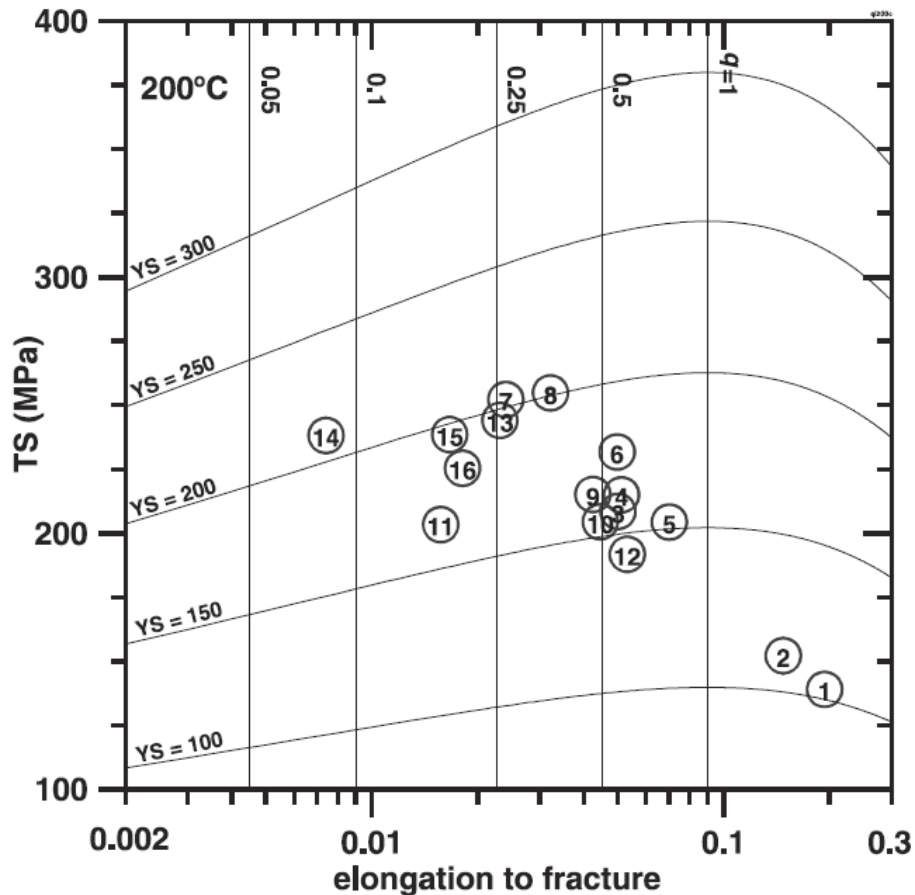
I Tabell 6 visas uppmätta värden på YS (flytgräns), TS (draghållfasthet), och s_f (brottförlängning). K (hållfasthetskoefficient) och Q (kvalitetsindex) är framräknade enligt [14].

Tabell 6. Uppmätta värden på YS (flytgräns), TS (draghållfasthet), s_f (brottförlängning), K (hållfasthetskoefficient) och Q (kvalitetsindex), [14].

Average YS, TS and tensile ductility, and calculated K and Q-values of the alloys at the studied temperatures^a

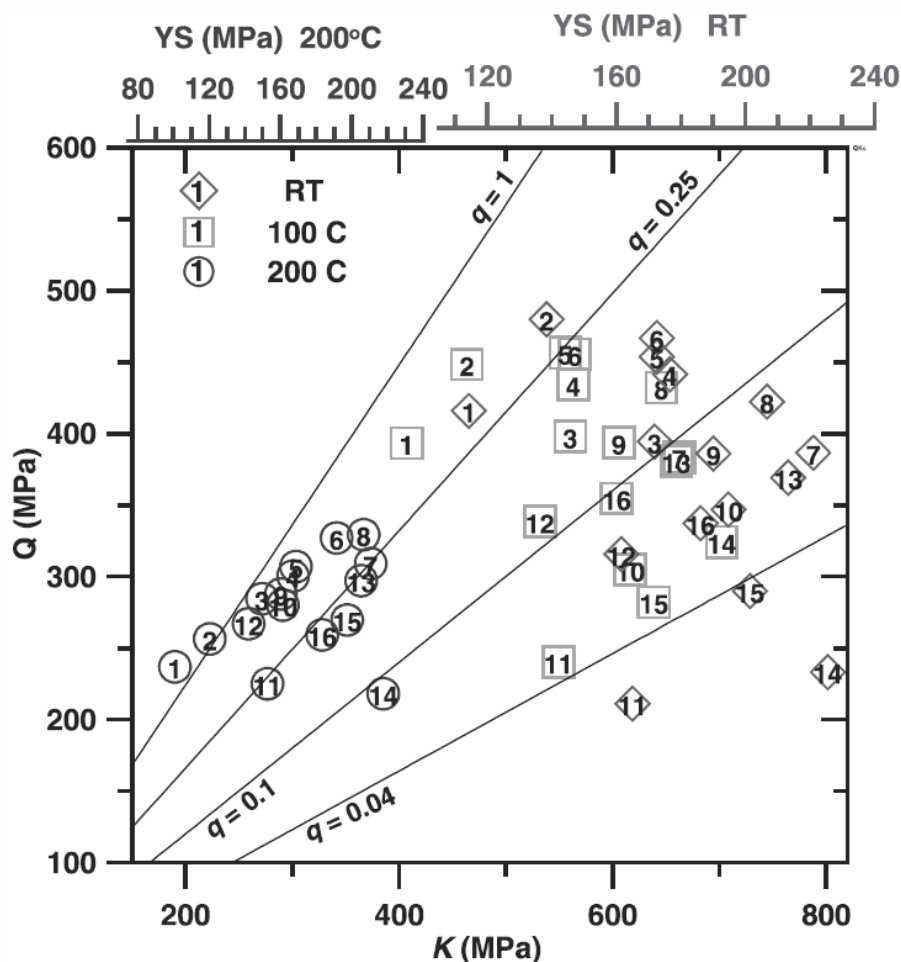
Alloy No.	RT					100°C					200°C				
	YS (MPa)	TS (MPa)	s_f (%)	K (MPa)	Q (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)	s_f (%)	K (MPa)	Q (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)	s_f (%)	K (MPa)	Q (MPa)
1	114.9	273.0	5.9	465.3	416.4	115.8	227.0	10.5	407.1	393.3	100.0	139.0	19.3	190.1	236.7
2	137.9	292.3	7.4	538.3	479.5	135.7	251.4	11.5	463.6	448.1	119.1	152.2	14.8	222.7	256.5
3	171.0	313.0	2.1	639.4	395.4	171.0	293.4	2.9	560.3	397.1	148.2	208.5	5.0	271.7	284.5
4	175.8	324.1	2.8	653.8	441.0	171.9	295.9	4.0	563.0	431.4	165.6	214.9	5.1	300.7	300.0
5	171.7	306.1	3.8	641.4	454.9	169.2	277.4	6.8	555.6	462.4	167.3	204.4	7.0	303.4	307.0
6	171.7	318.5	3.8	641.4	467.3	172.5	292.0	5.3	564.6	455.5	190.5	231.7	5.0	341.5	327.2
7	222.1	338.5	1.4	787.9	384.6	209.6	311.7	1.9	662.3	385.5	210.1	252.2	2.4	373.4	309.0
8	206.8	337.2	1.9	744.6	420.2	203.2	322.4	2.7	645.5	433.8	206.1	254.8	3.2	366.8	328.9
9	189.6	322.7	1.7	694.5	386.7	188.0	303.4	2.5	605.7	399.8	158.7	215.1	4.2	289.3	287.2
10	194.4	305.4	1.4	708.6	346.8	192.1	270.5	1.4	616.6	306.5	159.8	204.4	4.5	291.1	280.4
11	164.1	242.0	0.8	618.7	218.0	166.8	240.4	1.0	549.2	240.4	151.2	203.4	1.6	276.7	226.0
12	160.6	278.5	1.4	608.2	315.5	160.5	264.1	2.2	532.0	337.0	140.6	191.8	5.3	259.1	266.8
13	213.7	325.4	1.4	764.3	369.1	208.7	308.9	1.9	659.8	382.5	204.7	244.1	2.3	364.5	296.9
14	226.8	288.9	0.7	801.6	233.1	225.1	303.1	1.2	702.2	325.3	217.4	238.2	0.7	385.2	214.3
15	201.3	293.7	1.0	728.6	289.8	200.5	271.8	1.1	638.6	282.4	196.6	238.5	1.7	351.4	270.9
16	185.5	296.4	1.4	682.3	336.3	187.3	286.4	1.9	603.9	353.7	182.2	225.4	1.8	327.9	258.9

För att få en bättre överblick skapas tre diagram av tabellen, ett för varje temperatur, i Figur 14 visas diagrammet för mätdata gjorda i 200°C.



Figur 14. Mätdata från 200°C. Varje punkt representerar en legering. Positionen på punkten ger flytgräns, brottgräns och brottförlängning, [14].

Slutligen sammanställs de tre diagrammen i ett kvalitetsindex-flytgränsdiagram. Diagrammet visar kvalitetsindex Q, K-värde och flytgräns för de 16 legeringarna vid rumstemperatur (RT), 100°C och 200°C. Diagrammet ger en god överblick över temperaturens inverkan på de olika legeringarnas kvalitetsindex och flytgräns. Koefficienten q (relativ duktilitetsparameter) anger hur stor töjningen är när ett prov kommer till brott. Ett värde på $q=1$ betyder att midjebildning har inletts. Ett värde på 0,3 innebär att då provet går till brott har 30 % av töjningen som krävs för att midjebildning uppnåtts, [15].



Figur 15. Kvalitetsindex-diagram för 16 olika gjutlegeringar vid 3 olika temperaturer, [14].

4.5 Skruvförband och bultförband

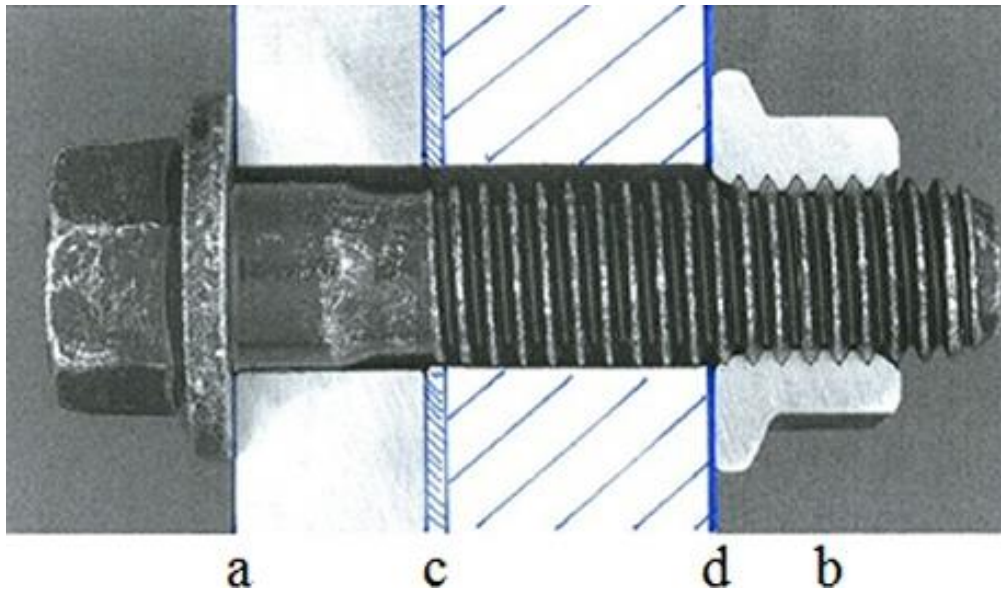
Olika typer av förband är ett vanligt inslag i olika konstruktioner. Skruv- och bultförband har enligt [1] högre draghållfasthet och bättre utmattningssegenskaper än svetsade, nitade och ledade förband. De är i många fall helt nödvändiga men kan samtidigt utgöra en svag länk i konstruktionen vid otillräcklig klämkraft. De har också fördelen att de ofta är lättare att montera ute i fält än t.ex. svetsade konstruktioner. Nackdelen är att man måste ta hål i konstruktionen och därmed reducera den lastbärande arean. Dessutom så ökar spänningskoncentrationer runt hål. Det är därför av stor vikt att ha bra kunskap om förband och dimensionera rätt.

4.5.1 Klämkraft

I princip alla klämförband förlorar en del eller ibland hela sin klämkraft över tiden vilket är mycket viktigt att ta hänsyn till vid dimensionering av förband. Denna förlust kallas sättning och sker till följd av materialens tid- och temperaturberoende egenskaper, t.ex. kryp och relaxation i materialet, [16]. Klämkraftförlusten delas in i två olika begrepp, statisk och dynamisk sättning. Den förstnämnda sker under och strax efter montering medan den sistnämnda uppkommer då yttre last belastar förbandet. Sättning uppstår då man pressar

samma två ytor. P.g.a. ytojämnheter sker kontakten först i enstaka punkter, kontakttrycket blir då så stort att materialet plasticeras lokalt. Kontaktytan ökar och nya punkter kommer i kontakt, detta upprepas tills ytan blir så stor att den kan bära klämkraften och sättningen avstannar. Eftersom aluminium är mjukare än stål är också sättningen större i aluminium.

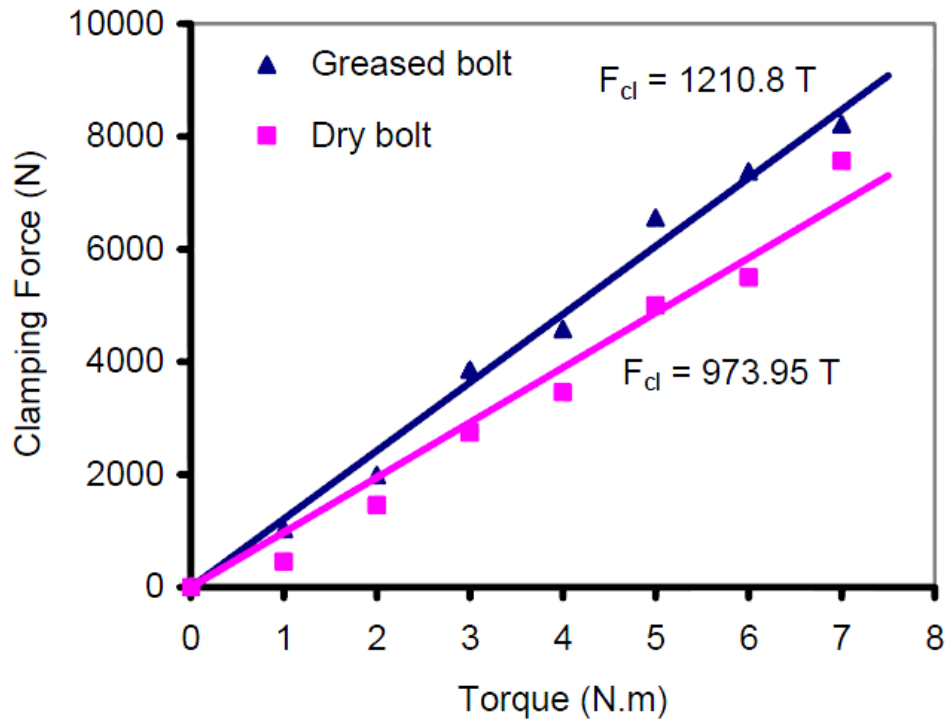
Sättningen kan uppstå på olika ställen i ett förband, Figur 16 (a: kontaktytan, b: gängorna, c: packningen, d: färgskiktet), [17].



Figur 16. Exempel på sättningar i förband, [17].

4.5.2 Smörjmedel

En faktor som inverkar på den initiala klämkraften är om gängorna är torra eller har smörjmedel. En studie visar att klämkraften vid samma åtdragningsmoment blir betydligt högre om gängorna på bulten har smörjmedel, [1]. I Figur 17 visas klämkraften som funktion av åtdragningsmomentet. Blå linje visar insmord bult medan rosa linje visar torr bult. Det framgår tydligt att klämkraften blir högre om smörjmedel används vid bultförband.



Figur 17. Klämkraft som funktion av åtdragningsmoment, [19].

4.5.3 Värmeutvidgningskoefficient

Ytterligare en faktor som är viktig vid dimensionering av bultförband är värmeutvidgningskoefficienten, speciellt då aluminium är en del av förbandet. Exempelvis så har aluminium en värmeutvidgningskoefficient som är ungefär dubbelt så stor som stål, vilket innebär att det utvidgar sig dubbelt så mycket vid temperaturökning. Givetvis betyder det att det också krymper dubbelt så mycket vid sänkning av temperaturen.

Vid feldimensionering av bultförband med stålbulvar i aluminiumdetaljer kan man få för hög klämkraft vid höga temperaturer. Det kan leda till att packningar skadas, ökade spänningar i kring bulthål eller t.o.m. att bulvar kan gå av. Vid kraftiga temperaturfall kan det leda till att klämkraften reduceras, [18].

4.5.4 Andra faktorer som påverkar klämkraft

I en studie visar det sig att vid samma vridmoment så inverkar varvtalet på mutterdragaren på klämkraften hos förbandet, [20], dock är inverkan mindre på gjuten aluminium än i stål. Ökat varvtal ger ökad klämkraft. Som exempel visas i Tabell 7 klämkraften som uppstår vid olika varvtal men samma åtdragningsmoment vid bultförband i oljeträg i aluminium, [20].

Tabell 7. Klämkraft vid olika varvtal på mutterdragare, [20].

Nut runner properties	Average clamping force [kN]
P1: Torque guided, single step, 26 Nm, 20 rpm	16,4
P2: Torque guided, single step, 26 Nm, 40 rpm	16,1
P3: Torque guided, single step, 26 Nm, 80 rpm	16,5
P4: Torque guided, single step, 26 Nm, 120 rpm	19,3
P5: Torque guided, single step, 26 Nm, 185 rpm	20,8

Andra fenomen som förändrar klämkraften är krypning som sker vid ökning av temperatur samt relaxering över tiden, [18].

4.5.5 Åtgärder för att reducera klämkraftförlust

Det går inte att helt undvika klämkraftförluster i förband, men det går att reducera och kompensera för dem. Nedan nämns några åtgärder:

- Åtdragning i två steg eller fler samt efterdragning vid behov
- Undvik ytojämnheter, eg. gjutskägg
- Hårda material ger mindre sättning
- Reducera antalet kontaktytor genom att exempelvis undvika brickor där så är möjligt

4.6 Klämförband

Klämpassning, eller 'interference fit' på engelska, är en vanligt förekommande metod vid sammanfogning av två komponenter. En stor fördel med att använda sig av klämpassning är att man inte tillför ytterligare fästelement som kan skapa obalans vid roterande delar.

Då de ingående delarna monteras ihop skapas ett högt tryck i kontaktytan och därmed en stor friktionskraft som håller ihop parterna och gör att kraftöverföring kan ske.

Beroende på hur monteringen görs så kallas fogen presspassning eller krymppassning.

Vid presspassning tvingas en axel med stor kraft in i ett hål där axelns diameter är större än hålets. Vanligtvis så är kanterna fasade för att underlätta montering och reducera skador på de ingående detaljerna.

Vid krymppassning så använder man sig av upphettning och/eller kylning av de ingående delarna. Antingen så värms parten med hålet upp så att hålet expanderar varvid axeln förs in. Då parten med hålet kyls ner krymper den runt axeln som kläms fast. Alternativet är att kyla ner axeln så den krymper och kan passas in i hålet. Då axeln återgår till rumstemperatur expanderar den och kläms fast. En kombination av dessa två kan givetvis göras om det behövs.

Framför allt används metoden då en axel och ett nav ska sättas ihop, eg. axlar som ska fästas i kullager och kullager i lagerhus. Ett annat vanligt användningsområde

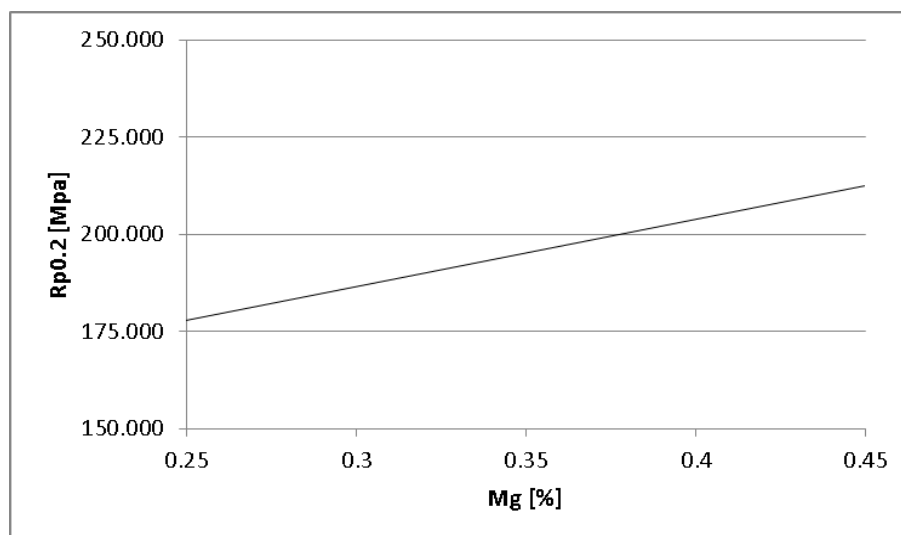
är stålbusningar i aluminium. Stålbusningar används för att förstärka håltagningar i aluminium för bultgenomföring, de ökar även utmattningshållfastheten eftersom tryckspänningar bildas i kontaktytan med busningen.

4.7 Värmebehandling.

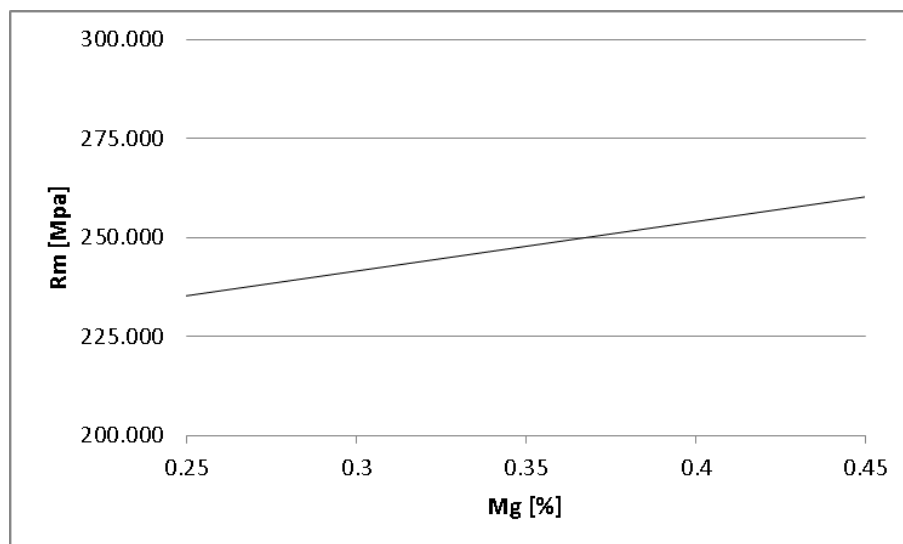
Värmebehandling av sandgjutna aluminiumlegeringar är ett vanligt processteg och principiellt sker det i två steg, först en upplösningsbehandling och sedan en åldring/utskiljning. Åldringen ger en utskiljning av partiklar som låser materialets mikrostruktur och motverkar därmed plasticering. Flera faktorer påverkar resultatet av värmebehandlingen, t.ex. legeringssammansättning, tider och temperaturer. Generellt gäller att effekten av värmebehandling av sandgjuten aluminium är att sträckgränsen och brottgränsen ökar samt att brottförlängningen minskar. Härdbara aluminiumlegeringar kan ge flera önskade materialegenskaper.

4.7.1 Legeringssammansättning

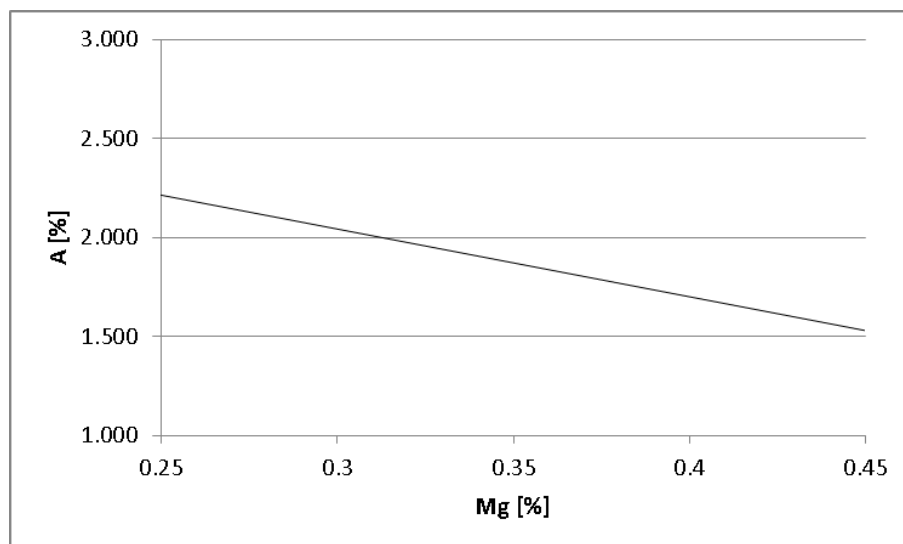
Den vanligaste legeringen som används för sandgjutning i Sverige är EN43100. För denna legering är magnesium det legeringsämne som ger möjlighet till värmebehandling, i andra legeringar kan även koppar användas. De tillåtna variationerna av Cu eller Mg ger en variation av materialegenskaper efter härdning (variationerna finns även innan härdning). Som exempel ser vi i Figur 18-Figur 20 hur egenskaperna varierar för EN-43100 med olika magnesiumhalter inom gränserna för standarden (0.25% -0.45%).



Figur 18. Flytgräns som funktion av varierande magnesiumhalt (EN-43100), [21].



Figur 19. Brottspänning som funktion av magnesiumhalt (EN-43100), [21].



Figur 20. Brottförlängning som funktion av magnesiumhalt (EN-43100), [21].

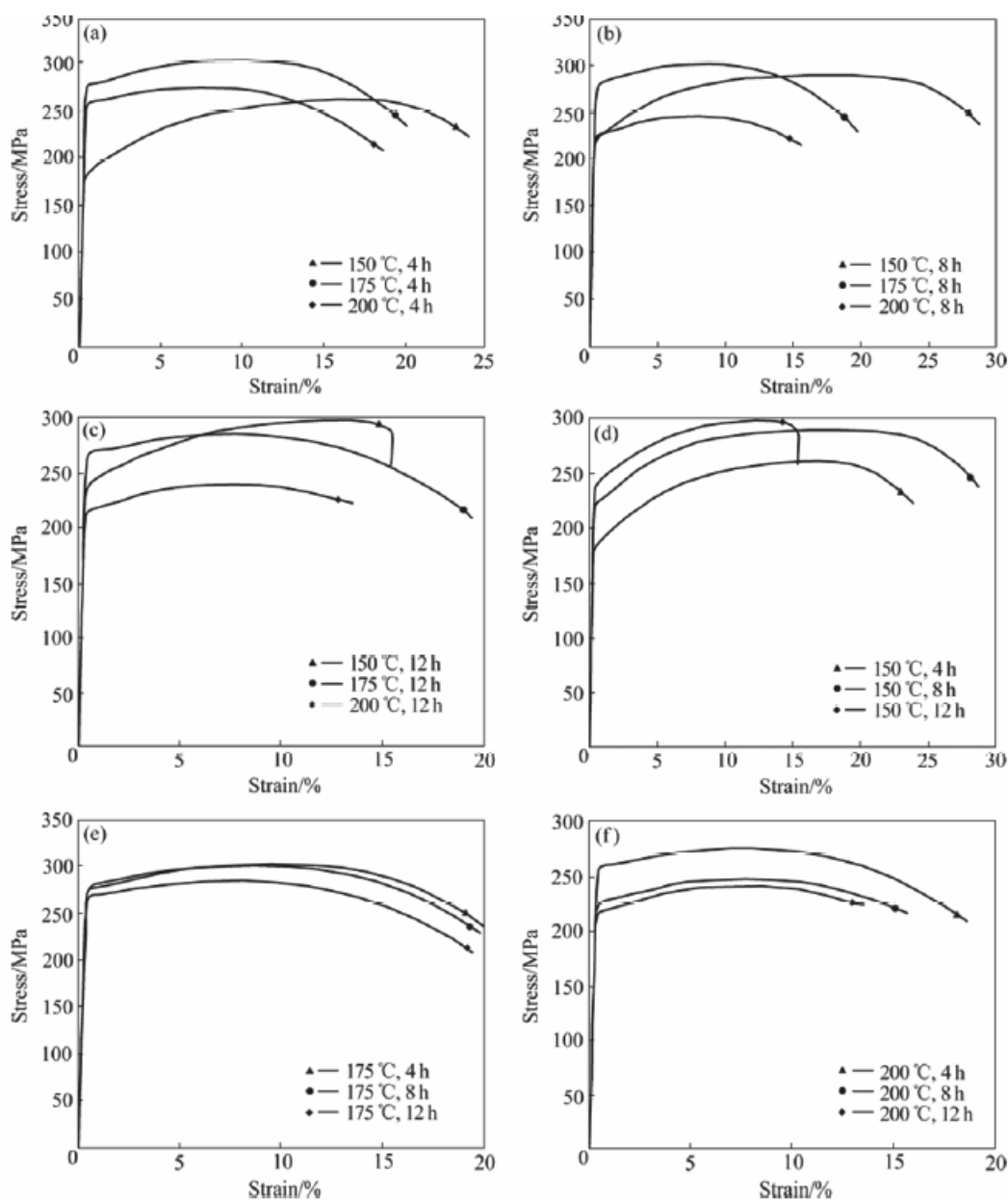
4.7.2 Tider och temperaturer

Idag finns det ingen EN-standard för hur godset ska värmebehandlas och hur olika tjocklekar på godset påverkas vid olika temperaturer. Den gamla ”Svensk Standard”, SS, hade en del riktlinjer för hur lång tid och vid vilken temperatur värmebehandling ska göras för olika legeringar. I den nya EN-standarderna finns inga sådana riktlinjer. Praxis för svenska gjuterier vid värmebehandling är därför att följa den gamla svenska standarden eller att använda egna varianter.

Det finns olika parametrar (legeringssammansättningen samt tid och temperatur för värmebehandlingen) som ett gjuteri kan variera var för sig eller i kombination för att uppnå specifika materialegenskaper vid härdning.

I [22] har man studerat vilken inverkan tid och temperatur har på de mekaniska egenskaperna hos aluminium. Åldringen gjordes under tiderna 4, 8 och 12 timmar och i temperaturerna 150, 175 samt 200°C. I Figur 21 visas spänning-

töjningsdiagram från olika åldringsprocesser. Bilden visar att åldringstemperaturen har högre inverkan på de mekaniska egenskaperna än åldringstiden.



Figur 21. Spänning-töjningsdiagram från olika åldringsprocesser. (a) 150-200 °C, 4h; (b) 150-200 °C, 8h; (c) 150-200 °C, 12h; (d) 150 °C, 4-12h; (e) 175 °C, 4-12h; (f) 200 °C, 4-12h, [22].

4.8 Ytbehandling

Till skillnad från många andra metaller så korroderar inte aluminium i vanligaste miljöerna eftersom det spontant bildas ett skyddande oxidskikt på ytan vid kontakt med syret i luften. Skiktet är endast några hundradels μm tunt och det återbildas vid repor och skador. PH-värdet på oxidskiktet är mellan 4-9. Om metallen används i en miljö där pH-värdet ligger utanför detta intervall så korroderar

metallen. Är aluminiumet dessutom legerat med koppar så ökar risken för korrosionsangrepp ytterligare.

Vanligtvis ytbehandlas aluminium av andra orsaker än korrosionsskydd;

- Mekanisk ytbehandling för att få en dekorativ ytfinish, t.ex. borstad aluminium.
- Elektriskt isolerande skikt. Aluminium leder ström mycket bra, men oxidskiktet är isolerande, det är dock för tunt att förlita sig på som isolerande skikt.
- Färgning genom anodisering ger en dekorativ yta som tål mekaniskt slitage och nötning. Ytskiktet är mycket tunt och behöver inte avlägsnas vid återvinning.
- Vid färgning genom pulverlackning fås också en yta som är tålig för slag och repor. Man kan få mycket fina och glansiga ytor i valfri kulör. Eftersom processen kräver temperaturer kring 160-200 °C ändras materialet som vid värmebehandling.

4.9 Utnyttjande av volym

Som konstruktör har man ofta begränsat med utrymme (blackbox) för de detaljer som ska dimensioneras, framför allt inom fordonsindustrin. Det kan göra att man är tvungen att använda sig av material med högre hållfasthet än aluminium för att uppfylla de krav som finns. Om utrymme finns kan det däremot vara mer fördelaktigt att använda aluminium. Även om detaljerna har större volym än detaljer i stål och järn kan de ha lägre vikt. Samtidigt kan man dra fördel av andra egenskaper hos aluminiumet som högre värmeledningsförmåga och goda korrosionsegenskaper.

Det som ytterligare talar för användandet av aluminium i trånga utrymmen som kan kräva komplexa geometrier är att materialet lämpar sig för pressgjutning och är förhållandevis lätt att bearbeta. Pressgjutna aluminiumdetaljer kan utformas i nästan vilken form som helst och med god måttsäkerhet.

4.10 Korrosion

Ordet korrosion för tankarna till rostangrepp på järn och stål, men det förekommer på de flesta material; metaller, polymerer, keramer och även trä. I trä uppkommer det i form av svampangrepp.

Korrosion innebär inte alltid att material fräts bort i väsentlig grad men en förändring av materialets egenskaper. Aluminium korroderar inte i miljöer med pH-värde mellan 4-9. I miljöer surare än pH 4 och mer alkaliska än pH 9 korroderar aluminium snabbt. De vanligaste typerna är galvanisk korrosion, gropfrätning och spaltkorrosion.

4.10.1 Galvanisk korrosion

Galvanisk korrosion uppstår när två metaller ligger i kontakt med varandra i fuktig miljö. Den oädlare metallen korroderar medan den ädlare metallen skyddas från korrosion, Figur 22. Om den ädla metallen är liten i förhållande till den oädla blir korrosionsangreppet litet, om förhållandet är det omvända kan skadorna bli stora. Galvanisk korrosion kan förhindras om metallytorna hålls åtskilda med isolerande material, t.ex. plasthylsor runt bultar.



Figur 22. Galvanisk spänningsserie, [23].

4.10.2 Gropfrätning

Gropfrätning är den i särklass vanligaste typen av korrosionsangrepp på aluminium och uppstår när metallen utsätts för salthaltig fukt eller stillastående vatten. Denna typ av angrepp påverkar vanligtvis inte hållfastheten men orsakar en ful och ojämn yta. Den kan avhjälpas genom att konstruera bort fickor och skrymslen där vatten kan bli kvar.

4.10.3 Spaltkorrosion

Spaltkorrosion uppstår som namnet antyder i väldigt smala spalter då exempelvis två plåtar fogas samman. Kapillärkraften suger in omkringliggande vätskelösning och korrosion uppstår.

4.11 Nitning

Användningen av nitar för sammanfogning är väldigt vanligt, speciellt inom fordonsindustrin. I takt med att stål i allt högre grad ersätts av lättmetaller och kompositmaterial så ökar också användandet av nitning eftersom det är en metod som tillåter fogning av olika material där svetsning inte är praktiskt. Dessa

material är också känsligare för ändringar av materialegenskaper som orsakas av den värme som svetsning tillför, [24].

Andra fördelar som nitning har är relativt låg kostnad och att de finns i en mängd storlekar och material. Det är en viktig aspekt att tänka på eftersom fel kombination av materialet i nit och delar som ska sammanfogas kan orsaka galvanisk korrosion. Inom fordonsindustrin används ofta stålningar för att sammanfoga aluminiumdelar vilket kan ge komplikationer vad gäller korrosion men även vid återvinning av materialet. Studier har gjorts för att undersöka användningen av nitar i aluminium istället. Förutom att underlätta återvinningen och eliminera den galvaniska korrosionen, ger det även en viktreduktion på ca 1 kilo hos en medelstor bil, [25].

Det är även praktiskt att använda sig av nitar i de fall då man inte kan komma åt baksidan av detaljen som ska sammanfogas, exempelvis rör.

4.12 Utmattning

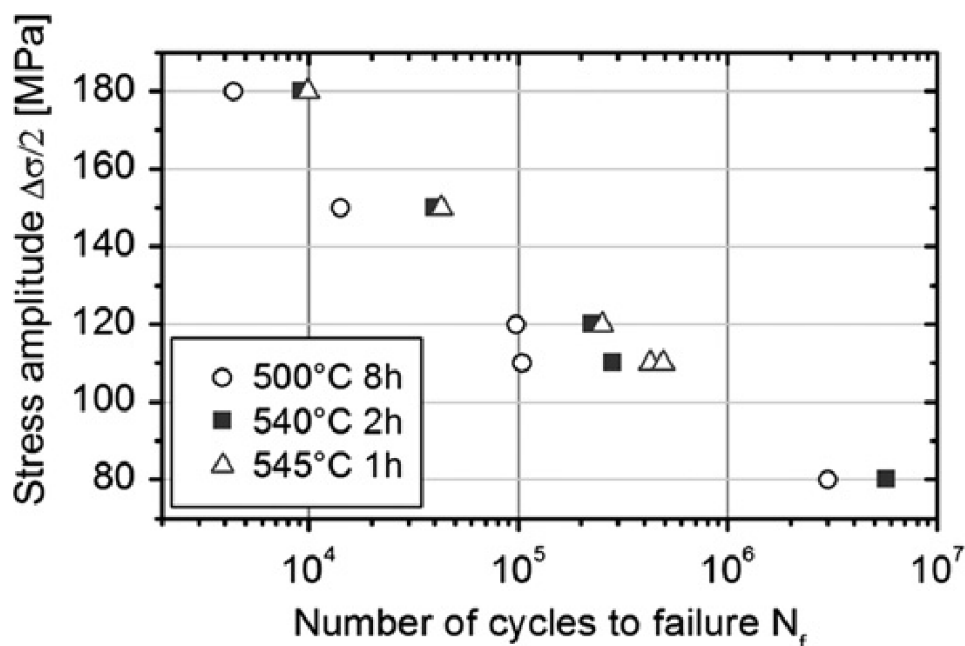
Utmattning sker till följd av upprepning av laster som ligger under sträckgränsen och sker utan plastisk deformation. Utmattning sker i tre steg, initiering av spricka, tillväxt av en spricka och som leder till brott. Sprickinitiering sker antingen på ytan av materialet eller i samband med en inre defekt. Med inre defekt menas i det här fallet porer eller annan inneslutning. Så sprickinitieringen uppstår på ytan görs det i en repa eller spricka.

Hållfastheten med avseende på utmattning i gjutna aluminiumkomponenter varierar stort beroende på legering och defekter i materialet. Defekter som porer och slagg har helt avgörande betydelse för sprickinitiering vid utmattning. Även förekomst av restspänningar i materialet påverkar livslängden.

Även mikrostrukturen har stor inverkan på utmattningshållfastheten. Mikrostrukturen hos de flesta aluminiumlegeringar kan förändras genom olika värmebehandlingar och därmed ge bättre egenskaper vad gäller utmattning. I försök gjorda på gjutna cylinderhuvuden i aluminium som används i dieselmotorer visas värmebehandlingens effekt. Experimenten visar att värmebehandlingen har avsevärd effekt på utmattningshållfastheten vid lågcykelutmattning i rumstemperatur men liten inverkan på termomekanisk utmattning, [26]. Den termomekaniska utmattningen uppstår till följd av temperaturcyklningar.

Andra experiment som gjorts visar hur variationer i värmebehandlingen påverkar livslängden hos en komponent, [26]. I Figur 23 ser man att för denna specifika legering har högre temperatur större inverkan än behandlingstiden på utmattningshållfastheten.

En annan intressant studie, [27] visar sambandet mellan porositet hos aluminium och duktiliteten. Den visar att det är storleken på den största poren i materialet som avgör draghållfastheten och inte mängden porer. Skjuvhållfastheten påverkas inte lika mycket.



Figur 23. Wöhlerdiagram på tre olika värmebehandlingar, [26].

Studier har också gjorts för att undersöka olika värmebehandlingars inverkan på utmattning och Q -värde, [28] samt [29]. Tabell 8 visar hur olika värmebehandlingar påverkar kvalitetsindex hos A357 aluminium.

Tabell 8. Tabellen visar olika värmebehandlingars inverkan på kvalitetsindex, Q , på A357 aluminium, [28].

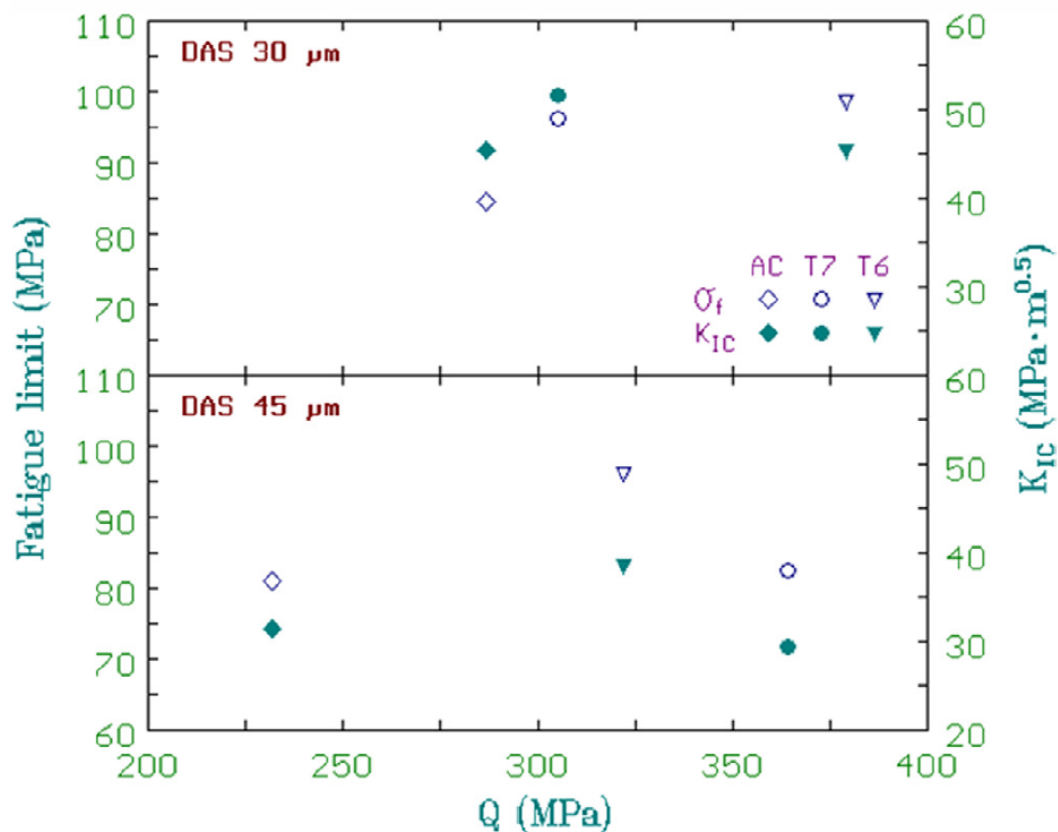
A/A	Cast aluminum alloy A357	R_p (MPa)	R_m (MPa)	A_f (%)	W (MJ/m ³)	Q (MPa)	Q_R (MPa)	Q_C (MPa)	Q_0 (MPa)
1	None	132	254	18.40	41.55	443.7	1052.0	320.1	547.5
2	6 h at 155 °C	160	277	19.52	49.38	470.5	1136.0	356.0	653.8
3	12 h at 155 °C	225	313	15.43	44.85	491.2	996.5	411.3	673.5
4	16 h at 155 °C	227	315	15.39	45.36	493.1	996.5	413.9	680.6
5	20 h at 155 °C	232	317	13.58	40.31	486.9	911.0	414.2	635.1
6	24 h at 155 °C	255	327	12.69	38.49	492.5	889.5	430.3	639.9
7	30 h at 155 °C	265	333	11.79	37.43	493.7	854.5	437.4	639.3
8	36 h at 155 °C	281	338	10.60	34.66	491.8	811.0	444.2	627.6
9	48 h at 155 °C	311	344	7.47	25.71	475.0	684.5	445.7	568.1
1	None	132	254	18.40	41.55	443.7	1052.0	320.1	547.5
2	1 h at 175 °C	154	276	21.12	53.60	474.7	1210.0	354.4	690.0
3	3 h at 175 °C	190	292	17.68	48.36	479.1	1074.0	380.5	673.6
4	6 h at 175 °C	259	323	12.75	40.28	488.8	896.5	427.9	661.8
5	9 h at 175 °C	287	338	10.52	35.45	491.3	813.0	445.9	641.5
6	12 h at 175 °C	296	340	9.73	33.07	488.2	782.5	448.0	626.7
7	20 h at 175 °C	304	344	7.42	25.81	474.5	675.0	443.3	562.1
8	36 h at 175 °C	295	333	7.53	25.45	464.5	671.5	430.2	549.5
9	48 h at 175 °C	311	344	6.37	22.45	464.6	629.5	438.5	535.5
1	None	132	254	18.40	41.55	443.7	1052.0	320.1	547.5
2	1 h at 205 °C	267	325	11.27	36.10	482.8	830.5	428.6	628.0
3	2 h at 205 °C	293	338	8.63	29.17	478.4	724.5	440.2	584.7
4	3 h at 205 °C	301	336	8.33	28.39	474.1	717.5	439.3	584.9
5	4 h at 205 °C	286	325	9.24	30.27	469.8	748.0	427.7	588.7
6	5 h at 205 °C	281	327	9.19	29.96	471.5	740.5	427.8	580.6
7	6 h at 205 °C	291	321	8.13	26.68	457.5	697.5	420.1	557.8
8	10 h at 205 °C	292	325	8.41	27.80	463.7	712.5	425.8	570.0
9	12 h at 205 °C	304	334	8.60	29.43	474.1	734.0	439.6	598.3
10	16 h at 205 °C	300	332	9.24	30.99	476.8	762.0	439.2	609.9
11	24 h at 205 °C	257	285	5.05	14.58	390.5	509.5	354.7	402.8
12	36 h at 205 °C	216	250	7.48	18.42	381.1	590.0	322.6	400.2

I ”Fatigue of an aluminium cast alloy used in the manufacture of automotive engine blocks, [29]” har man genomfört experiment med gjutna motorblock. Blocken gjuts med två olika smältor, därefter tas prover ut som genomgår olika värmebehandlingar, Tabell 9.

Tabell 9. Kemisksammansättning på de olika provstavarna, [29].

DAS (μm)	Condition	Element							
		Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Ti	B	Sr
30	AC	7.339	3.135	0.506	0.400	0.258	0.169	14.258	147
	T7	7.390	3.347	0.546	0.406	0.302	0.169	9.35	167
	T6	7.362	3.278	0.568	0.408	0.303	0.163	8.99	177
45	AC	7.290	3.191	0.499	0.379	0.284	0.171	11.90	153
	T7	7.325	3.263	0.548	0.406	0.299	0.166	8.37	165
	T6	7.352	3.300	0.582	0.412	0.305	0.165	8.25	164

Slutligen undersöks utmattningstidsnivå (σ_f) och slagseghet (K_{IC}) i förhållande till kvalitetsindex (Q), [29].



Figur 24. Utmattningstidsnivå (σ_f) och slagseghet (K_{IC}) i förhållande till kvalitetsindex, Q , [29].

5 Fortsatt arbete

Fokusera mer på utvalda områden där man försöker implementera kunskapen vid konvertering av en detalj till pressgjuten aluminium. Exempelvis kan man studera vad en konvertering innebär för skruvförband och komponentens livslängd med avseende på utmattning. Genomföra en case-studie där man tittar på en specifik detalj och konverterar den till gjuten aluminium.

Undersöka närmare vilka faktorer som inverkar på kvalitetsindex och kopplingen till utmattningstidsnivå.

6 Referenser

- [1] Sapa Handbok för konstruktörer
- [2] U. Lindunger, E. Stark, *Stål och Aluminium – En jämförelse av materialegenskaper, LCI och återvinning*, (2004)
- [3] R. Cobden, *Aluminium: Physical properties, Characteristics and Alloys, Training in Aluminium Application Technologies*, (1994)
- [4] Alteams Group, <http://www.alteams.com/alteams-tech-centre/design-assistance/cast-aluminium-properties.html>, (2014-02-13)
- [5] M. Lorentzon, *Mekaniska egenskaper i aluminiumgjutgods framställda med olika metoder, Vikteffektiva lättmetallstrukturer, Rapport 8*, (2006)
- [6] S. G. Ledell et al., *"Guidelines" för utformning av gjutna komponenter, Rapport 050701 Svenska Gjuteriföreningen*, (2005)
- [7] P-E. Persson, *Ingjutsteknik, En litteratur- och videostudie, Rapport 971223 Svenska Gjuteriföreningen*, (1997)
- [8] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, (1997)
- [9] University of Cambridge, <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/BD6/ductile-to-brittle.php>, 2014
- [10] M. de Podesta, *Understanding the properties of matter*, (1996)
- [11] N. D. Alexopoulos, Sp. G Pantelakis, *Quality evaluation of A357 cast aluminium alloy specimens subjected to different artificial aging treatment, Materials and Design 25*, (2009)
- [12] M. Drouzy et al., *Interpretation of tensile results by means of quality index and probable yield strength, AFS Int. Cast Metals J. 5 43-50*, (1980)
- [13] M. Tiryakioğlu et al., *Quality Indices for Aluminum Alloy Castings: A Critical Review, Metall. Mater. Trans. B*, (2009)
- [14] C.H. Cáceres et al., *Quality index chart for different alloys and temperatures: a case study of aluminium die-casting alloys, Journal of light metals*. (2001)
- [15] S. J. Midea, G. D. Pfaffmann, *Heat Treating, Including Steel Heat Treating in the New Millenium, An International Symposium in Honor of Professor George Krauss, Proceedings of the 19th Conference*, (2009)
- [16] T. Jagliski et al., *Study of bolt load loss in bolted aluminium joints*, (2007)
- [17] Swedish Fasteners Network
- [18] *Fastenal Engineering and Design Support*, (2009)
- [19] E. Hemmati Vand, R.H. Oskouei and T. N. Chakherlou, *An experimtal method for measuring clamping force in bolted connections and effect of bolt threads lubrication on its value*, (2008)

- [20] J. Olsson, P. Sandlung, *Form the design basis for screw joints*, (2008)
- [21] M. Nylander, E. Stark, *Energieffektiv värmebehandling av aluminium*, (2008)
- [22] X. Ding et al., *Influences of aging temperature and time on microstructure and mechanical properties of 6005A aluminium alloy extrusions.*, *Transactions of Nonferrous Metals Society in China*, (2012)
- [23] Wikipedia
- [24] L. Krüger, M. Mandel, *Electrochemical behaviour of aluminium/steel rivet joints*, *Corrosion Science*, (2011)
- [25] N. Hoang et al., *Failure of aluminium self-piercing rivets: An experimental and numerical study*, *Materials and Design*, (2011)
- [26] M. Azadi, M. Mokhtari, *Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviours of A356.0 aluminum alloy*, *Materials and design*, (2013)
- [27] X. Teng et al., *Pore size and fracture ductility of aluminum low pressure die casting*, *Engineering Fracture Mechanics*, (2009)
- [28] N.D. Alexopoulos, *Generation of quality maps to support material selection by exploiting the quality indices concept of cast aluminium alloys*, *Materials and Design*, (2007)
- [29] R. Ganzález et al., *Fatigue of an aluminium cast alloy used in the manufacture of automotive engine blocks*, *International Journal of Fatigue*, (2013)