

Matilde Cassandra Fjeld
Guri Sollien Hulbak
Mari Røyne Valle

Karakterisering av mekanisk respons etter sveising av to superlegeringer

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin

Veileder: Anna Olsen

Medveileder: Seyed Mohammed Javad Razavi

Mai 2023

Matilde Cassandra Fjeld
Guri Sollien Hulbak
Mari Røyne Valle

Karakterisering av mekanisk respons etter sveising av to superlegeringer

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin
Veileder: Anna Olsen
Medveileder: Seyed Mohammed Javad Razavi
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon



Kunnskap for en bedre verden

Tittel(norsk og engelsk): Karakterisering av mekanisk respons etter sveising av to superlegeringer Characterization of mechanical response after welding of two superalloys	Prosjektnr: MTP-K-2023-08
Forfattere: Matilde Cassandra Fjeld, Mari Røyne Valle, Guri Sollien Hulbak	Dato: 22.05.2023
	Gradering Åpen/Lukket: Åpen
Studium: Bachelor i ingeniørfag, maskin	
Studieretning: Maskinkonstruksjon	
Veileder internt: Anna Olsen og Seyed Mohammed Javad Razavi	
Oppdragsgiver: Nammo AS	
Oppdragsgivers kontaktperson: Rune Østhus	
Sammendrag (norsk og engelsk): Prosjektet går ut på å karakterisere den mekaniske responsen etter sveising av to nikkelbaserte superlegeringer, Inconel Alloy 617 og Inconel Alloy 625. Dette skal oppnås ved å utføre to ulike metoder for materialprøving; bøyepøving og strekkprøving. Formålet med prosjektet er å utføre en sammenligningstudie mellom de to aktuelle legeringene, og verifisere resultatenes gyldighet. The project aims to characterize the mechanical response after welding two nickel-based superalloys, Inconel Alloy 617 and Inconel Alloy 625. This will be done by performing two different tests; bending tests and tensile tests. The purpose of the project is to conduct a comparative study, both between the two alloys in question, and verify the validity of the results.	
Stikkord: <ul style="list-style-type: none">- Mekanisk respons- Sveis- Bøyepøving- Strekkprøving	Keywords: <ul style="list-style-type: none">- Mechanical response- Weld- Bend testing- Tensile testing

Forord

Denne bacheloroppgaven er den avsluttende delen av maskiningeniørutdanningen ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Prosjektgruppen består av Mari Røyne Valle, Matilde Cassandra Fjeld og Guri Sollien Hulbak, hvor alle har spesialisert seg innenfor studieretningen maskinkonstruksjon.

Oppgaven er utarbeidet i samarbeid med Nammo AS, som er et internasjonalt konsern innenfor forsvarsindustrien med hovedkontor på Raufoss i Norge. Formålet med prosjektet er å sammenligne to nikkelbaserte superlegeringer etter sveising, som skal danne grunnlaget for å vurdere hvilken av de som skal brukes i en thruster til en rakett.

Vi ønsker å takke våre kontaktpersoner i Nammo AS, Rune Østhus og Knut Erik Snilsberg for muligheten de har gitt oss med denne oppgaven, og et godt samarbeid. I tillegg har vi hatt et godt og effektivt samarbeid med Berit Vinje Kramer i forbindelse med varmebehandling av prøvestykker. Vi vil også rette en takk til våre veiledere Anna Olsen og Javad Razavi som har fulgt opp og gitt god faglig veiledning gjennom hele prosessen.

NTNU, Trondheim, mai 2023

Sammendrag

Nammo Raufoss AS har i oppdrag å utvikle et hydrogenperoksid basert RACS-system (Roll and Attitude Control System). Systemet er sentralt for fremtidens bæreraketter innenfor romfart, da det er et miljøvennlig styresystem. Denne nyvinningen åpner opp for bruk av høystyrke Inconel, som i tillegg til styrken sin har utmerket temperaturbestandighet. Prosjektet går ut på å karakterisere den mekaniske responsen til to slike superlegeringer; Inconel Alloy 617 og Inconel Alloy 625, etter sveising. Formålet er å utføre en sammenligningsstudie av legeringene.

I prosjektet vil prøvestykker bli dimensjonert og forbehandlet, før det vil bli gjennomført strekk- og bøyeprøving. Data fra testene vil danne grunnlag for å analysere og sammenligne resultatene. Ut fra dette vil det bli gjort en vurdering av de mekaniske egenskapene til legeringene og varmebehandlingens påvirkning.

Dimensjonering av prøvestykker ble utført etter veiledning fra bedriften og i henhold til relevante standarder for strekk- og bøyeprøving. Prøvestykkene ble produsert hos Nammo og sendt til Trondheim. Halvparten av prøvene ble varmebehandlet i forkant av strekk- og bøyeprøvingene. Underveis i prøveforløpene ble det registrert kraft og forskyvning. Rådataen ble lagret i tekstfiler som ble etterbehandlet i Python og Microsoft Excel.

Resultatene av strekk- og bøyeprøvingen presenteres i diagrammer og tabeller. Diskusjon av resultatene er sentrert rundt vurdering av styrken, stivheten, kvaliteten og duktiliteten til legeringene. Basert på dette blir det gjort en sammenligning av legeringene. Resultatene vil også bli vurdert opp mot relevant litteratur.

Basert på analysen gir de oppnådde resultatene et betydelig bidrag til karakteriseringen av den mekaniske responsen til de to superlegeringene.

Abstract

Nammo Raufoss AS has been tasked with developing a hydrogen peroxide-based RACS system (Roll and Attitude Control System). The system plays a central role in future space launchers, as it is an environmentally friendly propulsion system. This innovation opens up the use of standard high strength Inconel, which in addition to its strength has excellent temperature resistance. The project aims to characterize the mechanical response of two such superalloys; Inconel Alloy 617 and Inconel Alloy 625, after welding. The purpose is to conduct a comparative study of the alloys.

In the project, test pieces will be dimensioned and pre-processed, before tensile and bending tests will be carried out. Data from the tests will form the basis for analyzing and comparing the results. Based on this, an assessment will be made of the mechanical properties of the alloys and the influence of the heat treatment.

Dimensioning of test pieces was carried out following guidance from the company and according to relevant standards for tensile and bend testing. The samples were produced at Nammo and sent to Trondheim. Half of the samples were heat treated prior to the tensile and bending tests. During the tests, force and displacement were recorded. The raw data was stored in text files and subsequently processed in Python and Excel.

The results of the tensile and bending tests are presented in diagrams and tables. The discussion of the results revolves around the assessment of the strength, quality, and ductility of the alloys. Based on this a comparison will be done of the alloys. The results will also be compared with regard to relevant literature.

Based on the analysis, the obtained results provide a significant contribution to the characterization of the mechanical response of the two superalloys.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Figurer	vii
Tabeller	ix
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	3
1.3 Begrensninger	4
2 Teori	5
2.1 Materialprøving og mekaniske egenskaper	5
2.1.1 Destruktive og ikke-destruktive prøvemeter	5
2.2 Sveis	6
2.2.1 Lasersveising	6
2.2.2 Buttsveis	7
2.3 Strekkprøving	7
2.3.1 Spenning-tøyning diagram	8
2.3.2 Sann spenning-tøyning diagram	12
2.3.3 Duktilitet	14
2.4 Bøyeprøving	15
2.4.1 3-punkts bøyetesting	16
2.4.2 Transversal rot- og råkbøyetest	17
3 Materialer	21
3.1 Alloy 617	21

3.2	Alloy 625	22
3.3	Sammenligning av mekaniske egenskaper	24
4	Metode	25
4.1	Testutstyr	25
4.2	Sveising av prøveplater og etterbehandling	27
4.2.1	Sveising og maskinering	27
4.2.2	Varmebehandling	28
4.3	Strekprøving	31
4.3.1	Dimensjonering av prøvestykker	31
4.3.2	Gjennomføring av strekprøving	33
4.4	Bøyeprøving	35
4.4.1	Testoppsett	36
4.4.2	Dimensjonering av prøvestykker	37
4.4.3	Gjennomføring av bøyeprøving	38
5	Resultater og diskusjon	40
5.1	Strekprøving	40
5.1.1	Validiteten av strekprøvingen	41
5.1.2	Vurdering av varmebehandlingen	42
5.1.3	Sammenligning av legeringene	43
5.1.4	Duktilitet	51
5.1.5	Sann spenning-tøyning diagram	53
5.1.6	Bruddplassering	56
5.2	Bøyeprøving	57
5.2.1	Validitet av bøyeprøvene	57
5.2.2	Duktilitet	60
5.2.3	Maksimal bøyelast	61
5.2.4	Sammenligning av rot- og råkbøyeprøve	63
5.2.5	Varmebehandlingens påvirkning på legeringene	65

5.2.6	Bøyeenergi	66
6	Konklusjon og videre arbeid	68
	Referanser	70
	Vedlegg	i
A	Risikovurdering	i
B	Testmatriser	x
B.1	Testmatrise strekkprøving	x
B.2	Testmatrise bøyeprøving	x
C	Resultatmatrise	xiii
C.1	Materialegenskaper	xiii
C.2	Lengder parallellområdet og bruddforlengelse	xiii
C.3	Tverrsnittsareal og bruddkontraksjon	xiii
C.4	Gjennomsnitt materialegenskaper	xiii
D	Materialsertifikater	xviii
E	Python-kode for resultater av strekkprøving og bøyeprøving (Python-kode.zip)	xxiii
F	Excel-fil for utregninger av seighet (Seighet_strekk.zip)	xxiii
G	Diagrammer fra alle strekk- og bøyeprøver (diagrammer.zip)	xxiii
H	Bilder strekkprøver og bøyeprøver (Bilder_strekkogbøy.zip)	xxiii

Figurer

1.1	Aktuelle bærekraftsmål. Utarbeidet fra (FN sambandet, 2023b). . . .	2
2.1	Strekkpåkjent buttsveis med symboler. Hentet fra (Dørum, 2001). . .	7
2.2	Prøvestykke med innfestninger i hver ende. Hentet fra (Manufacturing Guide Sweden AB, 2023).	8
2.3	Typisk spenning-tøyning diagram for duktile materialer. Hentet fra (Lohne, 2023b).	9
2.4	Sann- og nominell spenning-tøyning kurve av bløtt stål. Hentet fra (Johansen, 2010).	12
2.5	3-punkts bøyefikstur. Hentet fra (Instron, 2023a).	16
2.6	Rot- og råkbøyetest	17
2.7	Transversal rot- og råkbøyeprøve for buttsveis. Utarbeidet fra (Standard Norge, 2023).	18
2.8	Testoppsett for transversal rot- og råkbøyetest. Utarbeidet fra (Standard Norge, 2023).	19
4.1	Testmaskin <i>Instron 1342</i>	26
4.2	Ferdigsveiste prøveplater med nummerering. Fotografert av Nammo. .	27
4.3	Prøver klare til varmebehandling	28
4.4	Saltbadet og vasking av varmebehandlede prøver	29
4.5	Bøyeprøver fra Alloy 617 og 625 etter varmebehandling	29
4.6	Prøvestykker med og uten varmebehandling til sammenligning	30
4.7	Prøvegeometri for strekkprøve. Hentet fra (Standard Norge, 2022a). .	32
4.8	Testoppsett for strekkprøving	34
4.9	3-punkts bøyefikstur som ble brukt til bøyeprøving	36
4.10	Testoppsettet til bøyeprøvingen med dimensjoner	37
4.11	Prøvedimensjoner for bøyeprøvene	38
4.12	Bøyeprøving	39
5.1	Nominelle spenning-tøyning kurver ved alle strekkprøvene av Alloy 617	41
5.2	Nominelle spenning-tøyning kurver ved alle strekkprøvene av Alloy 625	42
5.3	Sammenligning av nominelle spenning-tøyning kurver ved strekkprøver	43

5.4	Sammenligning av nominelle spenning-tøyning kurver av de to legeringene ved strekkprøving	44
5.5	Sammenligning av sann- og nominell spenning-tøyning kurver ved strekkprøving for Alloy 617	54
5.6	Sammenligning av sann- og nominell spenning-tøyning kurver ved strekkprøving for Alloy 625.	55
5.7	Sammenligning av sann spenning-tøyning kurve ved strekkprøving av Alloy 617 og Alloy 625	55
5.8	Bruddplassering etter strekkprøving av varmebehandlede prøvestykker	56
5.9	Resultater for alle bøyeprøver	58
5.10	Alloy 617 råkbøyeprobe uten varmebehandling	60
5.11	Alloy 625 råkbøyeprobe med varmebehandling	61
5.12	Sammenligning av styrken til Alloy 617 og Alloy 625 for rotbøyeprobe	62
5.13	Sammenligning av rot- og råkbøyeprobe for Alloy 617	64
5.14	Sammenligning av rot- og råkbøyeprobe for Alloy 625	64
5.15	Sammenligning av bøyeprøver med og uten varmebehandling for Alloy 617	65
5.16	Sammenligning av bøyeprøver med og uten varmebehandling for Alloy 625	66

Tabeller

2.1	Symbolforklaring til testoppsettet for bøyeprøving	19
3.1	Kjemisk sammensetning av Alloy 617. Utarbeidet fra (Specialmetals, 2023a).	21
3.2	Kjemisk sammensetning av Alloy 625. Utarbeidet fra (Specialmetals, 2023b).	23
3.3	Mekaniske egenskaper for Alloy 617 og Alloy 625. Verdier hentet fra (Corrotherm, 2023a) og (Corrotherm, 2023b).	24
4.1	Enkel oversikt over strekkprøver som gjennomføres i prosjektet	31
4.2	Symbolforklaring til prøvegeometri for strekkprøve	32
4.3	Dimensjoner på prøvestykker for strekkprøving	33
4.4	Enkel oversikt over bøyeprøver som gjennomføres i prosjektet	35
5.1	E-moduler ved strekktesting for Alloy 617	45
5.2	E-moduler ved strekktesting for Alloy 625	45
5.3	0,2% flytespenninger ved strekktesting for Alloy 617	46
5.4	0,2% flytespenninger ved strekktesting for Alloy 625	46
5.5	Strekkfasthet ved strekktesting for Alloy 617	47
5.6	Strekkfasthet ved strekktesting for Alloy 625	47
5.7	Bruddpunkt ved strekktesting av Alloy 617	48
5.8	Bruddpunkt ved strekktesting av Alloy 625	49
5.9	Seighet beregnet ved strekktesting utført på Alloy 617	49
5.10	Seighet beregnet fra strekktester utført på Alloy 625	50
5.11	Duktilitetsmål ved strekktesting for Alloy 617	51
5.12	Duktilitetsmål ved strekktesting for Alloy 625	52
5.13	Maksimal bøyelast for Alloy 617 med og uten varmebehandling	62
5.14	Maksimal bøyelast for Alloy 625 med og uten varmebehandling	63
5.15	Energi for Alloy 617 med og uten varmebehandling	67
5.16	Energi for Alloy 625 med og uten varmebehandling	67

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Dagens samfunn har virkelig satt miljø på agendaen. Miljøfokus er ikke lenger begrenset til innenfor jordens atmosfære. Det strekker seg lengre enn det, forbi atmosfærens grenser og ut i verdensrommet. Miljøhensyn har gått så langt at selv ikke raketter slipper unna. Romvirksomhet handler om å bruke rommet til å løse problemer, og som bidragsyter til verdiskapning i dagens høyteknologiske industri. Eksempelvis blir satellitter et stadig viktigere verktøy for miljøovervåkning (Norsk Romsenter, 2023). Slike satellitter plasseres ut i bane rundt jorden ved hjelp av bæreraketter. Det er kraftige raketter som forbrenner tonnevis av drivstoff på bare få minutter (Wikipedia, 2021).

Neste generasjon raketter innebærer utviklingen av et Roll and Attitude Control System (RACS). Dette er et miljøvennlig styresystem for bæreraketter (Nammo, 2023). Systemet skal sørge for nøyaktig posisjonering av bæreraketten. Dette er spesielt viktig ved utplassering av satellitter i bane rundt jorda. I det nye styresystemet skal hydrogenperoksid brukes som det eneste drivstoffet, slik at utslippet blir ren vanndamp og oksyngengass. Nammo Raufoss AS (Nammo) landet i 2019 sin hittil største romfartskontrakt, som omhandlet nettopp det å utvikle et slikt RACS-system (Urke, 2019).

Nammos utvikling av RACS-systemet er basert på en grønn teknologi. Hovedkomponenten er en 220N hydrogenperoksid monopropellant thruster. Thrusteren har en moderat forbrenningstemperatur. Det gjør at bruk av dyre og sjeldne metaller utelukkes, og den kan oppnå effektiv masseytelse ved bruk av standard høystyrke Inconel, som i tillegg innehar en utmerket temperaturobestandighet (Nammo, 2023). Inconel er et varemerke som refererer til en gruppe nikkelbaserte legeringer (Store norske leksikon, 2019b). Prosjektet retter seg inn mot to slike nikkelbaserte legeringer, som begge vurderes til bruk på en slik thruster og det må gjøres et valg på hvilken som egner seg best.

De Forente Nasjoners (FN) bærekraftsmål består av 17 globale hovedmål for å oppnå bærekraftig utvikling (FN sambandet, 2023b). Innføringen av nye materialer i industrien drives i stor grad av motivasjonen for å bidra til disse målene. Relevante bærekraftsmål for denne oppgaven vises i figur 1.1.



Figur 1.1: Aktuelle bærekraftsmål. Utarbeidet fra (FN sambandet, 2023b).

FNs bærekraftsmål nummer 12: Ansvarlig forbruk og produksjon, handler om hvordan vi utnytter dagens ressurser (FN sambandet, 2023a). Ved å benytte seg av sterkere, mer robuste og lettere materialer kan industrielt utstyr tåle belastningene og miljøene de utsettes for bedre, og slik få lengre levetid. Et eksempel på slike materialer er Inconel. Det kan da oppnås store besparelser i materialbruk samtidig som konstruksjonene tåler mer. For industrien betyr dette flere muligheter for realisering av nye teknologiske og bærekraftige løsninger, slik som RACS-systemet. Innen rom- og flyindustrien er riktig materialvalg avgjørende for et produkts ytelse. Ved å kjenne til styrker og svakheter for ulike materialer kan man ta en avgjørelse for hvilke materialer som er best egnet for et spesifikt produkt.

Bærekraftsmål nummer 9: industri, innovasjon og infrastruktur, omhandler å fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og innovasjon (FN sambandet, 2023c). Dette innebærer blant annet utvikling av alternative materialer, som kan brukes til å forbedre infrastruktur. Testing og analyse av konstruksjonsmaterialer bidrar til utviklingen av ny teknologi. Nye materialer kan erstatte dyrere, mer sjeldne og mindre miljøvennlige materialer, og dermed bidra til å gjøre næringslivet mer bærekraftig. Bruk av Inconel kan erstatte bruk av sjeldne materialer. For å kunne gjøre denne erstatningen er det nødvendig med testing og analyser.

Høye krav til kvalitet og pålitelighet er en sentral pådriver for innovasjon innen flere fagfelt (Frost-Nielsen og Særveraas, 2009). Den raske teknologiske utviklingen svarer kontinuerlig på dagens behov og stimulerer til forbedring av materialtesting og analyse, spesielt med tanke på deformasjon, brudd og andre feilmekanismer. Slike interaksjoner mellom teknologiske fremskritt, materialer, testing og feil er fortsatt relevante og vil være tilstede både i dag og i fremtiden.

Utviklingen av materialer må ikke bare fokusere på forbedret kvalitet, men også vise at materialene er egnet til formålet (Graham mfl., 2019). For europeisk romfartøy blir dette styrt av standarden ECSS-Q-ST-70 *Materials, mechanical parts and processes* (ECSS, 2009). Generelt stilles det i dag krav om mer detaljert informasjon om materialoppførsel enn før (Norman E. Dowling mfl., 2019). Investeringer

og utvikling av nye legeringer og testmetoder innen fly- og oljebransjen kan derfor være svært verdifulle i romfartssammenheng (Brekke, 2023). Et eksempel på dette er utviklingen av RACS-systemet, som demonstrerer hvordan riktig kombinasjon av egenskaper i ulike materialer har potensialet til å muliggjøre og optimalisere ny teknologi.

1.2 Problemstilling

Formålet for dette prosjektet er å sammenligne to nikkelbaserte superlegeringer inn mot høytemperatur anvendelse. Bakgrunnen for prosjektet var et ønske om å undersøke effekten sveising uten Post Weld Heat Treatment (PWHT) har på materialene. På bakgrunn av dette er problemstillingen for prosjektet følgende:

Karakterisering av mekanisk respons etter sveising av to superlegeringer

Denne oppgaven vil bidra med en dypere innsikt i materialeegenskapene til to legeringer. Det vil bli innsamlet materialdata, som videre vil bli analysert og vurdert. Resultatene og analysene fra dette prosjektet vil være en del av beslutningsgrunnlaget når Nammo skal avgjøre hvilken legering de skal benytte i en thruster, som er en av hovedkomponentene i styresystemet til bæreraketten.

Resultatmål

Resultatmålene beskriver hva som må til for å løse den overordnede problemstillingen.

- Gjennomføre strekkprøving og bøyepøving for å avdekke mekaniske egenskaper til materialene etter at de er utsatt for varmpåvirkning fra sveising og driftstemperatur.
- Behandle data og gjøre en sammenligningsstudie mellom de to legeringene.
- Vurdere og analysere resultatene ved å sammenligne med data fra relevant litteratur.

Effektmål

Effektmål beskriver hva gruppen får ut av prosjektet.

- Tilegne praktisk og teoretisk erfaring om materialtesting.
- Lære å bruke nødvendig utstyr på verkstedet for å gjennomføre tester.

-
- Få en økt forståelse for hvordan varmebehandling påvirker materialenes mekaniske egenskaper.
 - Lære å skrive tekniske rapporter i LaTeX
 - Lære å sette opp og følge en detaljert fremdriftsplan for hele prosjektet.

1.3 Begrensninger

I forbindelse med denne oppgaven vil det være mange materialegenskaper som vil være relevante å undersøke. Det vil verken være mulig eller nødvendig å betrakte alle mulige testparametere for å gjøre en god sammenlikning av materialene. En begrensning ble derfor valg av tester som skal utføres. Der valget ble strekkprøving og bøyepøving. Det på bakgrunn av prosjektets tidsramme, tilgjengelig utstyr og fagpersonell. Vurderingen av resultatene vil ta høyde for at enkelte parametere ikke har blitt undersøkt.

Prøvestykkene ble produsert av Nammo på Raufoss og sendt med post til Trondheim. Kostnader i forbindelse med produksjon og transport av prøvestykker ble, sammen med prosjektets tidsramme, viktige begrensende faktorer når det gjelder hvor mange prøver som skal utføres for hver av testene. Et vellykket prosjekt avhenger av at riktige prøvestykker er tilgjengelige til rett tid.

Gruppen var avhengig av at testutstyret fungerte som det skulle når testene ble utført og at nødvendige forberedelser er ble gjennomført korrekt. Testene ble utført på Laboratorium for utmatting, brudd og mekanisk karakterisering ved NTNU (Utmattingsslaben). Mangel på erfarne teknikere og uforutsigbar tilgjengelighet på noe av utstyret kunne potensielt utgjort begrensninger for gjennomføringen av testene. Det krevdes også gjennomført HMS-kurs, risikovurdering (se vedlegg A) og opplæring i bruk av utstyr for å få tilgang til maskinen som ble brukt i testingen.

2 Teori

2.1 Materialprøving og mekaniske egenskaper

Dagens konstruksjoner er utsatt for belastninger av større eller mindre grad (Industriskolen, 2018). I mange tilfeller er kravene til sikkerhet og styrke strenge. For å sikre at konstruksjonene tåler belastningene de blir utsatt for, må de testes i så realistiske forhold som mulig.

Materialprøving er prøvemetoder som gjøres for å kartlegge de mekaniske egenskapene til materialer (Store norske leksikon, 2023). Mekaniske egenskaper er de egenskapene som beskriver materialets reaksjon på ytre mekaniske krefter. Noen av de viktigste er flytegrense, bruddforlengelse, bruddfasthet, duktilitet, elastisitetsmodul, utmattingsfasthet og seighet. Prøving av de mekaniske egenskapene vil kartlegge og avgjøre i hvilken grad materialet egner seg til et bestemt formål.

2.1.1 Destruktive og ikke-destruktive prøvemetoder

Det finnes flere ulike prøvemetoder, til ulike formål. Det skilles i hovedsak mellom destruktive og ikke-destruktive prøvemetoder (Falck-Ytter, 1984). Ikke-destruktive prøvemetoder brukes for å avdekke usynlige feil som sprekker, porer og hulrom, uten å påvirke egenskapene til arbeidsstykket. Eksempler på ikke-destruktive prøvemetoder er røntgenprøving, ultralydprøving, tetthetsprøving og akustisk emisjon.

Destruktive prøvemetoder utføres for å forstå en prøves ytelse eller materialeegenskaper (TWI, 2023). Metodene brukes ofte for materialkarakterisering, feilundersøkelser, validering, og utgjør en sentral del av ingeniørkritiske vurderinger. Ved destruktiv prøving brukes prøvestykker som er forarbeidet, og som blir deformert eller ødelagt under prøvingen (Falck-Ytter, 1984). Innenfor destruktiv prøving skiller vi gjerne mellom statiske og dynamiske prøvemetoder. Ved statiske prøvemetoder holdes belastningen konstant eller forandres langsomt, slik som strekkprøving og hardhetsprøving. De dynamiske prøvemetodene har hurtige belastningsvariasjoner- eller økninger, eksempelvis utmattingsprøving og slagseighetsmåling.

Dette prosjektet vil anvende og fokusere på to destruktive prøvemetoder; strekkprøving og bøyep prøving.

2.2 Sveis

Sveis er en sammenføyningsmetode som brukes på metaller og plast (Halmøy mfl., 2023). Sveising kan deles inn i to hovedgrupper, pressveising og smeltesveising, hvor forskjellen er tilstanden materialet er i under selve sveiseprosessen. Ved pressveising blir materialet presset sammen under deformasjon i fast tilstand. Ved smeltesveising blir delene oppvarmet til smeltetemperatur og flyter deretter sammen. Overflatespenningene sørger for at sammenføyingen holder, dermed er ikke ytre press nødvendig.

Smeltesveising er en enkel metode siden utstyret ikke skal sørge for ytre press. Likevel blir det et overgangsområde mellom sveis og grunnmaterialet. Dette er den varmegpårvikede sonen, også kalt HAZ-sonen (Heat Affected Zone). Området får egne mekaniske egenskaper sett i forhold til grunnmaterialet og selve sveisen. Smeltesveising som hovedmetode består av flere underordnede metoder, blant annet strålesveising.

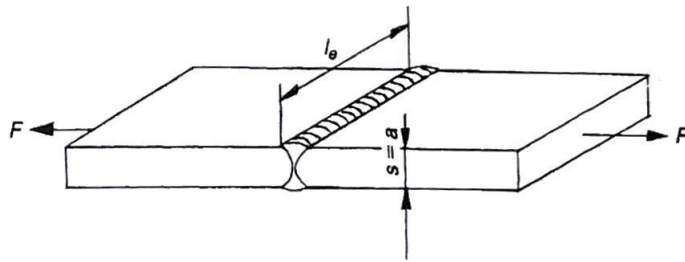
Strålesveising er en form for smeltesveising og er igjen delt opp i to typer, basert på energitilførselen (Wikipedia, 2022). Den ene er laserstrålesveising, hvor energien kommer fra en laser. Den andre er elektronstrålesveising (EB sveising) hvor energien kommer fra elektroner akselerert i et elektrisk felt i vakuum. Strålesveising er generelt en kostbar sveisemetode. Prosessen er derimot hurtig, med en konsentrert stråle. Resultatet blir en smal og dyp sveisefuge. I dette prosjektet vil lasersveising av buttsveis bli benyttet.

2.2.1 Lasersveising

Lasersveising er en prosess der en laser tilfører en konsentrert varmestråle, fokusert mot området mellom to metalleder som skal sammenføres (Kumaravel Kalaiselvan mfl., 2021). Det er en sveisemetode som er basert på en høy energikonsentrasjon som gjør at HAZ-sonen blir smal. Prosessen kan bli utført uten vakuum, og med stor fleksibilitet. Derfor er dette en sveiseteknikk som er godt utbredt i industrien og spesielt egnet for produksjon av romfartskomponenter. Fordelene er høy sveisehastighet, presise sveiser, smal sveisesøm og liten HAZ-sone. Det gjør at prosessen er optimal når det stilles krav til lav temperaturpåvirkning, samt minimale forandringer av det sveiste elementet.

2.2.2 Buttsveis

Dette delkapitlet baserer på *Maskindeler 1* (Dørum, 2001). Buttsveis er en type bindesveis. Karakteristisk for buttsveis er at tverrsnittet blir lik platetykkelsen til platene som sammenføres. Det fører til at sveisen blir utsatt for de samme spennin-
gene som grunnmaterialet. Det er opp til fire spenningskomponenter som kan oppstå i en sveis. Hvilke spenningskomponenter sveisen blir utsatt for vurderes ut fra hvilke ytre belastninger sveisen blir utsatt for. En enkel strekkpåkjent buttsveis (se figur 2.1) vil bare ha én spenningskomponent.



Figur 2.1: Strekkpåkjent buttsveis med symboler. Hentet fra (Dørum, 2001).

Her er l_e sveiselengden, $s = a$ er platetykkelsen og F er strekkraft. Sveis er ofte et svakt punkt i en forbindelse og for buttsveiser blir det antatt at det svakeste punktet er grunnmaterialet like ved sveisen, altså HAZ-sonen.

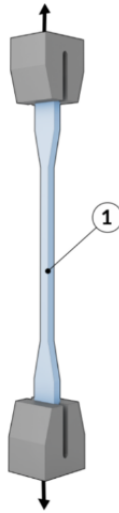
2.3 Strekkprøving

Strekkprøving er en standardisert og ryddig testmetode for å avdekke og vurdere materialers styrke og stivhet (Grøn, 2022). Testen utføres ved at et prøvestykke utsettes for en kontinuerlig økende strekkraft frem til brudd oppstår. Underveis i prøveforløpet måles kraft og forlengelse. Detaljert testprosedyre er oppgitt i aktuelle teststandarder. Standarder brukes som veiledning for blant annet dimensjonering av prøvestykker, testoppsett og prosedyre.

Ettersom det fra en enkel strekkprøve kan avdekke mange mekaniske egenskaper er strekkprøving relevant ved flere formål. Data fra strekkprøver er aktuelt ved materialvalg og karakterisering av nye materialer. Dataene kan eksempelvis brukes til sammenligning mellom ulike materialalternativer, vurdere konsistens i produksjonen eller for å avgjøre om materialet oppfyller bestemte krav.

Prøvestykket har ofte sirkulært eller rektangulært tverrsnitt og festes i testmaskinen med passende innfestninger. Størrelse og dimensjoner på prøvestykket varierer

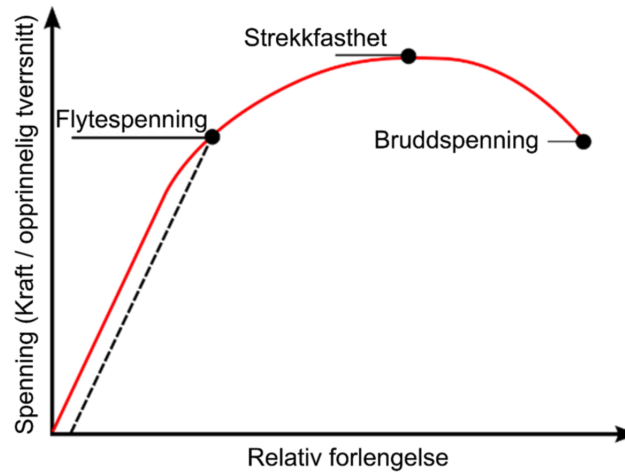
og tar utgangspunkt i valgt standard og tilgjengelig testutstyr. På figur 2.2 under vises et prøvestykke (1) som er innfestet i hver ende. Den ene enden av prøvestaven utsettes for en kraft med konstant forskyvning. Strekkprøven kan også styres etter en konstant last. I motsatt ende er det ingen bevegelse, men her måles kraften prøvestykket utsettes for (Michigan Technological University, 2023). Type innfestninger vil variere ut fra prøvegeometrien. Prøvestykket skal festes på en slik måte at belastningen virker mest mulig aksialt.



Figur 2.2: Prøvestykke med innfestninger i hver ende. Hentet fra (Manufacturing Guide Sweden AB, 2023).

2.3.1 Spenning-tøyning diagram

Hovedresultatet fra en strekkprøve er et spenning-tøyning diagram. Kurven baserer seg på registrerte data under testen for forskyvning og kraft. Ved hjelp av digitale verktøy beregnes dette om til nominell spenning og nominell tøyning. Figur 2.3 på neste side illustrerer et typisk spenning-tøyning diagram for duktile materialer.



Figur 2.3: Typisk spenning-tøyning diagram for duktile materialer. Hentet fra (Lohne, 2023b).

Tøyning, eller relativ forlengelse, vises langs den horisontale aksene og er oppgitt i %, men det er også vanlig å oppgi dimensjonsløs, eller mm/mm. Spenningen vises langs den vertikale aksene og er ofte oppgitt i SI-enheten Pascal. Nødvendig kraft for å forlenge prøvestaven med konstant hastighet vil endre seg gjennom testforløpet. Den nominelle spenningen på et sted i prøven fås ved å dividere denne kraften på det opprinnelige tverrsnittsarealet (likning 2.1) (Norman E. Dowling mfl., 2019).

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Tøyning kan beregnes fra endringer i prøvestykkets parallell-lengde, L_c , eller et mindre måleområde innefor L_c . Denne lengdeendingen betegnes δL . Nominell tøyning er gitt ved likning 2.2.

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta L}{L_c} \quad (2.2)$$

Fra spenning-tøyning diagrammet kan man finne en rekke materialegenskaper. For denne rapporten er det aktuelt å undersøke elastisitetsmodul, flytegrense, strekkfasthet, seighet, bruddspenning og bruddtøyning.

Elastisitetsmodul

For de fleste materialer er spenning-tøyning kurven en rett linje i det elastiske området, som betyr at tøyningen er proporsjonal med den påførte spenningen. Forholdet mellom spenning og tøyning i det lineær-elastiske området er gitt ved Hookes lov (Terjesen, 2021):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

hvor E er elastisitetsmodulen (E-modulen). E-modulen er med andre ord forholdet mellom spenning og tøyning (Ormestad, 2023). E-modulen kan også måles som stigningen til kurven i det elastiske området i spenning-tøyningsdiagrammet (University of Birmingham, 2023).

E-modulen er et mål på materialers motstand mot elastisk deformasjon. Nærmere bestemt et mål på stivheten til materialet. Desto høyere E-modul, desto stivere materiale (The Efficient Engineer, 2023).

E-modulen er en sentral materialeegenskap og kalles også Young-modulen. Det er ofte ønskelig med lavest mulig elastiske deformasjoner. Derfor er dette en sentral parameter som må tas i betraktning i materialvalgsprosessen.

Flytegrense

Flytegrensen forteller hvor mye et materiale tåler før plastisk deformasjon begynner (The Efficient Engineer, 2020). Mange konstruksjoner og komponenter er utformet for å sikre at de kun deformeres elastisk. Dette gjør flytegrense til et vanlig kriterium for å definere feilmodus i tekniske konstruksjoner (Xometry, 2023b). Det finnes flere ulike måter å bruke spenning-tøyning diagrammet for å definere flytespenningen til et materiale. Den kan estimeres ved å observere punktet hvor den lineære delen av kurven slutter og hvor den ikke-lineære delen begynner. Det er likevel ikke alltid mulig å identifisere overgangen fra elastisk til plastisk deformasjon på en spenning-tøyning kurve. For materialer som ikke har en tydelig overgang er det vanlig å bestemme flytegrensen ved bruk av 0,2%-metoden (Terjesen, 2021). Flytegrensen finnes da ved å lage en linje med samme stigningstall som elastisitetsmodulen som er forskyvet 0,2% til høyre i spenning-tøyning diagrammet. Skjæringspunktet mellom denne linjen og spenning-tøyning kurven gir den konvensjonelle flytegrensen. Dette kalles også for 0,2% flytespenningen eller den konvensjonelle flytespenningen, og er markert til venstre i spenning-tøyning diagrammet i figur 2.3 (Lohne, 2023b).

Strekfasthet

Den største nominelle spenningen et materiale tåler før brudd kalles for strekkfasthet (Husø, 2022). I spenning-tøyning diagrammet vises dette som kurvens høyeste verdi (se figur 2.3). Det er ved dette punktet innsnevringen i prøvestykket begynner, også kjent som “necking”. Ingeniører dimensjonerer som regel komponenter etter materialets flytegrense for å sikre at den ikke utsettes for varig deformasjon under bruk. Strekkfastheten forteller derimot hvilken spenning som må oppnås før fullstendig brudd i materialet oppstår (Xometry, 2023a). Fullstendig brudd i maskinkonstruksjoner kan forårsake ulykker og føre til store økonomiske tap. Derfor er det viktig å kjenne til strekkfastheten, for å sikre at materialet tåler de forventede belastningene (TUV Rheinland, 2018).

Bruddgrense

Bruddspenningen viser spenningen målt ved brudd under strekkprøving og kan observeres som det siste punktet i spenning-tøyning diagrammet (se figur 2.3). Symbolene for bruddspenning og bruddtøyning er henholdsvis σ_B og ε_B . Det er verdt å merke seg at bruddspenningen i det nominelle spenning-tøyning diagrammet for duktile materialer ikke vil være en reell verdi for hvor mye belastning et materiale tåler, ettersom kraften divideres på det opprinnelige tverrsnittsarealet til prøvestykket (Nuclear Power, 2023). På grunn av innsnevring vil tverrsnittsarealet være redusert i så stor grad at den reelle spenningen ved brudd egentlig er større enn ved strekkfastheten. Ved bruddpunktet kan en også lese av bruddtøyningen, som igjen sier noe om materialets duktilitet. Duktilitet blir beskrevet nærmere i delkapittel 2.3.3.

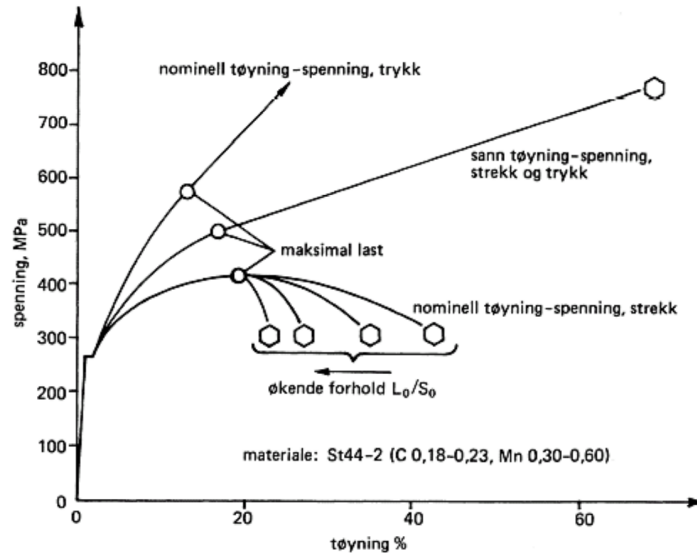
Seighet

Seighet, også kalt for tøyningsenergitetthet, er et materials evne til å absorbere energi før brudd. Dette kan finnes matematisk ved å betrakte arealet under spenning-tøyning kurven, eksempelvis ved trapesmetoden eller Simpsons metode. Et materiale med høy seighet kan absorbere en stor mengde energi før brudd, og det har en god balanse mellom høy styrke og høy duktilitet (The Efficient Engineer, 2020). En annen måte å definere seighet på er nødvendig energi for å få brudd i materialet (Engineering Materials-Tribology-Design, 2020).

2.3.2 Sann spanning-tøyning diagram

Prøvestykker vil under en strekktest kontinuerlig endre dimensjoner (The Efficient Engineer, 2020). Tverrsnittarealet vil bli mindre, samtidig som parallell-lengden, L_c , forlenges. Nominelle spanning-tøyning kurver tar ikke hensyn til disse små og kontinuerlige endringene, og vil dermed kun være tilnærminger for reelle verdier for spanning og tøyning. Et sann spanning-tøyning diagram representerer de faktiske spanningene og tøyningene som oppstår i et materiale under strekkprøving. Det vil være aktuelt å vurdere sann spanning-tøyning kurver i tilfeller hvor det oppstår betydelig plastisk deformasjon. Sann verdier brukes blant annet i endelige element-analyser (FE analyser) som modellerer store belastninger.

Figur 2.4 viser et eksempel på en nominell flytekurve sammenliknet med den sanne flytekurven. Kurvene er for bløtt stål. I diagrammet vises det at kurvene er tilnærmet like i det elastiske området frem til det oppnår flyt. En merkbar forskjell mellom de to kurvene er at spenningen reduseres etter maksimal spanning for den nominelle kurven, mens kurven for sann spanning-tøyning fortsetter å øke. Ved dette punktet oppstår det en innsnevring på prøvestykket, som øker hastigheten på reduksjonen av tverrsnittsarealet (Johansen, 2010).



Figur 2.4: Sann- og nominell spanning-tøyning kurve av bløtt stål. Hentet fra (Johansen, 2010).

Det er krevende å gjøre faktiske målinger på øyeblikkelig tverrsnittsareal under en strekktest. Basert på det nominelle spanning-tøyning diagrammet er det likevel mulig å beregne den sanne spanning-tøyning kurven. Utledningen av sann spanning

og tøyning baserer seg på definisjonene gitt i boken *Mechanical Behavior of Materials* (Norman E. Dowling mfl., 2019). Sann spenning, σ_s , er gitt ved

$$\sigma_s = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

der A er det reelle tverrsnittsarealet ved et øyeblikk i testforløpet og F er strekkraften. Om det antas at prøvestykket har konstant volum kan likning 2.4 justeres. Denne antagelsen er gyldig både i det elastiske og plastiske området frem til punktet hvor maksimal spenning inntreffer. Innenfor dette området gjelder:

$$A \cdot L = A_0 \cdot L_0 \quad (2.5)$$

L er prøvestykkets lengde mens A_0 og L_0 henholdsvis er prøvestykkets opprinnelige tverrsnittsareal og lengde. Likning 2.5 kan skrives om til

$$A = \frac{A_0 \cdot L_0}{L} \quad (2.6)$$

og substitueres i likningen for sann spenning (likning 2.4):

$$\sigma_s = \frac{F \cdot L}{A_0 \cdot L_0} \quad (2.7)$$

Videre kan likningen for nominell tøyning (likning 2.2) skrives om til:

$$\varepsilon_n = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (2.8)$$

Likning 2.8 kan brukes for å finne en likning for sann spenning som en funksjon av nominell spenning og nominell tøyning. Likning 2.8 innsatt i likning 2.7 gir

$$\sigma_s = \sigma_n \cdot (\varepsilon_n + 1) \quad (2.9)$$

For å utlede en likning for sann tøyning må det tas hensyn til at den opprinnelige lengden av prøvestykket kontinuerlig endres ved hvert punkt gjennom testforløpet. Sann tøyning kan beregnes ved å dele strekktesten i flere trinn, for å beregne endringen tøyning for hvert trinn basert på lengden ved starten og slutten av trinnet. Endelig tøyning ved det siste trinnet beregnes ved å summere alle trinnene:

$$\varepsilon_n = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i}{L_i} \quad (2.10)$$

og kan defineres matematisk ved integrasjon:

$$\varepsilon_n = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} \quad (2.11)$$

som gir

$$\varepsilon_n = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2.12)$$

Likning 2.12 kan videre skrives om som en funksjon av den nominelle tøyningen:

$$\varepsilon_s = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (2.13)$$

Det betyr at et sann spenning-tøyning diagram kan utformes ved bare å kjenne til opprinnelig tverrsnittareal og parallell-lengde av prøvestaven før utføringen av strekktesten, samt paralell-lengden etter.

2.3.3 Duktilitet

Duktiliteten til et materiale er et mål på hvor lett et materiale lar seg forme, uten at det går til brudd (Lohne, 2023a). Duktilitetsmål kan brukes i forbindelse med materialvalg, særlig for komplekse konstruksjoner. I sammenheng med strekkprøving er det mulig å hente ut to mål på duktilitet. Det ene er bruddforlengelsen, A , og det andre er bruddkontraksjonen, Z . Forskjellen mellom bruddforlengelse og bruddkontraksjon ligger i deres referanseområder (Johansen, 2010). Bruddforlengelse tar utgangspunkt i lengden av parallellområdet til en strekkstav, mens bruddkontraksjon baserer seg på tverrsnittsarealet av parallellområdet. Både bruddforlengelsen og bruddkontraksjonen baserer seg på enkle lengdemålinger .

Prosentvis bruddforlengelse, A , også kjent som relativ bruddforlengelse, er definert som

$$A = \frac{L_c - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (2.14)$$

der L_c er målt lengde etter brudd og L_0 er den opprinnelige lengden.

Prosentvis bruddkontraksjon, Z , også kalt tverrsnittskontraksjon, er definert som

$$Z = \frac{A_0 - A_c}{A_0} \cdot 100 \quad (2.15)$$

der A_c er det minste tverrsnittsarealet målt etter brudd og A_0 det opprinnelige tverrsnittsarealet.

2.4 Bøyeprøving

Ingeniører har ofte en ønske om å forstå ulike aspekter av oppførselen til materialer (Instron, 2023b). Dette vil som regel ikke avdekkes av kun en enkel uniaksial strekk- eller kompresjonstest. Bøyeprøving er nyttig av den grunn at prøven utsettes for en kompleks kombinasjon av krefter. Både strekk-, trykk- og skjærkrefter vil oppstå når prøven bøyer seg. Denne kraftkombinasjonen gir realistiske belastningssituasjoner, og dermed godt grunnlag for å evaluere materialers oppførsel under gitte forhold.

Bøyeprøving, også kalt bøyetesting, er en enkel og rimelig kvalitativ test som kan brukes til å vurdere både duktiliteten og kvaliteten til et materiale (Mathers, 2004). Metoden brukes ofte som en kvalitets- og kontrolltest for buttsveis. En konstruksjon eller en konstruksjonsdel vil deformeres ved bøying når den blir utsatt for krefter vinkelrett på lengderetningen (Store norske leksikon, 2019a). Deformasjonen fører til spenninger. Kreftene vokser med økende bøying, og til slutt kan det oppstå brudd. Spenningene en konstruksjonsdel beregningsmessig har ved brudd, kalles dens bøyefasthet.

Ved bøyeprøving måles oppførselen til materialer som utsettes for enkel belastning i en universell testmaskin. Underveis i prøveforløpet måles kraft og vertikal forskyvning. Nødvendig kraft for å bøye prøven med konstant hastighet vil endre seg gjennom testforløpet. Datapunkter fra målingene brukes ofte for å plote kraft-forskyvning diagram. Disse diagrammene er svært nyttige for å avdekke de mekaniske egenskapene til de testede materialene. For eksempel vil fall i kraft indikere sprekke eller brudd i prøvestykket.

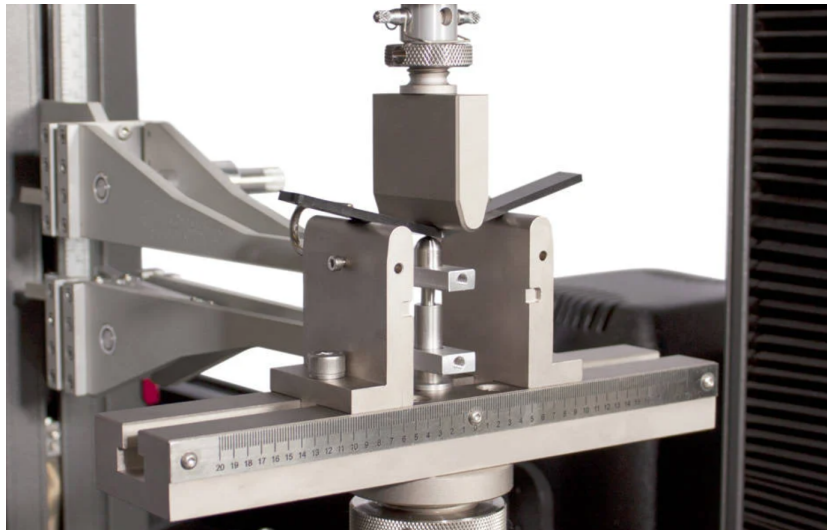
Dimensjonene til prøvene og utstyret som brukes under bøyeprøvingen er gitt i ASTM- eller ISO- standarden som brukes. I dette prosjektet prøves bøyeprøvene etter standarden NS-EN ISO 5173:2023; *Destruktive prøvinger av sveiseforbindelser i metalliske materialer, bøyeprøvinger* (ISO 5173:2023) (Standard Norge, 2023). Denne standarden vil være grunnlaget for beskrivelse av teorien knyttet til dimen-

sjonering av prøvestykker og testoppsett, og gjennomføringen av tester, som vil bli beskrevet i delkapittel 2.4.2. Den praktiske utførelsen av bøyetestene blir beskrevet i metoddelen i kapittel 4.4.

2.4.1 3-punkts bøyetesting

Prøvemaskinene eller pressene bøyep prøvingen utføres i, kan ha ulike innretninger ut fra hvordan kraften skal påføres prøvestykket (Instron, 2023b). Bøyetesting kan deles inn i to kategorier ut fra hvilken bøyefikstur som brukes; 3-punkts og 4-punkts bøyetest. Hvilken bøyefikstur som er passende å bruke avhenger av hvilket type materiale og prøvestykke som testes. Dette prosjektet vil ha fokus på, og benytte seg av, 3-punkts bøyetesting som metode.

Ved en 3-punkts bøyetest brukes en 3-punkts bøyefikstur bestående av to parallelle støtter. Kraften påføres ved hjelp av et oververktøy på midtpunktet av prøvestykket. En 3-punkts bøyefikstur er vist i figur 2.5.



Figur 2.5: 3-punkts bøyefikstur. Hentet fra (Instron, 2023a).

Området med jevn spenning på prøvestykket er lite og konsentrert under senterbelastningspunktet. Bøyetesten vil gi strekkspenning i den konvekse siden av prøven, og trykkspenninger i den konkave siden. Langs midtlinjen vil det oppstå et område med skjærspenninger. For å sikre at den primære svikten kommer fra strekk- eller trykkspenning, er det viktig å minimere skjærspenningen. For å oppnå dette, er det nødvendig å kontrollere forholdet mellom avstanden mellom senterpunktet til de parallelle støttene, s , og tykkelsen til prøvestykket, t . For de fleste materialer anses et forhold på $s/t = 16$ som akseptabelt.

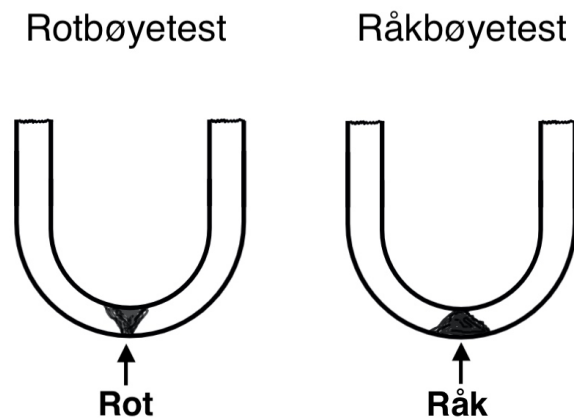
Bøyeprøving av et materiale gjør det mulig å bestemme materialets bøyestyrke, duktilitet, bruddstyrke og kvalitet (Testresources, 2023). Disse egenskapene kan brukes til å avgjøre om et materiale vil svikte ved belastning, og er spesielt viktige i en konstruksjonsprosess som involverer seige materialer som er belastet med bøyekrefter. Dersom et materiale viser tegn til sprekker eller går til brudd under en 3- eller 4-punkts bøyetest, er det god grunn til å anta at materialet vil svikte ved bruk i enhver applikasjon. Dette kan potensielt resultere i katastrofal svikt.

2.4.2 Transversal rot- og råkbøyetest

Det finnes mange ulike typer bøyetest som varierer basert på utførelsesmetoden og formen til prøvestykkene. Blant disse er transversal rot- og råkbøyetest for buttsveis, som er de to testtypene som gjennomføres i dette prosjektet.

Rot og råk

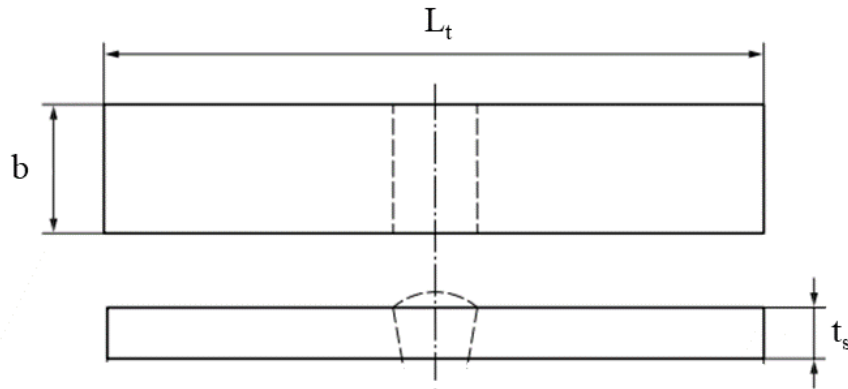
En transversal rotbøyetest utføres med rot-siden av buttsveisen i strekk (engelsk: root bend), og en transversal råkbøyetest utføres med råk-siden i strekk (engelsk: face bend) (Constructionmanuals, 2023). De to testtypene er illustrert i figur 2.6.



Figur 2.6: Rot- og råkbøyetest

Prøvegeometri

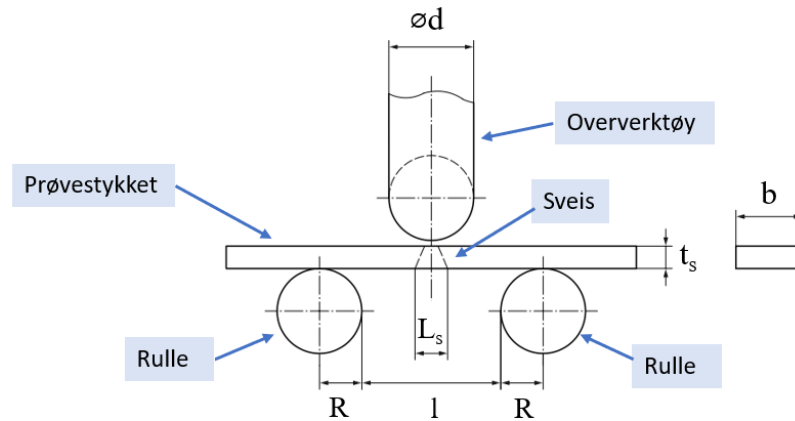
For transversal rot- og råkbøyetest er prøvestykkene rektangulære (Standard Norge, 2023). Figur 2.7 viser en illustrasjon av den foreskrevne geometrien til rot- og råkbøyeprøvene. L_t viser til totallengden av prøvestykket, b er bredden av prøvestykket og t_s tykkelsen av prøvestykket. Sveisens akse skal plasseres langs senterlinja til prøvestykket.



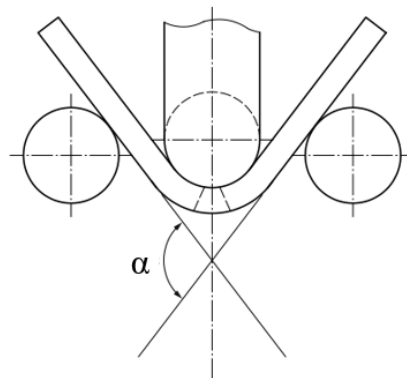
Figur 2.7: Transversal rot- og råkbøyeprøve for buttsveis. Utarbeidet fra (Standard Norge, 2023).

Testoppsett

Testoppsettet for rot- og råkbøyetesting er standardisert, og det er spesifikke krav som må oppfylles (Standard Norge, 2023). En illustrasjon av testoppsettet og nedbøyningen er vist i figur 2.8, sammen med symbolforklaringer som er oppført i tabell 2.1.



(a) Testoppsett



(b) Nedbøyning

Figur 2.8: Testoppsett for transversal rot- og råkbøyetest. Utarbeidet fra (Standard Norge, 2023).

Tabell 2.1: Symbolforklaring til testoppsettet for bøyeprovning

Symbol	Forklaring	Enhet
l	lengden mellom rullene, kant til kant	mm
R	radius til rullene	mm
L_s	maksimum bredde av sveisen etter maskinering	mm
t_s	tykkelsen av prøvestykket	mm
$\varnothing d$	diameteren til oververktøyet	mm
b	bredden av prøvestykket	mm

Figur 2.8a viser hvordan testoppsettet skal se ut. Prøvestykket skal plasseres på de to parallelle rullene, med sveisens akse sentrert mellom rullene, direkte under oververktøyet. I følge standarden skal radien til rullene være minst 20 mm.

Prøvestykket bøyes ved at oververktøyet gradvis og kontinuerlig påfører en belastning vinkelrett på overflaten til prøvestykket, som vist i figur 2.8b. Prinsipielt skal prøvestykkene bøyes til de oppnår plastisk deformasjon. Bøyetesten anses som fullført når bøjevinkelen α , i figur 2.8b, er omtrent 180° , eller når oververktøyet har passert den horisontale akse til rullene.

Lengden mellom rullene i bøyefiksturen, l , skal være lik verdien som oppnås med likning 2.16:

$$d + 2t_s + 1 \leq l \leq d + 3,5t_s, \quad (2.16)$$

der d er diameteren på formeren og t_s er tykkelsen på prøvestykket.

Dimensjonering av prøvestykker

Prøvestykkets tykkelse t_s skal være lik tykkelsen av grunnmaterialet ved siden av sveiseskjøten, opp til maksimalt 30 mm (Standard Norge, 2023).

Den totale lengden L_t til prøvestykket skal samsvare med likning 2.17:

$$L_t \geq l + 2R, \quad (2.17)$$

der l er avstanden mellom rullene prøvestykket er plassert på, og R er radien til rullene (se figur 2.8).

Bredden b til prøvestykket skal tilfredsstille likning 2.18:

$$b \geq 4t_s \quad (2.18)$$

3 Materialer

Materialene som undersøkes i dette prosjektet er Inconel Alloy 617 (Alloy 617) og Inconel Alloy 625 (Alloy 625). Begge materialene er nikkelbaserte superlegeringer med høy styrke og kvalitet. Den kjemiske sammensetningen av de to legeringene er noe ulik, noe som gir forskjellige materialegenskaper. De neste delkapitlene vil gi en detaljert teoretisk beskrivelse av de to legeringene, samt sammenligne de mekaniske egenskapene.

3.1 Alloy 617

Alloy 617 er en fast, forsterket, nikkel-krom-koboltmolybden legering som gir en god kombinasjon av høytemperaturstyrke og motstand mot oksidasjon (Specialmetals, 2023a). I tillegg har legeringen utmerket motstand mot et bredt spekter korrosive miljøer, og er lett sveisbar med konvensjonelle sveiseteknikker.

Kjemisk sammensetning

Alloy 617 har et høyt innhold av nikkel og krom, som gjør den motstandsdyktig mot mange oksiderende og reduserende medier. Aluminiumet bidrar til god oksidasjonsmotstand ved høye temperaturer, mens kobolt og molybden sørger for legeringens styrke. En detaljert oversikt over den kjemiske sammensetningen av Alloy 617 er vist i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Kjemisk sammensetning av Alloy 617. Utarbeidet fra (Specialmetals, 2023a).

Grunnstoff	Andel [%]
Nikkel	44,5 min
Krom	20,0-24,0
Kobolt	10,0-15,0
Molybden	8,0-10,0
Aluminium	0,8-1,5
Karbon	0,05-0,15 maks.
Jern	1,0 maks.
Mangan	1,0 maks.
Silikon	1,0 maks.
Svovel	0,015 maks.
Titan	0,6 maks.
Kobber	0,5 maks.
Bor	0,006 maks.

Fordeler ved Alloy 617

Legeringen har gode mekaniske egenskaper over et bredt temperaturområde, som er en av dens særegenheter (Newman, 2023). Styrken opprettholdes ved høye temperaturer, også i korrosive miljøer.

Legeringen viser imponerende strekk- og flytestyrke over et stort spekter av driftstemperaturer. Tester viser at Alloy 617 beholder rundt 80% av strekkfastheten selv ved 600°C. Dette gjør at det er mindre sannsynlig at legeringen får brudd eller sprekker når den utsettes for ekstrem varme, sammenlignet med andre materialer. Flytestyrken synker kun med rundt 20% over 600°C-teskelen, noe som gjør at kapasiteten til å tåle belastninger er høy. Dette er av spesiell betydning med tanke på legeringens evne til å motstå utmattingssvikt.

Bruksområder

Alloy 617 er på grunn av dens motstands- og tilpasningsdyktighet et godt valg til et bredt spekter av bruksområder (Newman, 2023). Legeringen danner et oksidlag når den reagerer på varme, som beskytter den mot korrosjon og oksidasjon ved temperaturer opp til 1150°C. Samtidig opprettholder legeringen sin styrke selv under disse forholdene. Legeringen er dermed et populært valg for bruk i ekstreme høytemperatur- og høyspenningsmiljøer. Vanlige bruksområder inkluderer kraftproduksjon (atomkraft og fossilt brensel), petrokjemisk prosessering, salpetersyreproduksjon og molybdenraffinering.

Den kjemiske sammensetningen og behandlingen forhindrer at legeringen deformeres under belastning. Dette forlenger levetiden sammenlignet med andre materialer, og gjør det til et kostnadseffektivt og trygt valg.

3.2 Alloy 625

Kjemisk sammensetning

Alloy 625 er i likhet med Alloy 617 en nikkel-krom legering. Skulle det kreves enda høyere ytelse, har Alloy 625 en lignende kjemisk sammensetning som Alloy 617, men med tilsetningen av niob for å forbedre styrken uten behov for spesifikke varmebehandlingsprosesser (Specialmetals, 2023b). Den kjemiske sammensetningen av legeringen er vist i tabell 3.2.

Tabell 3.2: Kjemisk sammensetning av Alloy 625. Utarbeidet fra (Specialmetals, 2023b).

Grunnstoff	Andel [%]
Nikkel	58,0 min
Krom	20,0-23,0
Jern	5,0 maks.
Molybden	8,0-10,0
Niob (pluss Tantal)	3,15-4,15
Karbon	0,10 maks.
Mangan	0,50 maks.
Silikon	0,50 maks.
Fosfor	0,015 maks.
Svovel	0,015 maks.
Aluminium	0,40 maks.
Titan	0,40 maks.
Kobolt	1,0 maks.

Fordeler ved Alloy 625

Alloy 625 brukes for sin høye styrke, enestående korrosjonsbestandighet og god fabrikkasjonsevne ved alt fra kryogene til forhøyede temperaturer opp til 982°C (Specialmetals, 2023b).

Forskjellen i sammensetning fra Alloy 617 er at i Alloy 625 er niob brukt som tilsetning (Corrotherm, 2023b). Når dette kombineres med molybden, endres legeringens atommatrise. Denne endringen gir legeringen spesielt høy styrke uten behov for forsterkende varmebehandling. Det høye nikkelinnholdet gjør at legeringen er immun mot klorindusert spenningskorrosjon.

Sammenlignet med andre nikkel-baserte legeringer har legeringen bedre sveisbarhet (Jacquet, 2023). Selv i sveiset tilstand er legeringen motstandsdyktig mot intergranulær korrosjon. Legeringen har også høy grad av formbarhet.

Bruksområder

Legeringens enestående korrosjonsmotstand kombinert med høy styrke og sveisbarhet gjør den til et attraktivt valg innenfor romfart (Specialmetals, 2023b). Blant annet blir den brukt i kanalsystemer for fly, i motor- og eksosystemer, thrustersystemer, drivstoff- og hydraulikkledningsrør og i miljøkontrollsystemer. Alloy 625 er også et utmerket valg for bruk i kjemisk prosessering, marinteknikk og atomreaktorapplikasjoner (Jacquet, 2023).

3.3 Sammenligning av mekaniske egenskaper

De to legeringene har mange av de samme egenskapene. For å oppsummere kjenne-
tegnes Alloy 617 for dens utmerkede mekaniske egenskaper ved høye temperaturer,
samt god høytemperatur-motstand mot korrosjon. Alloy 625 har også god korrosjons-
og oksidasjonsmotstand og gode strekk- og utmattingsegenskaper fra lave tempera-
turer til 982°C. I tillegg har legeringen god motstand mot spenningskorrosjon, og
meget god sveisbarhet. Et utvalg av legeringenes mekaniske egenskaper ved rom-
temperatur er vist i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Mekaniske egenskaper for Alloy 617 og Alloy 625. Verdier hentet fra
(Corrotherm, 2023a) og (Corrotherm, 2023b).

Egenskaper	Alloy 617	Alloy 625
Strekkfasthet [MPa]	734	992,9
0,2% flytespenning [MPa]	322	579,2
Tverrsnittsreduksjon [%]	56	-
Forlengelse [%]	62	44
E-modul [GPa]	211	207

Tabellen viser at Alloy 625 har høyere strekkfasthet og flytespenning, og mindre
forlengelse enn Alloy 617. Både Alloy 617 og Alloy 625 er gunstige alternativer der
det er behov for materialer med høy styrke og utmerket motstand mot korrosjon
ved høye temperaturer.

4 Metode

For å analysere og avdekke materialegenskapene til de to materialene Alloy 617 og Alloy 625 etter sveising, har det blitt gjennomført to typer destruktive prøvemetoder; strekkprøving og bøyepøving. For å gjennomføre disse testene krevdes både utstyr, planlegging og forarbeid. Felles for både strekk- og bøyepøvene som har blitt gjennomført er at prøvene ble behandlet og levert av Nammo. Selve gjennomføringen av testene ble utført av bachelorgruppen på Utmattingslaben.

I starten av prosjektet ble det i samråd med Nammo, bestemt en omtrentlig størrelse på prøvene som skulle testes. Beslutningen om å benytte relativt små prøver i testingen ble tatt på bakgrunn av kostnadsbegrensninger knyttet til produksjonen av store prøver, samt for å muliggjøre gjentatte tester og oppnå et bredere spekter av resultater. Prøvenes nøyaktige dimensjonering ble utført i samsvar med gjeldende standarder, etter å ha avklart hvilken maskin og hvilke festeanordninger som skulle benyttes. Dette vil bli beskrevet for strekk- og bøyepøvene i henholdsvis delkapittel 4.3 og 4.4.

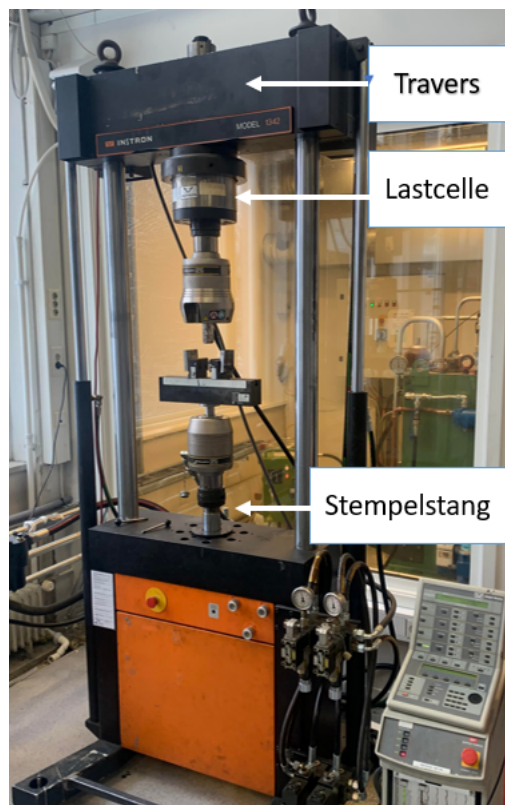
De neste delkapitlene vil først ta for seg en beskrivelse av den benyttede maskinen for utførelse av strekk- og bøyepøving. Videre vil forbehandlingen og varmebehandlingen til prøvestykkene bli redegjort. Til slutt vil oppsettet, dimensjoneringen og gjennomføringen av de to nevnte testene bli beskrevet. Metoden vil i stor grad basere seg på standardene som blir benyttet for de respektive testene.

4.1 Testutstyr

For å gjennomføre materialtestene er det nødvendig med utstyr som er i stand til å påføre og måle belastningene som påvirker prøvestykkene. Det er viktig at maskinen har tilstrekkelig lastkapasitet og samtidig opprettholde en presis og pålitelig måling av de påførte kreftene. Dette sikrer at testene kan utføres med pålitelige og representative resultater. Innfestningene må være i samsvar med prøvegeometrien for å unngå skade på prøver og maskineri, og for å sikre at testoppsettet er i samsvar med valgt standard. Aktuelt testutstyr i forbindelse med dette prosjektet finnes på Utmattingslaben.

På Utmattingslaben finnes flere universale testmaskiner som egner seg til både strekk- og bøyetesting. For å spare tid vil det være en fordel å gjennomføre både strekk- og bøyepøvene på samme maskin. Basert på legeringenes egenskaper og prøvegeometri ble det anslått at belastningene ikke ville overstige 22 kN. For å sikre

nøyaktige målinger, bør belastningen være mellom 10% og 80% av maskinens lastkapasitet. Derfor vil en maskin med en lastkapasitet på 50 kN være tilstrekkelig. Maskinen som brukes for å gjennomføre strekk- og bøyep prøving ble dermed en *Instron 1342*. Dette er en servohydraulisk maskin med en lastkapasitet på 100 kN. Ulempen ved bruk av denne maskinen var at bruk av ekstensometer ikke var mulig grunnet mangel på kompatibelt utstyr. Maskinen som ble brukt under testingen er vist i figur 4.1, her med påmontert 3-punkt bøyefikstur.



Figur 4.1: Testmaskin *Instron 1342*

Under testene vil stempelstangen beveges vertikalt, og det er kun denne delen som er i bevegelse under testforløpet. Styring av maskinen gjøres på kontrollpanelet til høyre for maskinen. Maskinen styres ved å enten bestemme en distanse eller en kraft som skal oppnås. I tillegg bestemmes hastighet og retning for bevegelsen. Lastcellen måler påført kraft og signalene fra målingene sendes via en signalomformer og gir en numerisk liste over måledataene for kraft og forskyvning.

4.2 Sveising av prøveplater og etterbehandling

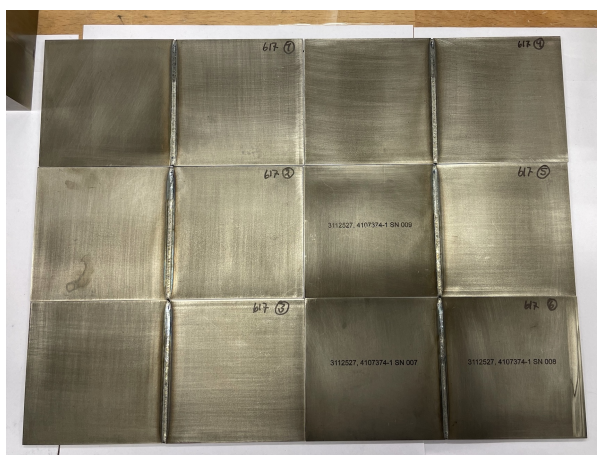
Forberedelsen av prøvestykker til strekk- og bøyep prøvingen ble gjort av Nammo på Raufoss, før de ble sendt opp til Trondheim for gjennomføring av testing.

4.2.1 Sveising og maskinering

For å få god validitet av strekk- og bøyep prøvingen, er det en rekke krav når det gjelder forberedelsen av prøvestykkene som skal testes. Prøvene skal forberedes slik at de ikke påvirker basematerialet eller sveisen. Overflatene skal maskineres på en slik måte at all overskytende sveismetall fjernes. Spesifikke krav for blant annet forbehandling av materiale, varmebehandling av prøvestykker og overflatens kvalitet er gitt i de aktuelle standardene for strekk- og bøyep prøving.

Forberedelsene startet med å sveise sammen prøveplater, for deretter å maskinere disse etter bestemte prøvedimensjoner. For strekk- og bøyep prøvene ble det sveist en ensidig buttsveis, ved bruk av lasersveising. Sveisede plater hadde lengder på 162 mm for Alloy 617 og 140 mm for Alloy 625. Sveisingen ble utført av kvalifisert fagpersonell på Raufoss.

Prøveplatene ble deretter slipt og pusset for å fjerne overflødig sveismetall. Prøveplatene ble merket med legeringstype og nummerert (se figur 4.2). Prøvestykker ble så maskinert ut fra platene, og markert med nummeret til prøveplaten og plasseringen den hadde i prøveplaten. For bøyep prøvene ble også rot- og råk-siden risset inn på prøvestykkene.

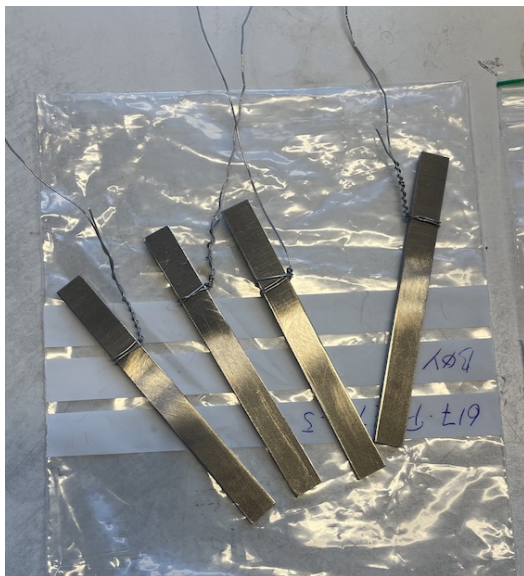


Figur 4.2: Ferdigsveiste prøveplater med nummerering. Fotografert av Nammo.

4.2.2 Varmebehandling

Formålet med dette prosjektet er å vurdere materialenes egnethet for bruk i høytemperaturområder, spesielt med tanke på anvendelsen av en av legeringene i en thruster på en rakett. For å simulere driftstemperaturen ble dermed halvparten av prøvestykkene for strekk- og bøyeprøving utsatt for en varmebehandling. Dette tilsvarte åtte varmebehandlede bøyeprøver, fire av hvert materiale. For strekkprøvene ble seks prøver varmebehandlet, tre av hvert materiale. Gjennomføringen av varmebehandlingen ble gjort på Varmelaben ved NTNU i Trondheim.

Alle prøvene ble varmebehandlet på den samme måten. Først ble prøvestykkene festet med ståltråd (se figur 4.3). Saltbadet som ble brukt var bestående av natriumnitritt og ble forvarmet til 600°C.



(a) Bøyeprøver



(b) Strekkprøver

Figur 4.3: Prøver klare til varmebehandling

Gjennomføringen av varmebehandlingen ble utført i to deler, først for bøyeprøvene og deretter for strekkprøvene. Utføringen ble gjort ved å samle ståltråden til alle prøvene, for deretter å senke de ned i saltbadet (se figur 4.4a). Lokket til saltbadet ble satt på og ståltråene ble surret rundt lokket for å hindre at de falt ned. En tidtaker ble startet for å nøyaktig registrere tidsforløpet. Etter seks minutter ble prøvene tatt ut av saltbadet og bråkjølt i en bønne med vann. Til slutt ble prøvene vasket (se figur 4.4b) og tørket, før de ble merket med materialtype og platenummer.



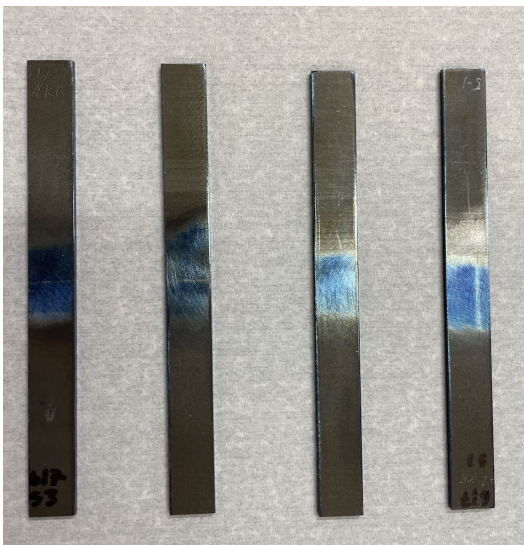
(a) Saltbadet



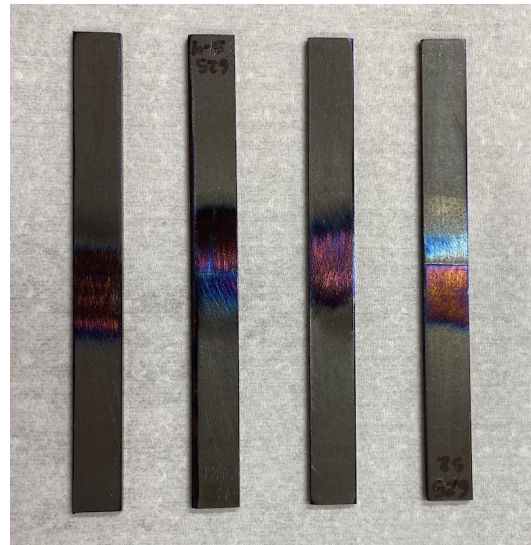
(b) Vasking

Figur 4.4: Saltbadet og vasking av varmebehandlede prøver

Prøvestykkene etter varmebehandlingen er vist i figur 4.5. Behandlingen resulterte i en betydelig mørkere farge på prøvene. Figur 4.6 viser prøvestykkene med og uten varmebehandling.

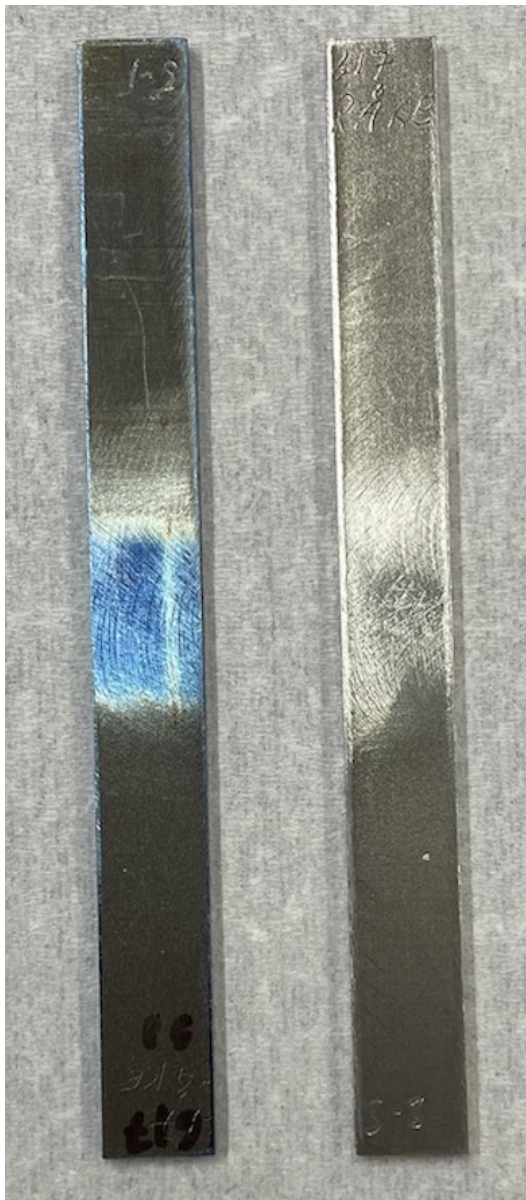


(a) Alloy 617

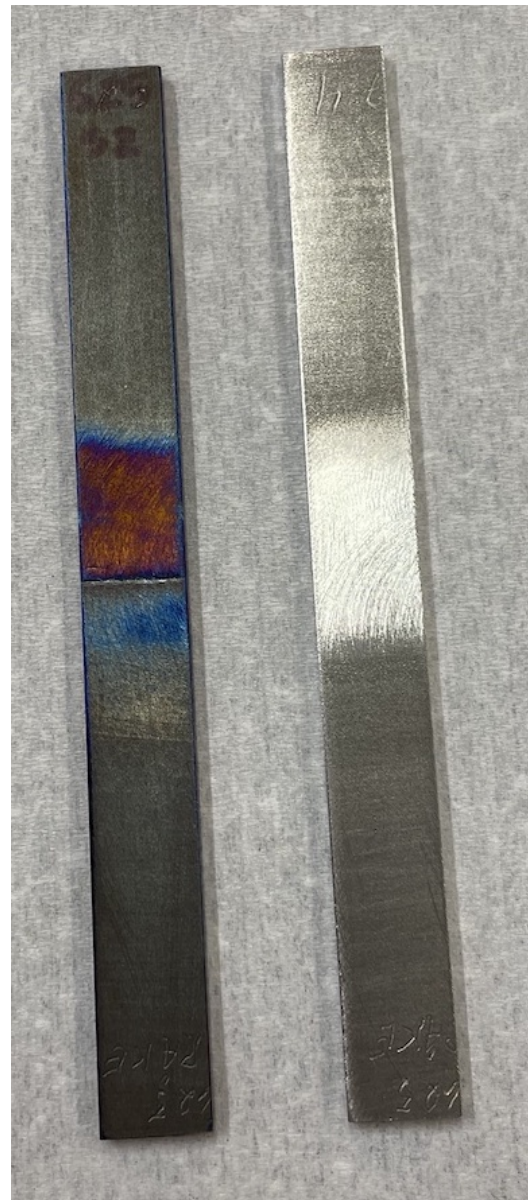


(b) Alloy 625

Figur 4.5: Bøyeprøver fra Alloy 617 og 625 etter varmebehandling



(a) Alloy 617 med (venstre) og uten (høyre) varmebehandling



(b) Alloy 625 med (venstre) og uten (høyre) varmebehandling

Figur 4.6: Prøvestykker med og uten varmebehandling til sammenligning

4.3 Strekkprøving

Metoden for strekkprøving er primært basert på NS-EN ISO 4136:2022; *Destruktiv prøving av sveis i metalliske materialer - Tverrgående strekkprøving* (ISO 4136:2022) (Standard Norge, 2022b), mens eventuelle områder som ikke er spesifisert i denne standarden, suppleres med NS-EN ISO 6892-1 2019; *Metalliske materialer — Strekkprøving — Del 1: Metode for prøving ved romtemperatur* (Standard Norge, 2020).

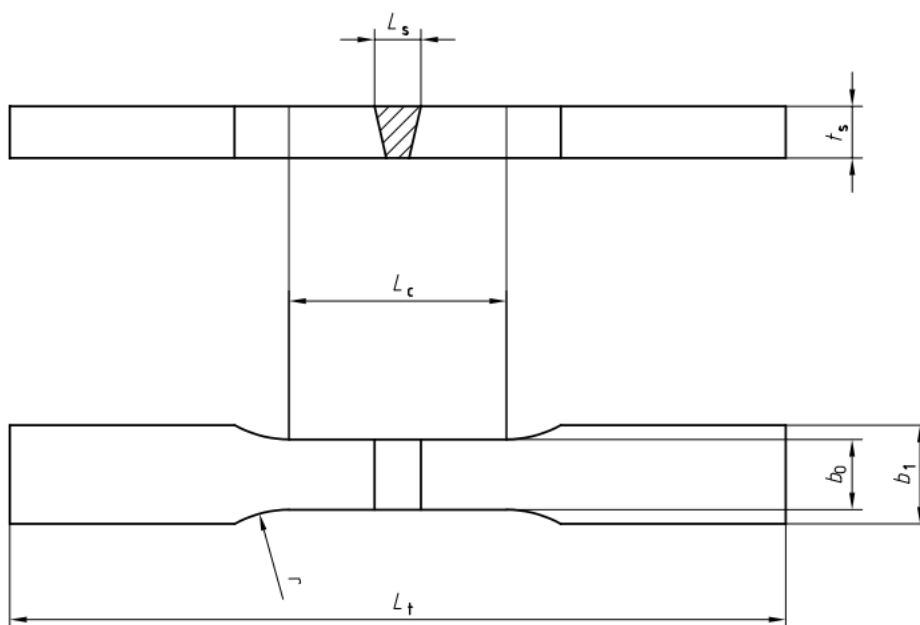
Dimensjonenring av prøvestykkene tok utgangspunkt i valgte innfestninger, standard og bedriftens ønsker i forhold til størrelse. Det ble gjennomført totalt tolv strekktester fordelt på fire paralleller. En oversikt over strekktestene som ble gjennomført vises i tabell 4.1. Alle testene er nummerert med testnummer etterfulgt av bokstaven “T” bak.

Tabell 4.1: Enkel oversikt over strekkprøver som gjennomføres i prosjektet

Test	Materiale	Test	Materiale
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
1T	617	7T	617
2T	617	8T	617
3T	617	9T	617
4T	625	10T	625
5T	625	11T	625
6T	625	12T	625

4.3.1 Dimensjonering av prøvestykker

Dimensjoneringen av prøvestykkene ble gjennomført i henhold til standarden ISO 4136:2022 (Standard Norge, 2022a). Rammebetingelser for geometrien ble satt i samarbeid med bedriften. På midten av prøvestykkene, på tvers av strekkretningen, er det en buttsveis. Prøvestykkene skulle være utformet slik at sveiseaksen etter bearbeiding var plassert i midten av prøvestykkets parallell-lengde. Prøvestykkene skulle ha en “hundebein”-formet geometri med rektangulært tverrsnitt, som illustrert i figur 4.7. Symbolforklaringer som er oppført i tabell 4.2.



Figur 4.7: Prøvegeometri for strekkprøve. Hentet fra (Standard Norge, 2022a).

Tabell 4.2: Symbolforklaring til prøvegeometri for strekkprøve

Symbol	Forklaring	Enhet
L_s	maksimal bredde på sveis etter maskinering	mm
L_t	total lengde	mm
L_c	lengden på parallellområdet	mm
t_s	tykkelsen på prøvestykket	mm
b_0	bredden på parallellområdet	mm
b_1	bredden på prøvestykkets gripeflate	mm
r	radius ved skuldrene	mm

På bakgrunn av størrelsen på platene fra leverandør, var det en begrensning for total lengde på 140 mm for Alloy 625 og 162 mm for Alloy 617. Platetykkelsen for begge legeringene var på 2 mm. L_s ble antatt å være omtrent lik null. På bakgrunn av dette kunne b_0 , b_1 og L_c bestemmes fra standarden.

I følge ISO 4136:2022 skulle r være større enn eller lik 25 mm. Her ble det likevel valgt en radius på 20 mm i stedet for 25 mm, da sistnevnte ville vært for stor i forhold til resten av prøvegeometrien. Radier har en tendens til å påvirke bruddstedet. En radius på 20 mm ble vurdert til å være tilstrekkelig stor og samtidig et godt kompromiss mellom radius og lengden på gripeflaten.

Endelige dimensjoner for prøvestykkene vises i tabell 4.3. Bortsett fra L_t ble alle dimensjoner like for begge legeringene. Denne forskjellen medførte at Alloy 617 fikk større lengde på gripeflaten.

Tabell 4.3: Dimensjoner på prøvestykker for strekkprøving

	Alloy 617	Alloy 625
Tykkelse, t_s [mm]	2	2
Bredde skuldre, b_1 [mm]	24	24
Bredde parallellområdet, b_0 [mm]	12	12
Total lengde, L_t [mm]	162	140
Radius skuldre, r [mm]	20	20
Lengde parallellområdet, L_c [mm]	60	60

Testoppsett

Valget av innfestning baserte seg på prøvenstykkets utforming og hvilke passende alternativer som var tilgjengelig. For denne prøvegeometrien ble prøvene innspent ved å klemmes mellom to deler. Overflatene var serraterter for en bedre gripeflate. Bredden på innfestningene måtte være større enn bredden på prøvestykkene slik at de ikke skulle stikke ut på siden. For å sikre at prøvestykkene holdes tilstrekkelig på plass bør flatene være store nok til å dekke mesteparten av gripeflaten. Hverken ISO 4136:2022 eller ISO 6892-1:2019 oppgir nøyaktig hvor mye av prøvestykket som skulle dekkes, men de fleste standarder for strekkprøving foreslår å gripe minst 3/4 av prøvestykkets overflateareal (Azom, 2020). Dybden og høyden på de valgte innfestningene var begge 57 mm, som var tilstrekkelig størrelse i forhold til prøvestykkene.

4.3.2 Gjennomføring av strekkprøving

I forkant av testene ble prøvene forberedt ved å markere målelengdene innenfor parallellområdet. Målelengder av interesse samt tverrsnittsareal i parallellområdet ble også notert.

Testprosedyre

Testprosedyren for strekkprøving går ut på påføre en kontinuerlig økende strekklast på prøvestykket i henhold til ISO 6892-1 A2 (Standard Norge, 2020).

1. Montere testoppsett. Innfestninger ble montert av fagpersonell og justert til passende avstand slik at minst 3/4 av prøvestykkene havner mellom gripsene.
2. Feste prøvestykket. Når innfestningene er på plass og med riktig startposisjon kan prøvestykket festes. Prøvestykket ble plassert så nøyaktig som mulig for å få ren strekkbelastning.

-
3. Stille inn betingelser på kontrollpanelet. På kontrollpanelet settes sluttposisjonen til en høyere verdi enn forventet posisjon ved brudd. Hastigheten settes til 0,9 mm/min.
 4. Starte testen. Etter å ha stilt inn betingelser på kontrollpanelet, samt startet logging i dataprogrammet, ble testen startet.
 5. Avslutte og lagre. Når brudd oppstår stoppes maskinen og dataene lagres som en tekstfil. De to delene av prøvestykket tas ut av innfestningen før lengde og tverrsnittsareal noteres. Bruddplassering noteres også.
 6. Pakking av prøvestykket. Til slutt pakkes prøvestykkene inn for å beskytte bruddflatene, før de legges i en oppbevaringsboks.

Prosedyren gjentas for alle tolv strekktester. Figur 4.8 viser hvordan prøvestykkene ble innfestet i maskinen. Detaljer fra testingen ble før i en testmatrise (se vedlegg B.1). Bilder av utvalgte prøver etter testing er vist i vedlegg H.



Figur 4.8: Testoppsett for strekkprøving

4.4 Bøyeprøving

Metoden som ble brukt for bøyeprøving i dette prosjektet fulgte standarden ISO 5173:2023 (Standard Norge, 2023). Standarden dannet grunnlaget for valg av testoppsett, dimensjonering og forberedelse av prøvestykker, samt gjennomføring av bøyetestene, som vil bli nærmere beskrevet i de påfølgende delkapitlene.

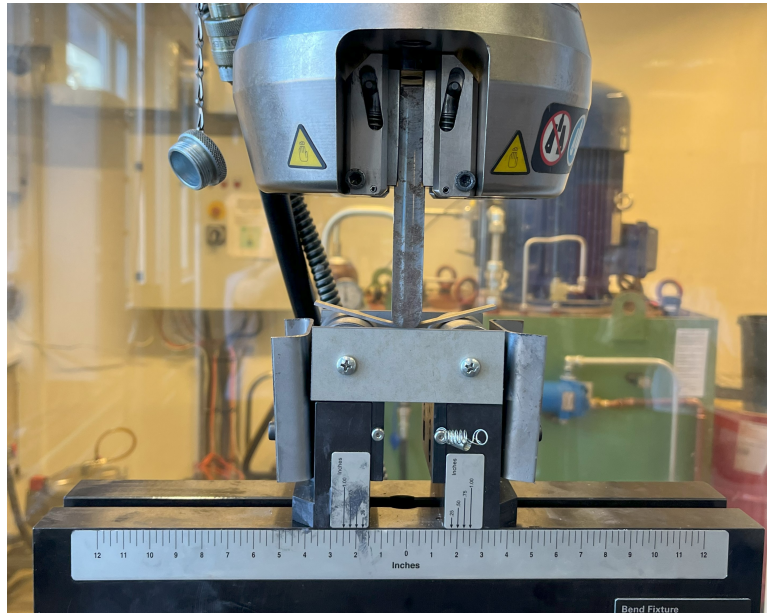
I prosjektet ble det utført rot- og råkbøyetester, på prøver med en transversal butt-sveis i midten. Testene ble gjennomført på de to superlegeringene Alloy 617 og Alloy 625. Som nevnt, ble halvparten av prøvene varmebehandlet. Til sammen ble det gjennomført 16 bøyetester. En enkel oversikt over alle testene som ble gjennomført er fremstilt i tabell 4.4. Alle testene er nummerert med testnummer etterfulgt av bokstaven “b” bak.

Tabell 4.4: Enkel oversikt over bøyeprøver som gjennomføres i prosjektet

Test nr.	Rot/råk	Materiale	Test nr.	Rot/råk	Materiale
Uten varmebehandling			Med varmebehandling		
1b	rot	617	9b	rot	617
2b	rot	617	10b	rot	617
3b	råk	617	11b	råk	617
4b	råk	617	12b	råk	617
5b	rot	625	13b	rot	625
6b	rot	625	14b	rot	625
7b	råk	625	15b	råk	625
8b	råk	625	16b	råk	625

4.4.1 Testoppsett

Bøyeprøvmingsmetoden begynte med valg av en egnet maskin og børefikstur som var tilpasset prøvestykkene som skulle testes. Som nevnt ble testene utført på en *Instron 1342*. Til denne maskinen ble det brukt en 3-punkts børefikstur som illustrert i figur 4.9. Her avbildet i begynnelsen av prøveforløpet.

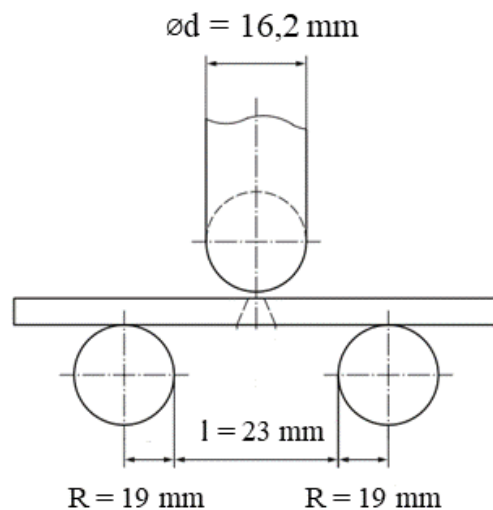


Figur 4.9: 3-punkts børefikstur som ble brukt til bøyeprøving

Børefiksturen har to parallelle ruller med radius $R = 19$ mm. For å bøye prøvene ble det brukt et oververktøy med diameter $d = 16,2$ mm. Radien på rullene, platetykkelsen og diameteren på oververktøy ble de initielle betingelsene for å dimensjonere testoppsett og prøvestykker.

Ved bruk av likning 2.16, ble lengden l mellom de innerste kantene til rullene bestemt til å være mellom 21,2 mm og 23,3 mm. Det mest passende valget ble å bruke 23 mm. Det ble laget og montert på plater for å holde rullene på plass under testingen.

En illustrasjon av de endelige dimensjonene til oververktøyet og rullene i testoppsettet er vist i figur 4.10. Figuren viser diameteren $\varnothing d$ på oververktøyet, lengden l mellom rullene, og radien R til rullene.

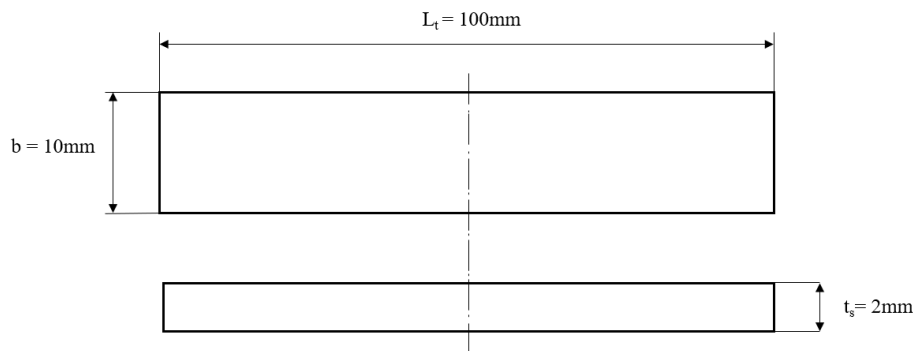


Figur 4.10: Testoppsettet til bøyep prøvingen med dimensjoner

4.4.2 Dimensjonering av prøvestykker

Etter å ha bestemt og fått på plass testoppsettet, ble neste steg å dimensjonere lengden og bredden av prøvestykkene. Platetykkelsen t_s , var på 2 mm. Ved bruk av likning 2.17 ble den totale lengden L_t funnet å være større enn eller lik 61 mm. Bredden til prøvestykkene ble funnet til å være større enn eller lik 8 mm ved bruk av likning 2.18.

Lengden og bredden av prøvestykkene ble bestemt til å være henholdsvis 100 mm og 10 mm, som er i henhold til standarden og rammebetingelsene. En illustrasjon av prøvestykkene med endelige dimensjoner er vist i figur 4.11.



Figur 4.11: Prøvedimensjoner for bøyeprøvene

4.4.3 Gjennomføring av bøyeprøving

Da dimensjoneringen av testoppsettet og prøvestykkene var fullført, ble prøvestykkene forbehandlet som beskrevet i delkapittel 4.2. I forkant av bøyetestingen ble alle prøvene merket med testnummer (se tabell 4.4). Bøyeprøvingen er beskrevet i følgende testprosedyre:

Testprosedyre

1. Montere testoppsett. Bøyefikstur og oververktøy ble montert inn i maskinen av verkstedpersonell.
2. Plassere prøvestykke. Prøvestykket ble nøyaktig plassert på rullene i bøyefiksturen, med sveisen direkte under oververktøyet.
3. Stille inn betingelser på kontrollpanelet. Hastigheten for nedbøyningen ble satt til 5 mm/min. Det ble også satt en sluttposisjon på 37 mm nedenfor startpunktet for oververktøyet.
4. Starte testen. Etter å ha stilt inn alle betingelser på kontrollpanelet til maskinen, samt startet logging i dataprogrammet til datamaskinen, ble testen startet.
5. Avslutte og lagre. Nedbøyningen ble stoppet automatisk etter å ha nådd sin innstilte sluttposisjon. Loggingen ble stoppet manuelt på datamaskinen, og dataene ble lagret i en tekstfil.

-
6. Fjerning og pakking av prøvestykket. Etter å ha avsluttet testingen ble prøvestykket tatt ut av bøyefiksturen. Overflatene ble undersøkt og fotografert, før prøvestykkene ble pakket ned i en oppbevaringsboks.

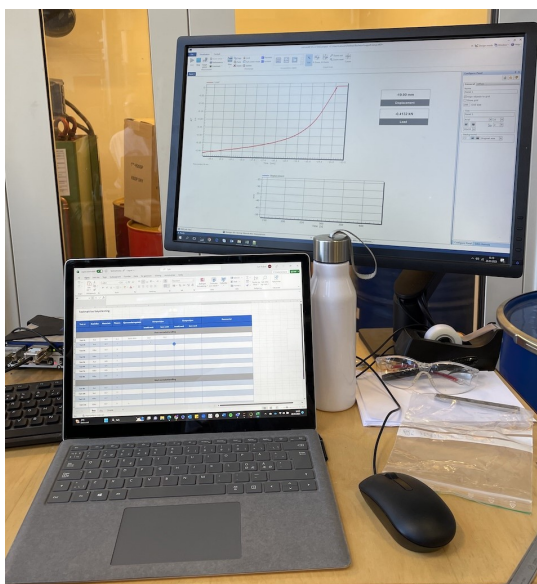
Denne prosedyren ble gjentatt på alle 16 bøyetestene. Bilder av prosedyren er vist i figur 4.12. Detaljer fra bøyetestingen ble ført inn i en testmatrise, se vedlegg B.2. Bilder av utvalgte prøver etter testing er vist i vedlegg H.



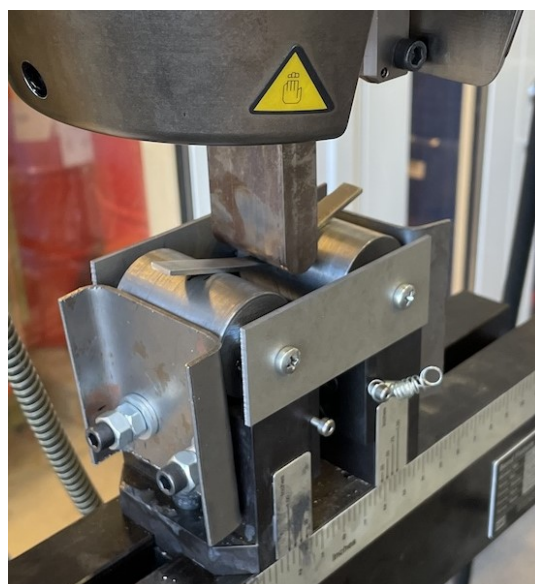
(a) Plassering av prøvestykke



(b) Plassert prøvestykke



(c) Logging av testdata



(d) Bøying av prøvestykke

Figur 4.12: Bøyeprøving

5 Resultater og diskusjon

5.1 Strekkprøving

Hovedresultatene fra strekkprøvene er spenning-tøyning diagram. Diagrammene gir et godt grunnlag for vurdering av materialenes styrke og stivhet. Det har totalt blitt utført tolv strekkprøver på Utmattingslaben, hvor halvparten av testene er blitt varmebehandlet i forkant på Varmelaben ved NTNU. Prøvene kan deles inn i fire paralleller, med og uten varmebehandling for begge legeringene. Innenfor hver parallell har blitt utført tre tester.

Utformingen av de nominelle spenning tøyningdiagrammene bygger på rådata fra strekktestene; kraft og forlengelse. Rådata ble brukt i likning (2.1) og (2.2) for å beregne henholdsvis spenning og tøyning. Disse beregnede verdiene ble deretter brukt til å plote spenning-tøyning kurven. Forlengelsen fra målepunktene i testene er basert på maskinens forlengelse. Dette betyr at forlengelsen som måles under testene er avhengig av hvordan selve testmaskinen forlenger seg eller beveger seg. Dette innebærer at diagrammene ikke gir helt korrekt informasjon til å utlede og analysere materialdata fra det elastiske området, som for eksempel E-modul og flytegrense. Strekkfastheten, som er en materialeegenskap i det plastiske området, er derimot en pålitelig materialeegenskap som kan utledes fra diagrammene for strekkprøvene.

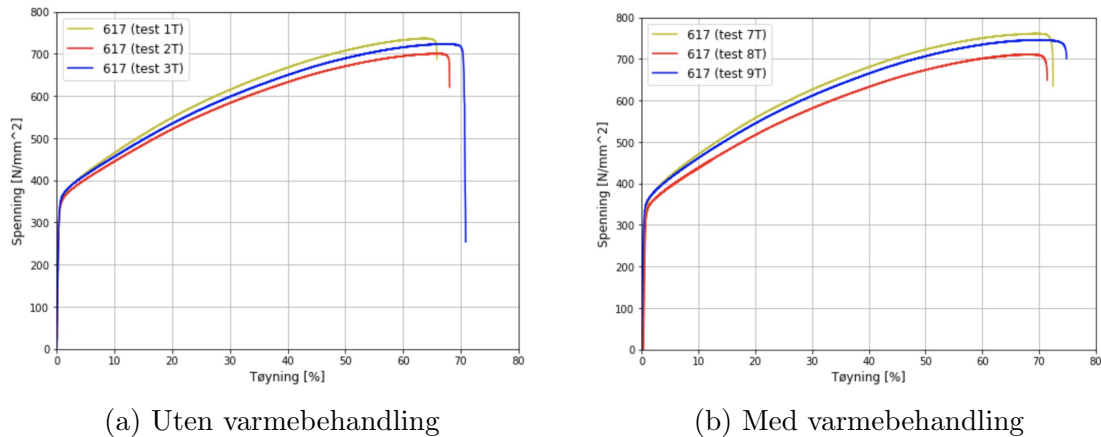
For å oppnå nøyaktige materialdata ville bruk av ekstensometer vært hensiktsmessig under strekktestingen. Grunnet mangel på kompatibelt utstyr var det likevel ikke mulig å bruke ekstensometer. Løsningen ble å markere parallell-lengden på prøvestykkene med tusj og måle denne avstanden før og etter testing. Derfor baserer resultatene fra strekkprøvingen seg på datapunktene fra maskinen og tusjmarkerin-ger.

Alle testene har et felles datagrunnlag, og derfor kan resultatene brukes til å sammenligne legeringene og vurdere påvirkningen av sveis og varmebehandling. I de kommende delkapitlene vil gyldigheten av testene først bli evaluert, etterfulgt av en diskusjon om virkningen av sveis og varmebehandling. Til slutt vil det bli utført en sammenligning av legeringene og en vurdering i forhold til relevant litteratur.

5.1.1 Validiteten av strekkprøvingen

Utføringen av strekkprøvingen gikk som planlagt uten noen betydelige forstyrrelser. Imidlertid ble det observert noen mindre avvik som er dokumentert i en detaljert testmatrise (se vedlegg B.1). Resultatene kan dermed antas som pålitelige og valide, og det forventes ikke store forskjeller innenfor parallellene. Til fremstilling og utregninger av resultater er både Python og Excel blitt brukt. Vedlegg C viser alle resultatene av strekktestene og vedlegg E viser Python-koden for fremstilling av plottene.

For å kunne stole på resultatene er det nødvendig å undersøke validiteten til testene. En høy grad av kontinuitet i parallellene indikerer en høy validitet for resultatene. Figur 5.1a og 5.1b viser parallellene for Alloy 617, henholdsvis uten og med varmebehandling. Disse diagrammene danner utgangspunktet for diskusjonen rundt resultatenes validitet, for Alloy 617.



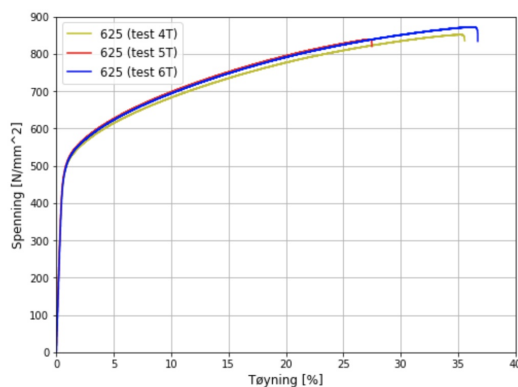
Figur 5.1: Nominelle spennings-tøyning kurver ved alle strekkprøvene av Alloy 617

For Alloy 617 er alle kurvene tilnærmet lineære i det elastiske området. Kurvene har en bratt og nær vertikal stigning, som kan gjøre det utfordrende å oppdage forskjeller mellom de ulike testene.

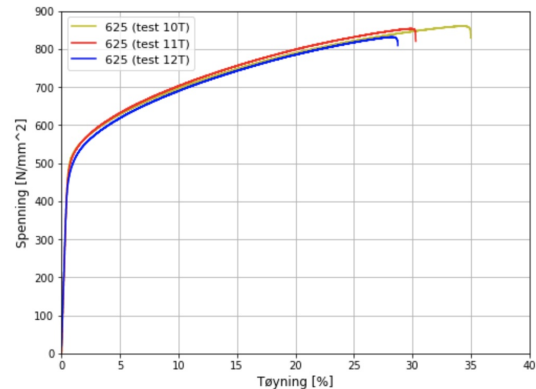
I det plastiske området er det en tydeligere forskjell mellom kurvene til hver test. Forskjellene er mest markante mellom testene i parallellen med varmebehandling. Det kan være usikkerhet knyttet til utførelsen av varmebehandlingen som fører til disse forskjellene.

Et avvik som kan kommenteres er bruddpunktet for test 3T. Bruddspenningen for denne testen er vesentlig lavere enn for de andre testene i samme parallell. Årsaken til dette er at datapunkter ble fjernet manuelt, og i noen tilfeller var det vanskelig å tydelig identifisere nedgangen i kraften som indikerer bruddpunktet.

På bakgrunn av spenning-tøyning diagrammene vurderes strekkprøvene på Alloy 617 som valide og kan brukes i videre analyse. Videre danner figur 5.2a og 5.2b utgangspunktet for diskusjon rundt resultatenes validitet for Alloy 625.



(a) Uten varmebehandling



(b) Med varmebehandling

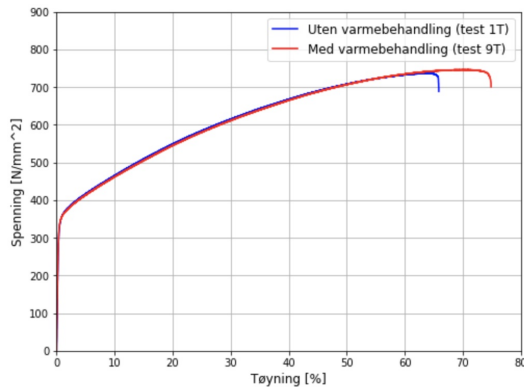
Figur 5.2: Nominelle spenning-tøyning kurver ved alle strekkprøvene av Alloy 625

I det elastiske området viser kurvene en tilsynelatende lik tendens i begge parallellene. I det plastiske området, opprettholder de opprinnelig samme form, men bruddpunktene oppstår ved ulike tøyninger. For parallellen uten varmebehandling skiller test 5T seg tydelig ut, ved at tøyningen er betydelig lavere enn de to andre testene.

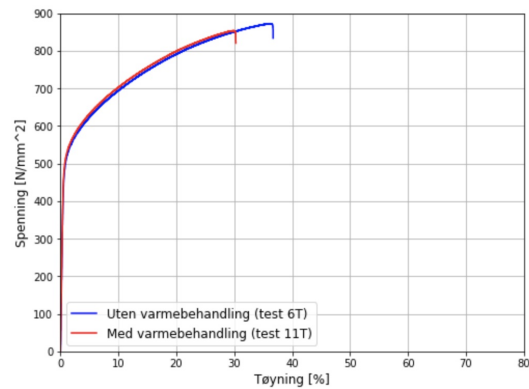
Det er også tydelige forskjeller i bruddtøyningen for parallellen med varmebehandling. Selv om det er forskjeller i bruddtøyningen for begge parallellene, blir validiteten til testene vurdert som valide da kurvene viser tydelig repeterbarhet.

5.1.2 Vurdering av varmebehandlingen

Varmebehandlingen er gjort for å simulere driftstemperaturen til komponenten som legeringen er tiltenkt å brukes til. Varmebehandlingsens påvirkning vil vurderes individuelt for de to legeringene. Det er valgt ut en representativ kurve fra hver parallell for å enkelt kunne sammenligne varmebehandlingsens påvirkning på et overordnet nivå. Figur 5.3 viser representative kurver for Alloy 617 og 625, med og uten varmebehandling.



(a) Alloy 617



(b) Alloy 625

Figur 5.3: Sammenligning av nominelle spennings-tøyning kurver ved strekkprøver

Det er få signifikante forskjeller å fremheve for Alloy 617 med og uten varmebehandling. Resultatene tyder på at varmebehandlingen har størst påvirkning på legeringens bruddtøyning. Det observeres at varmebehandlingen fører til økt tøyning i prøvene. Verken flytespenningen eller strekkfastheten påvirkes i stor grad av varmebehandlingen.

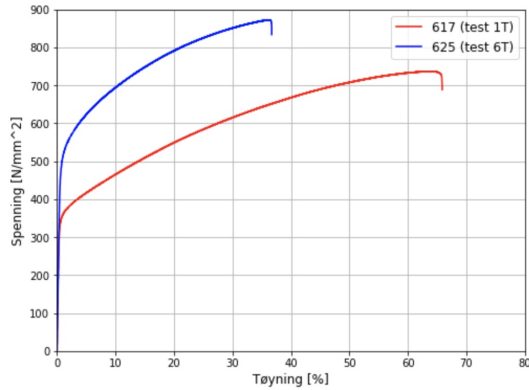
For Alloy 625 observeres det også at bruddtøyningen har den største påvirkningen av varmebehandlingen, da kurvene ellers er tilsynelatende like. Varmebehandlingen fører til redusert tøyning i prøvene. Effekten av varmebehandlingen er altså motsatt for Alloy 625 sammenlignet med Alloy 617, da varmebehandlingen reduserer tøyningen i Alloy 625.

5.1.3 Sammenligning av legeringene

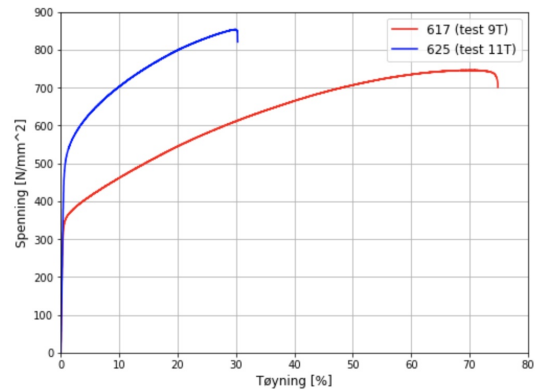
Spennings-tøyning diagram gir en overordnet sammenligning mellom de to legeringene. Disse diagrammene er utgangspunktet for sammenligning av E-modul, flytespenning, strekkfasthet, seighet og duktilitet. I dette delkapitlet vil først forløpene til kurvene bli diskutert generelt, før det vil bli gjort en detaljert sammenligning av materialegenskapene. Sammenligningen av de spesifikke materialegenskapene vil bli basert på gjennomsnittsverdier. Totalt sett vil denne tilnærmingen gi en helhetlig forståelse av den mekaniske responsen til begge legeringene, samt en vurdering av deres styrker og svakheter i forhold til hverandre.

Sammenligning av spenning-tøyning kurver

En sammenligning av spenning-tøyning kurvene for Alloy 617 og Alloy 625, uten og med varmebehandling, vises i henholdsvis figur 5.4a og 5.4b. Kurvene er representative eksempler valgt for hver legering.



(a) Uten varmebehandling



(b) Med varmebehandling

Figur 5.4: Sammenligning av nominelle spenning-tøyning kurver av de to legeringene ved strekkprøving

Når det gjelder styrken til legeringene, er flytespenningen og strekkfastheten av interesse. Ved å kun se på kurvene, kan man estimere en høyere flytegrense og strekkfasthet for Alloy 625, både med og uten varmebehandling. Alloy 617 viser derimot en betydelig høyere tøyning enn Alloy 625, både med og uten varmebehandling. Dette tyder på at Alloy 617 har høyere duktilitet.

Videre vil konkrete resultater for E-modul, flytespenning, strekkfasthet, seighet og bruddpunkt for begge legeringene, bli diskutert. Dette er resultater som bygger på spenning-tøyning kurvene presentert over. Verdiene er funnet ved hjelp av Python og Excel.

E-modul

E-modul har blitt estimert ved hjelp av lineær regresjon i Python. Tabell 5.1 viser resultatene for E-modulen til Alloy 617, med tilhørende gjennomsnittsverdier.

Tabell 5.1: E-moduler ved strekktesting for Alloy 617

Alloy 617			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	E-modul [GPa]	Test nr	E-modul [GPa]
1T	89,4	7T	94,5
2T	101,9	8T	93,9
3T	87,5	9T	92,9
Gjennomsnitt:	92,9		93,8

I parallellen med varmebehandling for Alloy 617 viser testene liten variasjon i E-modulen. Imidlertid er det større forskjeller i E-modulen i parallellen uten varmebehandling. Test 2T fremstår en avvikende test i forhold til de andre testene i parallellen. Det er imidlertid registrert visse forhold i gjennomføringen av både test 3T og test 1T som potensielt kunne ha påvirket prøvestavene og resultert i utilsiktede belastninger. I gjennomføringen av test 3T ble “load protect” (last begrensning) først aktivert etter at prøvestaven var festet. Etter test 1T ble det observert at øvre lastcelle ikke var riktig justert, som potensielt kan ha bidratt til skjærspenninger under testforløpet.

Alloy 625 har også størst variasjon av E-modulen i parallellen uten varmebehandling. Det er ikke registrert utilsiktede hendelser i testforløpende som kan forklare variasjonene. Resultatene med tilhørende gjennomsnittsverdier er vist i tabell 5.2.

Tabell 5.2: E-moduler ved strekktesting for Alloy 625

Alloy 625			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	E-modul [GPa]	Test nr	E-modul [GPa]
4T	96,7	10T	89,7
5T	89,8	11T	91,9
6T	91,4	12T	89,3
Gjennomsnitt:	92,7		90,3

Ved sammenligning av de to legeringene har Alloy 617 generelt en høyere E-modul enn Alloy 625. Forskjellen i E-modul mellom de to legeringene har imidlertid liten betydning ved materialvalg. En mer relevant forskjell mellom de to legeringene når

det gjelder materialvalg er hvordan E-modulen endres ved varmebehandling. Basert på gjennomsnittsverdiene ser det ut til at Alloy 617 opplever en økning i E-modulen ved varmebehandling, mens Alloy 625 får en lavere E-modul etter varmebehandling.

Flytespenninger

Ettersom de sammenlignede legeringene er duktile, er det den konvensjonelle flytegrensen som blir vurdert og diskutert. Konkrete tallverdier med tilhørende gjennomsnitt og standardavvik er oppsummert i tabell 5.3 for Alloy 617.

Tabell 5.3: 0,2% flytespenninger ved strekktesting for Alloy 617

Alloy 617			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	0,2% flytespenning [MPa]	Test nr	0,2% flytespenning [MPa]
1T	327	7T	322
2T	324	8T	328
3T	335	9T	328
Gjennomsnitt:	329		326

Resultatene for den konvensjonelle flytespenningen viser liten variasjon i begge parallellene. Som forventet viser flytespenningen til Alloy 617 en liten reduksjon etter varmebehandling.

Resultatene av den konvensjonelle flytespenningen for Alloy 625 er vist i tabell 5.4.

Tabell 5.4: 0,2% flytespenninger ved strekktesting for Alloy 625

Alloy 625			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	0,2% flytespenning [MPa]	Test nr	0,2% flytespenning [MPa]
4T	457	10T	507
5T	456	11T	483
6T	469	12T	454
Gjennomsnitt:	461		481

Resultatene for den konvensjonelle flytespenningen viser større variasjon for Alloy 625, spesielt for den varmebehandlede parallellen. Generelt har også den konvensjonelle flytespenningen økt etter varmebehandling.

I samsvar med forventningene (se tabell 3.3), har Alloy 625 en høyere konvensjonell flytespenning sammenlignet med Alloy 617. Påvirkningen av varmebehandlingen er

også størst for Alloy 625, og det er også denne legeringen som viser størst variasjon i resultatene.

Strekfasthet

Strekfastheten er en pålitelig materialegenskap, og er sammen med flytespenningen, en sentral materialegenskap for å beskrive styrken til legeringene. Resultatene av strekkfastheten for Alloy 617, med tilhørende gjennomsnitt og standardavvik, er samlet i tabell 5.5.

Tabell 5.5: Strekkfasthet ved strekktesting for Alloy 617

Alloy 617			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	R_m [MPa]	Test nr	R_m [MPa]
1T	718	7T	736
2T	700	8T	716
3T	705	9T	727
Gjennomsnitt:	708		726
Standardavvik:	7,9		7,9

Resultatene viser at Alloy 617 har liten variasjon mellom testene i begge parallellene. Dette bekreftes ved at standardavvikene kun tilsvarer omtrent 1%. I følge tabell 3.3 har Alloy 617 uten varmebehandling en strekkfasthet på 734 MPa. Den beregnede gjennomsnittsverdien fra strekktestene samsvarer med denne forventede verdien. Imidlertid var det forventet at strekkfastheten etter varmebehandling ville være lavere enn uten varmebehandling for Alloy 617. Resultatene fra strekktestene motsier denne teorien.

For Alloy 625 er resultater for strekkfasthet med tilhørende gjennomsnitt og standardavvik presentert i tabell 5.6.

Tabell 5.6: Strekkfasthet ved strekktesting for Alloy 625

Alloy 625			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	R_m [MPa]	Test nr	R_m [MPa]
4T	835	10T	860
5T	800	11T	832
6T	850	12T	814
Gjennomsnitt:	828		835
Standardavvik:	21,0		18,9

Resultatene for Alloy 625 viser en større variasjon mellom testene enn for Alloy 617. Denne variasjonen blir også bekreftet ved utregning av standardavvikene. Prosentvis er standardavvikene for Alloy 625 uten og med varmebehandling på henholdsvis 2,5% og 2,3%. Standardavvikene kan derfor i denne sammenhengen betraktes som lave. Slik som ved Alloy 617, blir strekkfastheten til Alloy 625 høyere ved varmebehandling. Resultatene viser generelt at Alloy 625 har høyere strekkfasthet enn Alloy 617.

Forventet strekkfasthet for Alloy 625 fra tabell 3.3 var 992,9 MPa. Gjennomsnittsverdien for strekkfastheten til Alloy 625 uten varmebehandling avviker betydelig fra den forventede verdien. Dette indikerer behovet for en grundigere undersøkelse av resultatene for å identifisere årsaken til denne forskjellen.

Bruddpunkt

Resultatet for bruddpunktet blir angitt som spenning og tøyning ved brudd; bruddspenning og bruddtøyning. Resultatene for bruddspenning og bruddtøyning for Alloy 617 er vist i tabell 5.7.

Tabell 5.7: Bruddpunkt ved strekktesting av Alloy 617

Alloy 617					
Uten varmebehandling			Med varmebehandling		
Test nr.	σ_B [MPa]	ε_B [%]	Test nr.	σ_B [MPa]	ε_B [%]
1T	671	66	7T	618	73
2T	505	68	8T	655	71
3T	248	70	9T	683	74
Gjennomsnitt:	588	68		652	73

Det observeres en større variasjon i resultatene for bruddpunktet sammenlignet med resultatene for E-modul, flytespenning og strekkfasthet for Alloy 617. Test 3T skiller seg spesielt ut fra de andre testene i samme parallell. Bakgrunnen for dette avviket er unøyaktighet ved fjerning av datapunkter, som diskutert i delkapittel 5.1.1. Bruddspenningen fra test 3T anses derfor som en målefeil, og blir dermed ekskludert fra gjennomsnittsberegningen.

For de varmebehandlede testene var variasjonen i bruddspenningen lavere sammenlignet med de testene som ikke ble varmebehandlet. Variasjonen i bruddtøyningen hadde derimot en jevnere spredning, både med og uten varmebehandling. Resultatene indikerer også at både bruddspenningen og bruddtøyningen er høyere for de varmebehandlede prøvene av Alloy 617.

Videre presenteres resultatene for bruddspenning og bruddtøyning for Alloy 625 i tabell 5.8.

Tabell 5.8: Bruddpunkt ved strekktesting av Alloy 625

Alloy 625					
Uten varmebehandling			Med varmebehandling		
Test nr.	σ_B [MPa]	ε_B [%]	Test nr.	σ_B [MPa]	ε_B [%]
4T	835	35	10T	829	35
5T	800	27	11T	800	30
6T	813	37	12T	809	29
Gjennomsnitt:	816	33		813	31

Resultatene av bruddpunktet av Alloy 625 viser en mindre spredning sammenlignet med Alloy 617. Resultatene tyder på at varmebehandlingen har liten til ingen effekt for bruddpunktet ved strekktesting av Alloy 625.

Det observeres at bruddspenningen er betydelig høyere for Alloy 625 sammenlignet med Alloy 617. Derimot har Alloy 617 omtrent dobbelt så stor bruddtøyning sammenlignet med Alloy 625. En potensiell feilkilde som kan påvirke bruddpunktene for begge legeringene er tolkningen av rådataene ved bestemmelse av bruddpunktet.

Seighet

Resultatene for seighet brukes for å vurdere hvordan legeringenes kombinasjon av styrke og seighet påvirkes av driftstemperaturen. Komponentene legeringene skal brukes i blir utsatt for under bruk. Seighet ble beregnet ved trapes-metoden i Excel (se vedlegg F). Tabell 5.9 viser beregnede seighetsverdier for Alloy 617, uten og med varmebehandling.

Tabell 5.9: Seighet beregnet ved strekktesting utført på Alloy 617

Alloy 617			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	U [J/mm ³]	Test nr.	U [J/mm ³]
1T	0,389	7T	0,440
2T	0,392	8T	0,417
3T	0,411	9T	0,449
Gjennomsnitt:	0,397		0,435
Standardavvik:	0,010		0,013

Generelt ser det ut til å være små variasjoner mellom de ulike testene i samme parallell. Fra de to parallellene kan det observeres at test 3T og test 8T avviker fra de andre testene i samme parallell. En mulig årsak til avvik kan være diskontinuiteter i selve prøveplaten prøvestykket er maskinert ut fra.

Alloy 617 har en høyere seighet med varmebehandling i forhold til parallellen uten varmebehandling. Med utgangspunkt i gjennomsnittsverdiene tilsvarer denne ulikheten omtrent 10%. Det betyr at det kreves mer energi for å oppnå brudd i de varmebehandlede prøvestykkene.

I tabell 5.10 vises beregnet seighet for Alloy 625, uten og med varmebehandling.

Tabell 5.10: Seighet beregnet fra strekktester utført på Alloy 625

Alloy 625			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	U [J/mm ³]	Test nr.	U [J/mm ³]
4T	0,253	10T	0,257
5T	0,185	11T	0,215
6T	0,267	12T	0,199
Gjennomsnitt:	0,235		0,224
Standardeavvik:	0,036		0,042

Ettersom Alloy 625 er kjent for å beholde sine materialegenskaper selv ved høye temperaturer, forventes det en begrenset endring i seighet etter varmebehandling. Dette stemmer overens med resultatene ved å sammenligne gjennomsnittsverdiene av parallellene uten og med varmebehandling. En vurdering av gjennomsnittsverdiene viser at seigheten til Alloy 625 reduseres med omtrent 5% etter varmebehandling.

Det vises å være større variasjonsbredde for Alloy 625 enn for Alloy 617. Dermed er det mer usikkerhet rundt validiteten for disse resultatene, sammenlignet med for Alloy 617. Testene som skiller seg tydelig fra resten er test 10T fra parallellen med varmebehandling og test 5T fra parallellen uten varmebehandling, for Alloy 625. Det ble ikke gjort noen observasjoner under gjennomføringen av disse testene som kan forklare disse avvikene. For å forbedre validiteten av resultatene, kan det være nødvendig å gjennomføre flere tester av Alloy 625.

Resultatene viser at Alloy 617 har høyere seighet enn Alloy 625, både med og uten varmebehandling. Alloy 617 har dermed både større seighet og bedre validitet på resultatene. Den klare forskjellen mellom legeringene er at mens Alloy 617 fikk høyere seighet med varmebehandling, så ble seigheten til Alloy 625 lavere.

5.1.4 Duktilitet

I dette delkapitlet blir legeringenes duktilitet vurdert basert på bruddforlengelse og bruddkontraksjon. Vurdering av de ulike duktilitetsmålene vil gi en helhetlig og grundig evaluering av legeringenes duktilitet. Resultatene fra duktilitetsmålene av Alloy 617 er presentert i tabell 5.11. Tabellen inneholder også gjennomsnittsverdier og tilhørende standardavvik for begge parallellene.

Tabell 5.11: Duktilitetsmål ved strekktesting for Alloy 617

Alloy 617					
Uten varmebehandling			Med varmebehandling		
Test nr.	A[%]	Z[%]	Test nr.	A[%]	Z[%]
1T	56,4	46,1	7T	60,7	46,8
2T	59,9	47,0	8T	60,6	43,5
3T	62,3	45,5	9T	63	49,0
Gjennomsnitt:	59,6	46,2		61,4	46,4
Standardavvik:	2,4	0,6		1,1	2,2

For Alloy 617 viser resultatene liten variasjon både for bruddforlengelse og bruddkontraksjonen for begge parallellene. Dette understrekes ved forholdsvis lave standardavvik.

Varmebehandlingen har minimal påvirkning på bruddforlengelsen for Alloy 617. Basert på gjennomsnittresultatene viser legeringen en økning på kun 1,9% i bruddforlengelsen etter varmebehandling. Den forventede bruddforlengelsen fra materialsertifikatet som fulgte med prøvene var 68,2% (se vedlegg D). Fra materialdata i tabell 3.3 er bruddforlengelsen oppgitt som 62%. Disse verdiene er relativt like resultatene fra strekktestene, noe som indikerer at testene er pålitelige.

Bruddkontraksjonen for Alloy 617 er tilsynelatende tilnærmet uendret for de varmebehandlede prøvene sammenlignet med de som ikke er varmebehandlet. Ifølge materialegenskapene oppført i tabell 3.3, skal bruddkontraksjonen for legeringen være 56%, noe som tilsvarer en forskjell på omtrent 10% i forhold til gjennomsnittresultatet fra strekktestene.

Varmebehandlingen har altså en begrenset innvirkning på både bruddforlengelsen og bruddkontraksjonen for Alloy 617. Videre presenteres resultatene for duktilitetsmålingene av Alloy 625 i tabell ??.

Tabell 5.12: Duktilitetsmål ved strekktesting for Alloy 625

Alloy 625					
Uten varmebehandling			Med varmebehandling		
Test nr.	A[%]	Z[%]	Test nr.	A[%]	Z[%]
4T	31,5	28,5	10T	31,0	28,8
5T	24,9	24,4	11T	26,8	32,8
6T	32,7	39,9	12T	26,0	29,7
Gjennomsnitt:	29,7	30,9		27,9	30,4
Standardavvik:	3,4	6,5		2,2	1,7

Resultatene for Alloy 625 viser små variasjoner, både for bruddforlengelsen og bruddkontraksjonen, for begge parallellene. Standardavvikene avdekker derimot at forskjellen er noe større for Alloy 625 i forhold til Alloy 617. Det tyder på at det er større usikkerhet i resultatene for Alloy 625.

Generelt for Alloy 625 er duktiliteten lavere i parallellen med varmebehandling sammenlignet med parallellen uten varmebehandling. Den største forskjellen mellom de to parallellene observeres i bruddforlengelsen. Bruddforlengelsen blir redusert med 1,8% for den varmebehandlede parallellen i forhold til parallellen uten varmebehandling.

Resultatene av bruddforlengelsen for Alloy 625, uten varmebehandling, er lavere enn forventede verdier gitt i materialsertifikatet (se vedlegg D) og i tabell 3.3. De forventede verdiene for bruddforlengelse var henholdsvis 41,3% og 44%, som er basert på prøvestykker uten sveis. Dermed kan resultatene, som er lavere enn forventede verdier, indikere at sveisen fører til en reduksjon av bruddforlengelsen for Alloy 625.

Det er en minimal forskjell i bruddkontraksjon for Alloy 625, ved sammenligning av parallellene uten og med varmebehandling. Dermed kan varmebehandlingens påvirkning for bruddkontraksjonen antas som ubetydelig.

Sammenligning av duktiliteten til de to legeringene

Ved sammenligning av de to legeringene, er bruddforlengelsen omtrent det dobbelte for Alloy 617 i forhold til Alloy 625, både med og uten varmebehandling. Bruddkontraksjonen er også betydelig høyere for Alloy 617 enn Alloy 625. Resultatene viser dermed en betydelig høyere duktilitet for Alloy 617 sammenlignet med Alloy 625, både uten og med varmebehandling. For Alloy 617 er verdiene for bruddforlengelse nærmere forventede verdier enn tilsvarende for Alloy 625. For begge legeringene hadde varmebehandling lite påvirkning på duktiliteten.

Feilkilder ved duktilitetsmåling

Feilkilder som kan påvirke resultater for bruddforlengelse og bruddkontraksjon inkluderer måleusikkerhet i måleverktøy og avlesningsfeil. Dette innebærer både unøyaktigheter i avmerking av prøvestykkene og avlesning av lengdene, før og etter brudd.

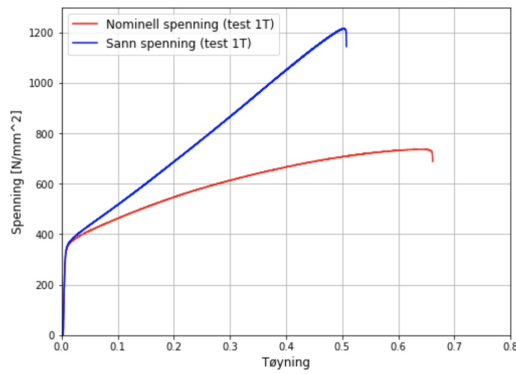
Det er verdt å merke seg at tusjmerkene som ble brukt for å måle lengden av parallellområdet til prøvestykkene hadde relativt stor linjebredde. Dette kan ha medført økt unøyaktighet ved måling og avlesning. Det var også vanskelig å identifisere noen av merkene etter utført strekktest på grunn av deformasjon av prøvestykket. Etter gjennomføringen av strekktesten ble lengdemålingen utført ved å sette sammen de to delene av prøvestykket. Dette ble gjort med forsiktighet for å ta hensyn til bruddoverflaten, og prøvene ble ikke presset helt sammen. Det er derfor mulig at det var en liten avstand mellom de to delene under målingen. Dette kan ha innvirkning på nøyaktigheten til resultatet av bruddforlengelsen.

Måling av tverrsnittarealet etter brudd viste seg å være utfordrende på grunn av at flere av bruddene var skråstilte. Dette kan ha resultert i at det absolutt minste tverrsnittarealet ikke ble nøyaktig målt. Dermed er det en usikkerhetsfaktor knyttet til disse målingene, som vil ha utslag for resultatet av bruddkontraksjonen.

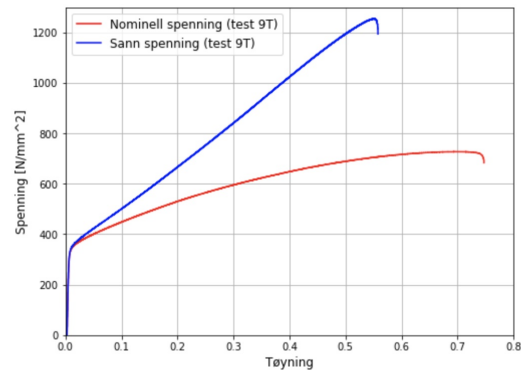
5.1.5 Sann spenning-tøyning diagram

Likning 2.9 og 2.13 blir anvendt for å finne henholdsvis sann spenning og sann tøyning. Likningene tar utgangspunkt i de nominelle spenningene og tøyningene utledet fra rådata fra strekkprøvingen. Det betyr at kurvene som genereres ved hjelp av disse likningene ikke representerer de faktiske egenskapene til materialene. Likevel vil resultatene av sann spenning-tøyning diagrammene være nyttige for sammenligning av legeringene.

I dette delkapitlet vil det bli presentert et representativt plott fra hver av de fire parallellene. Dette for å kunne sammenligne sann spenning og tøyning mellom legeringene, samt for å vurdere påvirkningen av varmebehandlingen. Kurvene vil også bli presentert sammen med nominelle kurver for å illustrere forskjellen. Legeringene blir vurdert hver for seg, før det vil bli gjort en sammenligning. For Alloy 617 er en sammenligning av sann- og nominell spenning-tøyningskurver vist i figur 5.5.



(a) Uten varmebehandling



(b) Med varmebehandling

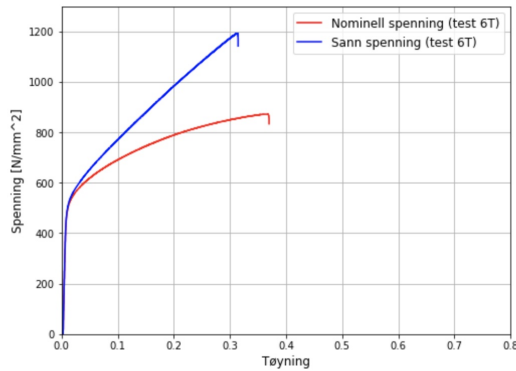
Figur 5.5: Sammenligning av sann- og nominell spenning-tøyning kurver ved strekkprøving for Alloy 617

For Alloy 617 både med og uten varmebehandling er kurvene konsekvent like i starten og følger hverandre gjennom hele det elastiske området. Det er først etter at flytespenningen er nådd at kurvene begynner å skille seg fra hverandre. Den sanne spenningskurven får i begge parallellene en brattere og mer lineær stigning enn den nominelle spenningskurven.

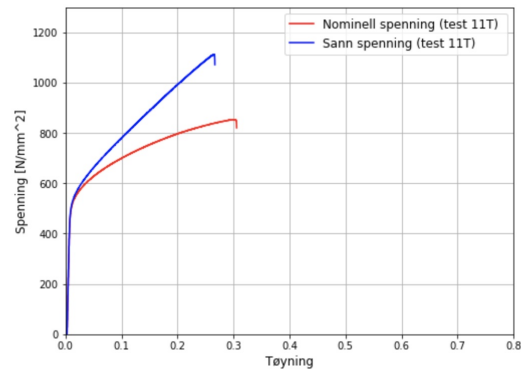
I tråd med teorien gir det mening at den sanne spenningen øker raskere. Det er derimot i strid med teorien at det oppstår en betydelig økning i spenningen allerede fra flytespenningen. Ifølge teorien skulle den drastiske forskjellen i spenning komme først etter at strekkfastheten er nådd.

Ved sammenligning av Alloy 617 med og uten varmebehandling, kan det observeres at varmebehandlingen fører til en økning i strekkfastheten for den sanne spenningskurven. Tilsvarende observeres også en økning for tøyningen.

Videre vises en sammenligning av sann- og nominell spenning-tøyning kurver for Alloy 625 i figur 5.6.



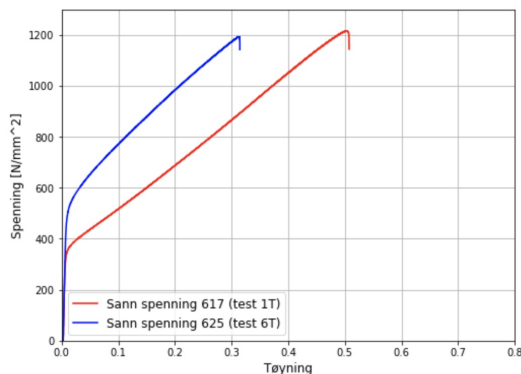
(a) Uten varmebehandling



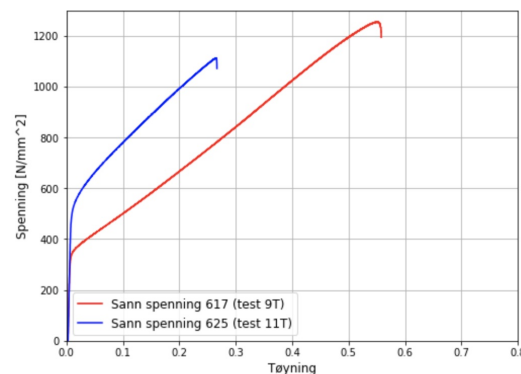
(b) Med varmebehandling

Figur 5.6: Sammenligning av sann- og nominell spenning-tøyning kurver ved strekkprøving for Alloy 625.

Slik som for Alloy 617, avviker sanne spenning-tøyningkurvene fra forventningene som beskrevet i teorien. Imidlertid viser varmebehandlingen for Alloy 625 en motsatt effekt i forhold til det som ble observert for Alloy 617. Både strekkfastheten og tøyningen for Alloy 625 er lavere med varmebehandling ved betraktning av sanne spenning-tøyning kurver. Videre blir det i figur 5.7 vist sann spenning-tøyning kurve for Alloy 617 og Alloy 625 for sammenlikning av legeringene.



(a) Uten varmebehandling



(b) Med varmebehandling

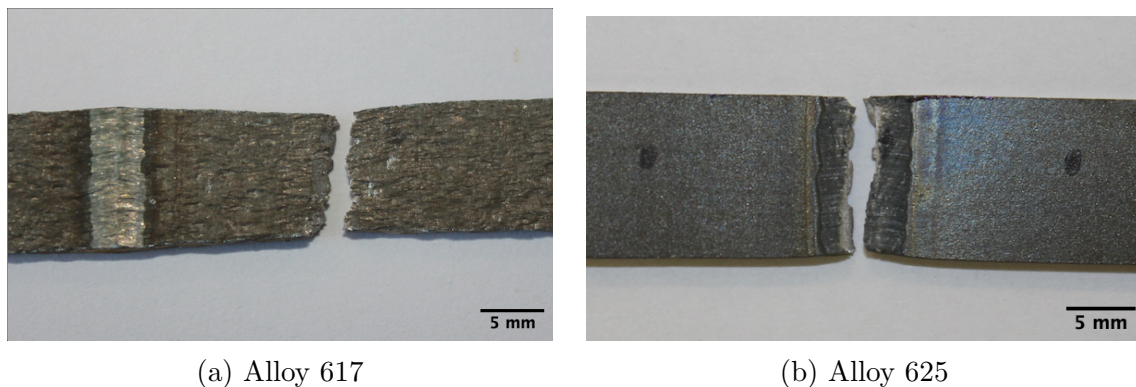
Figur 5.7: Sammenligning av sann spenning-tøyning kurve ved strekkprøving av Alloy 617 og Alloy 625

Ved sammenligning av legeringene, kan det observeres at den sanne tøyningen for Alloy 625 er lavere enn for Alloy 617. Dette gjelder prøvestykkene både med og uten varmebehandling. For prøvestykkene uten varmebehandling er strekkfastheten tilnærmet lik for både Alloy 625 og Alloy 617. Strekkfastheten er derimot ikke like for prøvestykkene med varmebehandling, hvor Alloy 625 har en lavere strekkfasthet enn Alloy 617.

5.1.6 Bruddplassering

I dette delkapitlet blir bruddplasseringen ved strekktestingen av legeringene diskutert. Det skilles mellom brudd som oppstår i sveisen og brudd som oppstår i grunnmaterialet. Bruddplasseringen gir innsikt i hvilke områder som vil være mest utsatt for svikt i komponenten som legeringene skal brukes i.

Bruddplasseringen er ulik for legeringene. Felles for alle Alloy 617 strekkprøvene var at brudd oppstod i grunnmaterialet, mens for Alloy 625 oppstod alle brudd i sveisen. Figur 5.8a og 5.8b viser bruddplasseringen for henholdsvis Alloy 617 og Alloy 625.



Figur 5.8: Bruddplassering etter strekkprøving av varmebehandlede prøvestykker

Bruddpunktet oppstår i grunnmaterialet for Alloy 617, dermed kan det antas at lasersveising på denne legeringen gir en sveis sterkere enn grunnmaterialet.

Sveisen viser seg å være det svakeste området for Alloy 625. Dette indikerer at sveisen har en større innvirkning på materialet for Alloy 625 sammenlignet med Alloy 617, hvor bruddene oppstod i grunnmaterialet. Det kan dermed antas at Alloy 625 kunne blitt bedre utnyttet uten sveis. Det er også med på å forklare avvik mellom forventete materialegenskaper og testresultatene for Alloy 625.

5.2 Bøyeprøving

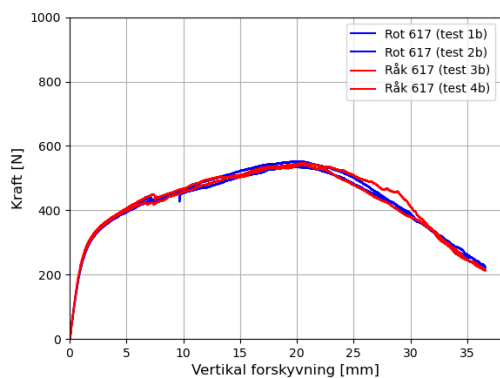
Det har totalt blitt utført 16 bøyetester på Utmattingslaben, hvor halvparten har blitt varmebehandlet i forkant på Varmelaben ved NTNU. For begge legeringene ble det gjennomført parallelle tester av både rot- og råk-siden i strekk for prøvene med og uten varmebehandling. Det tilsvarer to like repetisjoner av hver test. Alle resultater fra bøyeprøvingen ble analysert og plottet i kraft-forskyvning diagram, hvor forskyvningen viser til maskinens vertikale forskyvning under nedbøyningen. Resultatene danner grunnlaget for å vurdere oppførselen til de to sveiste legeringene, Alloy 617 og Alloy 625.

I det neste delkapitlet vil validiteten til resultatene av bøyeprøvingen bli vurdert. På grunnlag av dette vil de påfølgende delkapitlene beskrive resultater fra bøyeprøvingen basert på bilder av bøyde prøvestykker og kraft-forskyvning diagram. Det vil bli diskutert og gjort sammenligninger av duktilitet, maksimal bøyelast, rot- og råkbøyetest og varmebehandlingens påvirkning for de ulike bøyeprøvene.

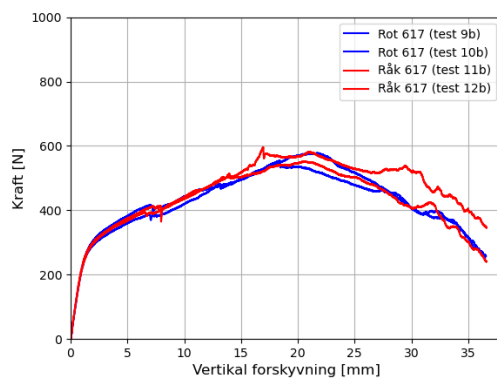
5.2.1 Validitet av bøyeprøvene

Gjennomføringen av bøyeprøvene gikk som planlagt uten større forstyrrelser eller feil. Dermed kan det forventes å få omtrent like resultater for to like tester. Alle testene ble plottet i kraft-forskyvning diagram ved hjelp av Python. Fra plottene ble det hentet ut verdier for maksimal bøyelast og hvor mye energi som blir brukt under bøyeprøvingen. Som for strekktestingen, er den vertikale forskyvningen basert på maskinens forlengelse, og ikke materialets forlengelse. Det antas at dette ikke vil ha like stor innvirkning for resultatene til bøyetestingen, ettersom det ikke er av interesse å måle direkte forlengelse av materialet.

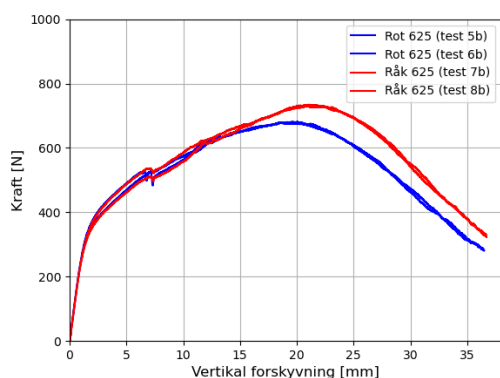
For å diskutere validiteten av alle bøyeprøvene som ble gjort, vil det bli tatt utgangspunkt i figur 5.9, som viser resultatene i form av kraft-forskyvning diagram for alle 16 bøyeprøvene. Legeringene, med og uten varmebehandling, er vist hver for seg i fire forskjellige diagram. Rot- og råkbøyeprøver vises i samme diagram, og de to repetisjonene av samme test har lik farge. Figuren viser både likheter og ulikheter mellom diagrammene og kurvene.



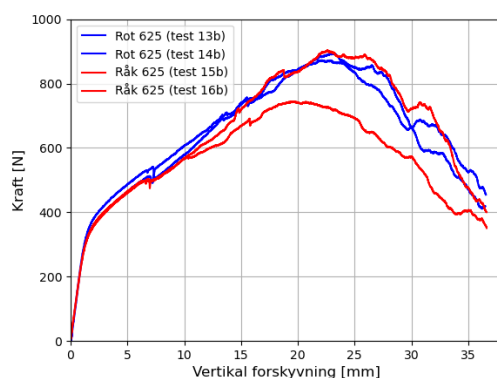
(a) Uten varmebehandling Alloy 617



(b) Med varmebehandling Alloy 617



(c) Uten varmebehandling Alloy 625



(d) Med varmebehandling Alloy 625

Figur 5.9: Resultater for alle bøyeprøver

Generelle likheter

Felles for alle kurvene er hvordan kraften øker og avtar med den vertikale forskyvningen. Tendensen er at kurven har en bratt stigning i første del, frem til en vertikal forskyvning på omtrent 5 mm. Herfra øker kraften jevnt med forskyvningen opp til toppunktet. Deretter avtar kraften inntil forskyvningen når den innstilte verdien.

I tillegg observeres det et markant fall i kraft etter en vertikal forskyvning på omtrent 7 mm for alle kurvene. For varmebehandlede prøver observeres to slike fall. Fallene på kurvene kan trolig skyldes bevegelsen til de parallelle rullene som prøvestykket var plassert på. Rullene var festet for å rotere i takt med bøyebegnelsen og redusere friksjon. Imidlertid kan friksjon fra bøyefiksturen ha forårsaket en ujevn bevegelse av rullene. En brå bevegelse av rullene kan ha bidratt i samme retning som nedbøyningen, og dermed redusert den nødvendige bøyelasten på disse stedene.

Generelle ulikheter

En tydelig forskjell i resultatene er hvor jevne og glatte kurvene er. For prøvene uten varmebehandling, for begge legeringene, ble kurvene jevnere og glattere, enn for prøvene med varmebehandling. Dette kan skyldes at varmebehandlingen av prøvestykkene resulterte i endringer i overflatestruktur, men dette ble ikke nærmere underøkt.

Forskjeller ved samme repetisjon

Som nevnt ble det gjennomført to repetisjoner av samme test. Det kunne blitt gjennomført flere repetisjoner for å øke resultatenes validitet og kunne beregne avvik mer nøyaktig, men denne muligheten ble begrenset av kostnad og tid i dette prosjektet. To repetisjoner av hver test, med forbehold om at begge har god kvalitet, gir likevel gode indikasjoner for å sammenligne og vurdere oppførselen til legeringene.

For alle prøvene uten varmebehandling observeres tilnærmet ingen forskjell mellom kurvene av samme repetisjon, noe som tyder på god validitet av resultatene, og indikerer vellykket testing. Det ble observert at test 8b hadde en ripe langs sveisen før testing, noe som kan ha kommet av frakt eller forbehandling av prøvestykket. Test 8b er en Alloy 625 råkbøyeprøve, og vises i figur 5.9c. Det ser ikke ut til at denne feilen hadde betydning for resultatene av bøyeprøvingen.

For prøvene med varmebehandling ble det litt større forskjeller mellom kurvene i samme repetisjon, særlig for råkbøyeprøvene for Alloy 625 med varmebehandling. Test 15b viser betydelig lavere resultater, noe som kan indikere påvirkning av en eller flere feilkilder. Resultatene fra denne testen anses derfor som invalide, og ekskluderes dermed fra videre sammenligning av resultater.

Generelle feilkilder

Faktorer som kan påvirke resultatene generelt, er ulike feilkilder både ved maskinen og det fysiske arbeidet som ble gjort i forbindelse med bøyetesting. Maskinen som ble brukt har en lastkapasitet på 100 kN. Belastningen som ble påført prøvestykkene var lavere enn forventet, noe som kan ha ført til unøyaktige målinger. Andre usikkerhetsfaktorer ved maskinen kan være feil i hydraulikksystemet, støy i signalomforming fra maskinen til datamaskin og skjev lastcelle i forhold til bøyefiksturen. I tillegg kan resultatene ha blitt påvirket av manglende stabilitet og ujevnheter i bøyefiksturen.

Plassering av prøvestykkene vurderes som det største usikkerhetsmomentet ved bøyep prøvingen. Prøvene ble plassert så rett som mulig på de parallelle rul-
lene, kun ved bruk av øyemål, da det manglet egnet verktøy for nøyaktig kontroll
av plasseringen. Usikkerheten ble begrenset ved at minst to personer dobbeltsjekket
at prøven var riktig plassert.

Likevel viser resultatene høy grad av repeterbarhet og vurderes dermed som et egnet
sammenligningsgrunnlag for de neste delkapitlene. Generelt vil det kun bli tatt med
en test av samme repetisjon.

5.2.2 Duktilitet

Resultatene fra bøyetestingen tillater blant annet bestemmelse av materialenes form-
barhet og evne til å deformeres uten at det oppstår brudd, samt hvordan sveisens
motstand mot brudd er. Felles for alle testene er at ingen resulterte i brudd. Dette
tyder på at begge legeringene er svært duktile og at sveisen holder. Figur 5.10 og
5.11 viser to forskjellige prøvestykker etter fullført test. Det er valgt å ta med bilder
kun av råkbøyep prøver da det ikke var noen synlig forskjell i overflaten mellom rot-
og råkbøyep prøve.



(a) Sett ovenfra

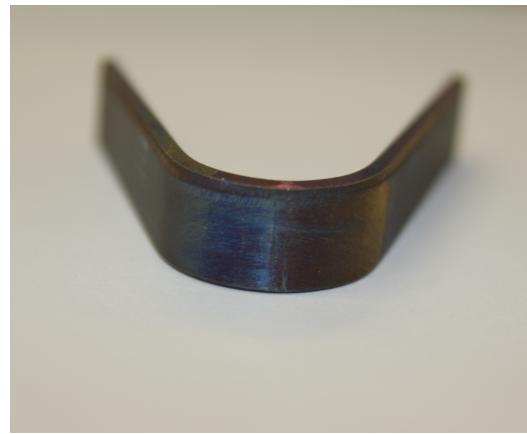


(b) Sett forfra

Figur 5.10: Alloy 617 råkbøyep prøve uten varmebehandling



(a) Sett ovenfra



(b) Sett forfra

Figur 5.11: Alloy 625 råkbøyeprøve med varmebehandling

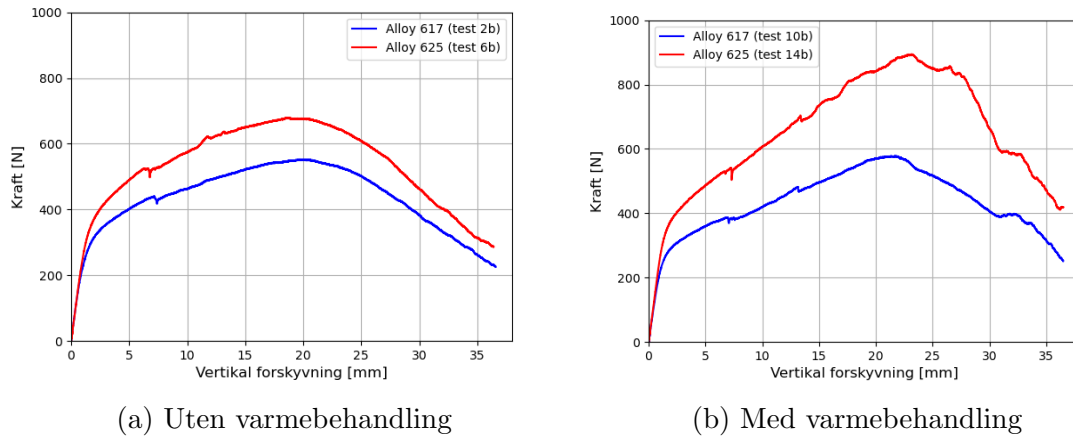
Prøvestykkene viser lite tegn til sprekker og defekter i overflaten. Det kan observeres svake “strekkmerker” på overflaten i buen nederst på prøvestykket. Disse merkene er ikke uforventet siden materialet og sveisen blir utsatt for en forholdsvis stor deformasjon. Prøvestykkene som var blitt varmebehandlet hadde noe mer tydelige merker enn de som ikke var varmebehandlet, som vises i figur 5.11 mot figur 5.10. Grunnen til dette er trolig at prøvestykkene fikk en litt annerledes kontur og farge på overflaten etter varmebehandling, som kan være lettere å se merkene på.

Det at materialene er duktile og at sveisen holder godt, bekreftes også med karakteristikken til kurvene på kraft-forskyvning diagrammene til bøyetestene, som vist i figur 5.9. Tendensen til kurvene er en økende kraft med økende forskyvning inntil maksimal bøyelast inntreffer. Deretter går kraften gradvis ned samtidig som forskyvningen øker. Hadde legeringene vært sprøere og gått til brudd under bøyeprovningene, hadde kurven gått raskere ned etter maksimal bøyelast, uten at forskyvningen hadde økt.

5.2.3 Maksimal bøyelast

Noe av det viktigste ved en bøyetest, er å vurdere kvaliteten og styrken til materialet, slik at det kan holde gitte belastningssituasjoner. Dette delkapitlet vil presentere resultater med fokus på den maksimale bøyelasten som ble påført prøvestykkene under bøyning. Først vil det bli gitt en overordnet sammenligning i kraft-forskyvning diagram, og deretter vil resultatene bli vist i detaljerte tabeller.

Figur 5.12 viser to kraft-forskyvning diagrammer for å illustrere og sammenligne styrken til de to legeringene, uten og med varmebehandling. Det er valgt å ta med kun rotbøyetest, da tendensen er helt lik for råkbøyetest. De blå kurvene viser resultatet for Alloy 617, og de røde kurvene for Alloy 625.



Figur 5.12: Sammenligning av styrken til Alloy 617 og Alloy 625 for rotbøyeprøve

Det observeres at kurven for Alloy 625 har et betydelig høyere toppunkt enn kurven for Alloy 617 både uten og med varmebehandling, med verdier opp mot 900 N for Alloy 625 og i underkant av 600 N for Alloy 617. Det betyr at Alloy 625 generelt tåler en høyere belastning enn Alloy 617, og kan generelt vurderes som et sterkere materiale, samtidig som at sveisen holder godt.

En detaljert oversikt over maksimal bøyelast for alle bøyeprovne er vist i tabell 5.13 og 5.14 for henholdsvis Alloy 617 og Alloy 625. Den maksimale bøyelasten er beregnet fra grafene i Python.

Tabell 5.13: Maksimal bøyelast for Alloy 617 med og uten varmebehandling

Alloy 617			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	Maksimal bøyelast [N]	Test nr.	Maksimal bøyelast [N]
1b (rot)	542	9b (rot)	554
2b (rot)	553	10b (rot)	578
3b (råk)	543	11b (råk)	552
4b (råk)	547	12b (råk)	596
Gjennomsnitt:	546		570

Tabell 5.14: Maksimal bøyelast for Alloy 625 med og uten varmebehandling

Alloy 625			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	Maksimal bøyelast [N]	Test nr.	Maksimal bøyelast [N]
5b (rot)	681	13b (rot)	873
6b (rot)	680	14b (rot)	894
7b (råk)	732	15b (råk)	744
8b (råk)	734	16b (råk)	903
Gjennomsnitt:		707 890	

Resultatene fra tabellene bekrefter at Alloy 625 generelt er en sterkere legering enn Alloy 617, både med og uten varmebehandling. Begge legeringene får økning i maksimal belastning etter varmebehandling. Prøvene som tåler høyest belastning er de varmebehandlede Alloy 625 prøvene.

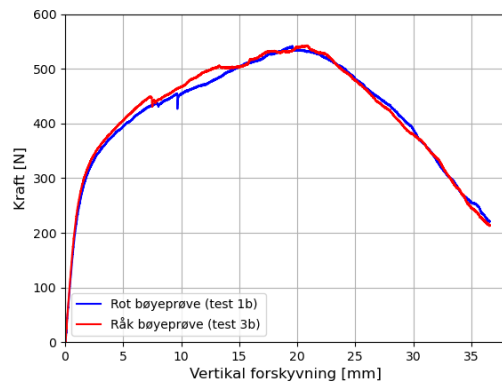
De to neste delkapitlene vil sammenligne og diskutere forskjellen i om bøyep prøvene er gjort med rot- eller råk-siden i strekk, og om prøvestykkene er varmebehandlet på forhånd eller ikke. Dette basert på den maksimale belastning legeringene tåler.

5.2.4 Sammenligning av rot- og råkbøyep prøve

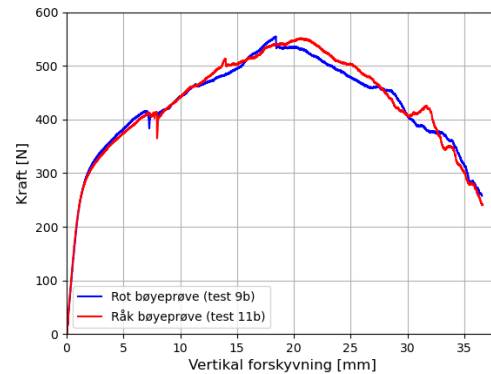
Halvparten av bøyep prøvene ble gjort med rot-siden i strekk, og halvparten med råk-siden i strekk. Sammenligningen tar utgangspunkt i en representativ fra hver type test.

Alloy 617

For å sammenligne rot- og råkbøyetestene, blir de to legeringene vurdert hver for seg. Figur 5.13 viser en sammenligning av rot- og råkbøyetest for legeringen Alloy 617, med og uten varmebehandling. De blå kurvene viser rotbøyetest, og de røde viser råkbøyetest.



(a) Uten varmebehandling



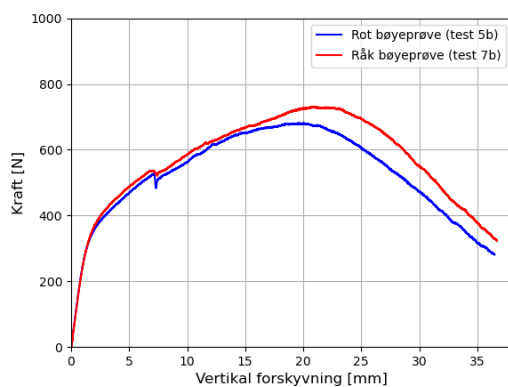
(b) Med varmebehandling

Figur 5.13: Sammenligning av rot- og råkbøyeprøve for Alloy 617

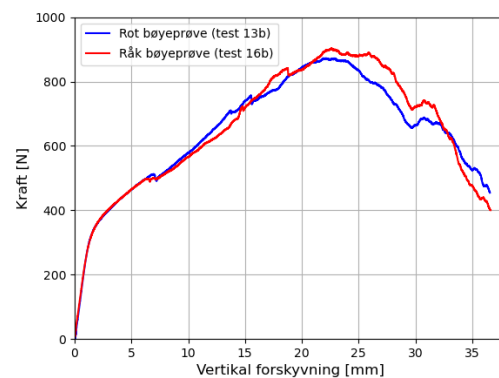
Resultatene viser liten påvirkning av om bøyeprøvene er gjort med rot- eller råk-siden i strekk for Alloy 617. Det ser ut til å være noe større forskjell for prøvestykkene som ble varmebehandlet i forkant, men dette kan også komme av at kurvene for prøvene med varmebehandling er mer ujevne.

Alloy 625

En sammenligning av rot- og råkbøyetest for Alloy 625, med og uten varmebehandling, illustreres i figur 5.14.



(a) Uten varmebehandling



(b) Med varmebehandling

Figur 5.14: Sammenligning av rot- og råkbøyeprøve for Alloy 625

For Alloy 625 er det større forskjeller i om bøyetestene er gjennomført med rot- eller råk-siden i strekk sammenlignet med Alloy 617. Dette bekreftes også ved verdiene for maksimal bøyelast, i tabell 5.14. Basert på gjennomsnittsverdier fra tabellen,

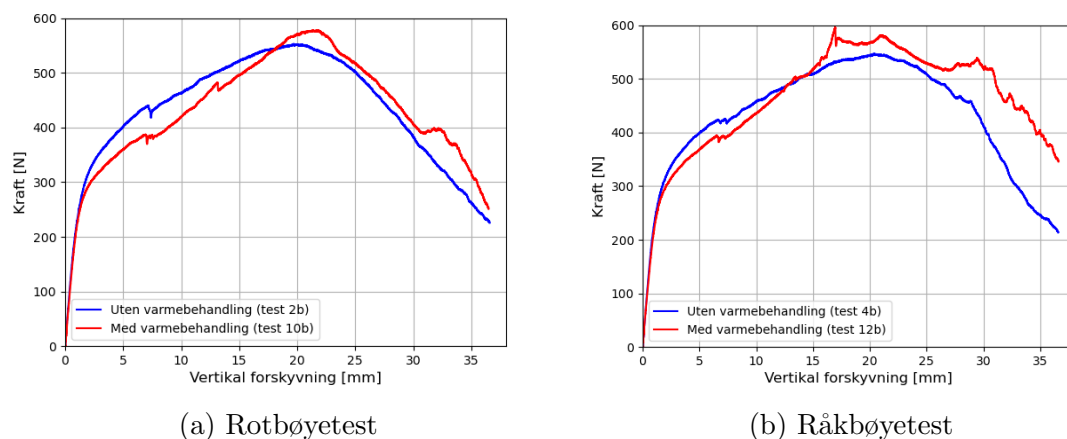
vises det at råkbøyeprøvene er omtrent 8% sterkere enn rotbøyeprøvene for Alloy 625, uten varmebehandling. For prøvene med varmebehandling er forskjellen mellom rot og råk noe mindre. Dersom man ser bort fra test 15b, er råkbøyeprøvene omtrent 2% sterkere enn rotbøyeprøvene. Råkbøyeprøvene er dermed sterkere enn rotbøyeprøvene for Alloy 625, både med og uten varmebehandling.

5.2.5 Varmebehandlingens påvirkning på legeringene

For å sammenligne og diskutere varmebehandlingens påvirkning, blir det sett på en legering av gangen, samt illustrert ett representativt resultat fra hver type test.

Alloy 617

Figur 5.15 viser en sammenligning av resultatene for Alloy 617 med og uten varmebehandling for både rot- og råkbøyetest. De blå kurvene viser prøver uten varmebehandling, og de røde kurvene viser prøver med varmebehandling.

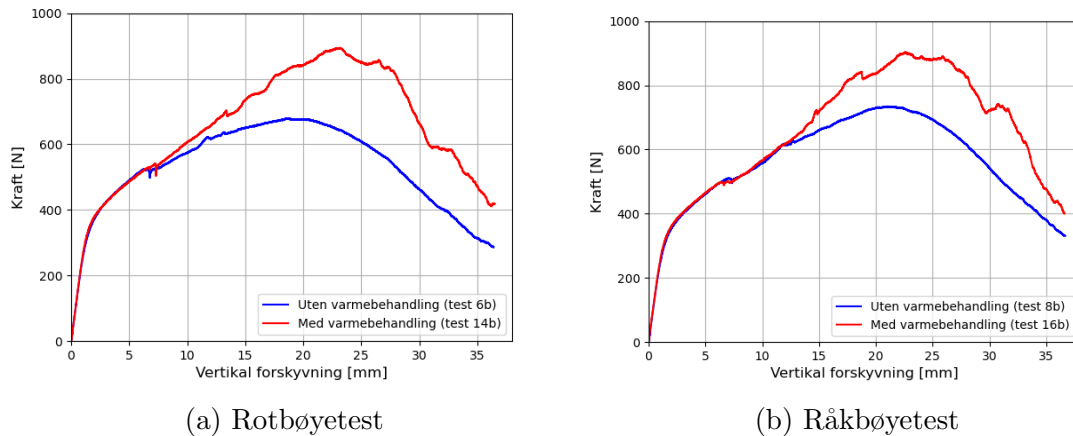


Figur 5.15: Sammenligning av bøyep prøver med og uten varmebehandling for Alloy 617

For Alloy 617 ser det ut til at varmebehandling fører til en liten økning i maksimal bøyelast, særlig for råkbøyetest. Dette underbygges av verdiene i tabell 5.13, der Alloy 617 bøyep prøvene får omtrent 4% høyere styrke med varmebehandling. Dette er basert på et gjennomsnitt av både rot- og råkbøyeprøvene.

Alloy 625

For Alloy 625 er en sammenligning av resultatene med og uten varmebehandling for både rot- og råkbøyetest vist i figur 5.15. Som for sammenligningen av rot- og råkbøyetester, har resultatene igjen større forskjeller for Alloy 625 sammenlignet med Alloy 617.



Figur 5.16: Sammenligning av bøyep prøver med og uten varmebehandling for Alloy 625

Figuren indikerer at varmebehandlingen fører til en betydelig økning i maksimal bøyelast for Alloy 625, både for rotbøyetest og råkbøyetest. Basert på numeriske verdier fra tabell 5.14, ble denne økningen beregnet til omtrent 25%. Alloy 625 bøyep prøvene blir dermed betydelig sterkere etter varmebehandlingen.

5.2.6 Bøyeenergi

For å sammenligne forskjellene i hvor mye energi som brukes ved bøyep prøvingen, er arealet under kraft-forskyvning kurvene funnet ved hjelp av trapes-metoden i Python. Resultatene er fremstilt i tabell 5.15 og 5.16 for henholdsvis Alloy 617 og Alloy 625. Verdiene bør ikke forveksles med seighet, da kraft og forskyvning ikke er omgjort til bøyepenning og bøyetøyning. Verdiene vil heller ikke være korrekte da forskyvningen er basert på maskinens forskyvning. Likevel er verdiene representative og et godt sammenligningsgrunnlag for å diskutere forskjellene i energi mellom de ulike bøyep testene.

Tabell 5.15: Energi for Alloy 617 med og uten varmebehandling

Alloy 617			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	Energi [J]	Test nr.	Energi [J]
1b (rot)	15,4	9b (rot)	15,6
2b (rot)	15,7	10b (rot)	15,7
3b (råk)	15,5	11b (råk)	15,8
4b (råk)	15,7	12b (råk)	16,9
Gjennomsnitt:	15,6		16,1

Tabell 5.16: Energi for Alloy 625 med og uten varmebehandling

Alloy 625			
Uten varmebehandling		Med varmebehandling	
Test nr.	Energi [J]	Test nr.	Energi [J]
5b (rot)	19,1	13b (rot)	23,5
6b (rot)	19,2	14b (rot)	23,6
7b (råk)	20,7	15b (råk)	20,5
8b (råk)	20,4	16b (råk)	23,8
Gjennomsnitt:	19,9		23,6

Resultatene for energi samsvarer med resultatene for maksimal bøyelast. For Alloy 617 er det lite forskjeller i energi for de ulike rot- og råkbøyetestene, både med og uten varmebehandling. For Alloy 625 øker energibruken med omtrent 20% etter varmebehandling.

Ved sammenligning av Alloy 617 og Alloy 625, kan det generelt observeres en markant forskjell i energien. En sammenligning av alle prøvene som ikke er varmebehandlet, viser at Alloy 625 krever omtrent 28% høyere energi enn Alloy 617. For alle de varmebehandlede prøvene er forskjellen enda høyere. Her krever Alloy 625 omtrent 47% høyere energi enn Alloy 617 for å bøye prøvene. Dette er basert på et gjennomsnitt av rot- og råkbøyeprøver, hvor test 15b er ekskludert. Den betydelige økningen i energibruk fra Alloy 617 til Alloy 625 samsvarer med tidligere resultater som indikerte at Alloy 625 er en sterkere legering.

6 Konklusjon og videre arbeid

Oppgaven fra Nammo Raufoss AS åpnet for materialprøving, med påfølgende analyse og sammenligningsstudie. Problemstillingen for prosjektet ble å karakterisere mekanisk respons etter sveising av to superlegeringer. Dette kapitlet vil konkludere på grunnlag av presenterte resultater og diskusjon. Konklusjonen tar for seg hvordan oppgaven har svart på problemstillingen, samt i hvilken grad resultatmålene er oppfylt. Avslutningsvis vil det bli gitt forslag til videre arbeid.

Konklusjon

I prosjektet har det blitt utført strekkprøving og bøyepøving etter sveising av de to nikkelbaserte superlegeringene Alloy 617 og Alloy 625. Testene ble utført uten vesentlige feil eller avvik, og ga dermed pålitelige resultater til analyser og sammenligning. Dette var grunnlaget for karakterisering av den mekaniske responsen til legeringene.

Sveiste prøvestykker til strekk- og bøyeteprøvingen ble dimensjonert i henhold til bestemte standarder. Halvparten av prøvene ble varmebehandlet i forkant av testingen for å simulere driftstemperaturen til komponenten legeringene er tiltenkt å brukes i. Under prøveforløpene ble kraft og forskyvning registrert. Rådata ble lagret i tekstfiler, og ble videre behandlet i Python og Excel. Dette dannet grunnlaget for analyser og sammenligning av de to legeringene.

Basert på resultatene for strekkprøvingene og bøyepøvingene konkluderes det med at Alloy 625 er en sterkere legering enn Alloy 617. Strekktestene viste en høyere flytegrense og strekkfasthet for Alloy 625. Fra bøyepøvingen tålte også Alloy 625 høyere belastning og krevde høyere energi for å bøyes enn Alloy 617. På den andre siden viste resultatene fra strekkprøvingen at Alloy 617 fikk en langt høyere tøyning før brudd. Alloy 617 viste seg derfor å være et mer duktilt materiale enn Alloy 625.

Sveisen har større innvirkning på materialet for Alloy 625 sammenlignet med Alloy 617. Varmebehandlingen økte styrken til legeringene, særlig for Alloy 625. For begge legeringene hadde varmebehandlingen lite påvirkning på duktiliteten. Ved sammenligning av resultatene fra testene mot relevant materialdata, var det større avvik for Alloy 625 enn Alloy 617. Det kan konkluderes med at Alloy 617 hadde mer konsistente resultater opp mot relevant materialdata.

Videre arbeid

Resultatene fra prosjektet kan bidra til Nammos vurdering av hvilken legering som skal brukes i en thruster på en bærerakett. Forslag til videre arbeid baseres på erfaringer fra gjennomføring av testene og analysering av resultatene. Det mulig å øke validiteten av resultatene ved å utføre flere repetisjoner av både strekkprøver og bøyeprøver. I tillegg kan nøyaktigheten økes ved å bruke en maskin med lavere lastkapasitet enn hva som ble brukt i dette prosjektet. Eksensometer kan benyttes for å få nøyaktige resultater for lengdeendring i det elastiske området under strekkprøving. For bøyeprøvingen kan en mer solid bøyefikstur øke nøyaktigheten til resultatene.

Dette prosjektet danner et godt grunnlag for ytterligere materialprøving, for eksempel bruddseighetsprøving. Dette vil tilføre enda en parameter til karakteriseringen av den mekaniske responsen til legeringene. Bruddseighetsprøving kan brukes for å estimere legeringenes kritiske spenningsintensitetsfaktor, K_c . Resultater fra bruddseighetsprøving kan være nyttig for en grundigere vurdering av de to legeringene og en nærmere undersøkelse av sveisen og HAZ-sonen.

Referanser

- Azom (2020). *Tensile Testing Grips - A Guide to Buying the Correct Fixtures*. Section: Materials Article. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4593> (sjekket 2. mai 2023).
- Brekke, Pål (2023). *Norge som romnasjon*. URL: <https://www.romsenter.no/no/Laerom-rommet/Norge-som-romnasjon> (sjekket 1. mai 2023).
- Constructionmanuals (2023). *Guided-Bend Test*. URL: <https://constructionmanuals.tpub.com/14250/css/Guided-Bend-Test-171.htm> (sjekket 12. apr. 2023).
- Corrotherm (2023a). *Inconel 617 — Inconel Alloy 617 — Corrotherm International*. URL: <https://www.corrotherm.co.uk/grades/inconel-617> (sjekket 12. apr. 2023).
- Corrotherm (2023b). *Inconel 625 — Alloy 625 — Corrotherm International*. URL: <https://www.corrotherm.co.uk/grades/inconel-625> (sjekket 16. mai 2023).
- Dørum, Arne (2001). *Maskindeler 1*. Trondheim: Akademika.
- ECSS, European Space Agency for the members of (2009). *Space product assurance*. Tekn. rapp. URL: <http://esmat.esa.int/ECSS-Q-ST-70C.pdf>.
- Engineering Materials-Tribology-Design (2020). *Toughness of Materials (Tensile test, Notched bar impact test and the fracture mechanics approach)*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cKy2nn1xuUw> (sjekket 15. mai 2023).
- Falck-Ytter, Harald (1984). *Materialteknologi. 1: Grunnlag*. Oslo: Yrkesopplæring. URL: https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2013061805106 (sjekket 22. mar. 2023).
- FN sambandet (2023a). *Ansvarlig forbruk og produksjon*. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon> (sjekket 1. mai 2023).
- FN sambandet (2023b). *FNs bærekraftsmål*. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (sjekket 1. mai 2023).
- FN sambandet (2023c). *Industri, innovasjon og infrastruktur*. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur> (sjekket 1. mai 2023).
- Frost-Nielsen, Per Marius og Torgeir E. Særveraas (2009). *Luftmakt og teknologi - realisme eller overmot?* Trondheim: Tapir Akademisk Forlag. URL: <https://fhs.brage.unit.no/fhs-xmlui/bitstream/handle/11250/2670823/Skriftserien%20vol%2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (sjekket 1. mai 2023).

-
- Graham, Adrian J mfl. (2019). *ECSS-Q-ST-70 Materials*.
- Grøn, Øyvind (2022). *strekprøving*. URL: <https://snl.no/strekpr%C3%B8ving> (sjekket 14. apr. 2023).
- Halmøy, Einar, Almar Almar-Næss og Tor John Rødsås (2023). *sveising*. URL: <https://snl.no/sveising> (sjekket 2. apr. 2023).
- Husø, Øivind (2022). *strekfasthet*. URL: <https://snl.no/strekfasthet> (sjekket 11. mai 2023).
- Industriskolen (2018). *Materialprøving*. URL: <https://ndla.no/subject:1:84d4651b-fc52-4876-a066-f8567ecf79a6/topic:7805f91e-0401-44c5-ab12-6eecd5d0288/topic:310ff165-f2e4-4f1a-82f4-06544ec561f9/resource:1:44899> (sjekket 22. mar. 2023).
- Instron (2023a). *Three-Point Bend Test Fixtures*. en. URL: <https://www.instron.com/en/products/testing-accessories/flexure-fixtures/three-point-bend-test-fixtures> (sjekket 21. apr. 2023).
- Instron (2023b). *What is Bend Testing?* URL: <https://www.instron.com/en/resources/test-types/flexure-test> (sjekket 24. mar. 2023).
- Jacquet (2023). *JCQusa-alloy-625.pdf*. URL: <https://montreal.myjacquet.com/files/JCQusa-alloy-625.pdf> (sjekket 12. apr. 2023).
- Johansen, Henning (2010). *MEKANISKE EGENSKAPER OG TESTING AV DEM*. URL: [http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/9.%20mekaniske%20egenskaper%20og%20testing/Materiallaere-IM-9-Mekaniske%20egenskaper%20og%20testing%20\(IM+TDL\)-10.pdf](http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/9.%20mekaniske%20egenskaper%20og%20testing/Materiallaere-IM-9-Mekaniske%20egenskaper%20og%20testing%20(IM+TDL)-10.pdf) (sjekket 6. mai 2023).
- Kumaravel Kalaiselvan, Isaac Dinaharan og Nadarajan Murugan (2021). «Routes for the Joining of Metal Matrix Composite Materials». I: *Encyclopedia of Materials: Composites*. Elsevier. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/laser-beam-welding>.
- Lohne, Otto (2023a). *duktilitet*. URL: <https://snl.no/duktilitet> (sjekket 6. mai 2023).
- Lohne, Otto (2023b). *flytegrense*. URL: <https://snl.no/flytegrense> (sjekket 9. mai 2023).
- Manufacturing Guide Sweden AB (2023). *Tensile testing*. URL: <https://www.manufacturingguide.com/en/tensile-testing> (sjekket 17. apr. 2023).
- Mathers, Gene (2004). *Bend Testing*. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/bend-testing-073.aspx> (sjekket 24. mar. 2023).
-

-
- Michigan Technological University (2023). *Tensile Test Experiment*. URL: <https://www.mtu.edu/materials/k12/experiments/tensile/> (sjekket 15. mai 2023).
- Nammo (2023). *220N Monopropellant Thruster*. en-US. URL: <https://www.nammo.com/product/220n-h2o2-thruster/> (sjekket 17. apr. 2023).
- Newman, Ian (2023). *Mechanical Properties and Applications of INCONEL Alloy 617*. URL: <https://www.corrotherm.co.uk/blog/mechanical-properties-and-applications-of-inconel-alloy-617> (sjekket 11. apr. 2023).
- Norman E. Dowling, Stephen L. Kampe og Milo V. Kral (2019). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*. 5. utgave. London: Pearson Education Limited.
- Norsk Romsenter (2023). *Miljø- og klimaovervåkning*. no. URL: <https://www.romsenter.no/no/Fagomraader/Jordobservasjon2/Miljoe-og-klimaovervaakning> (sjekket 13. mai 2023).
- Nuclear Power (2023). *Fracture Strength – Fracture Point*. URL: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/materials-science/material-properties/strength/stress-strain-curve-stress-strain-diagram/fracture-strength-fracture-point/> (sjekket 11. mai 2023).
- Ormestad, Helmut (2023). *elastisitetsmodul*. URL: <https://snl.no/elastisitetsmodul> (sjekket 11. mai 2023).
- Specialmetals (2023a). *inconel alloy 617*. URL: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-617.pdf> (sjekket 11. apr. 2023).
- Specialmetals (2023b). *inconel alloy 625*. URL: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf> (sjekket 11. apr. 2023).
- Standard Norge (2020). *Metalliske materialer — Strekkprøving — Del 1: Metode for prøving ved romtemperatur (ISO 6892-1:2019)*. Tekn. rapp. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1122592> (sjekket 3. feb. 2023).
- Standard Norge (jun. 2022a). *Destruktiv prøving av sveis i metalliske materialer — Tverrgående strekkprøving (ISO 4136:2022)*. Tekn. rapp. Switzerland. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1426152> (sjekket 20. feb. 2023).
-

-
- Standard Norge (2022b). *ISO 4136:2022; Destruktiv prøving av sveis i metalliske materialer - Tverrgående strekkprøving*. Tekn. rapp. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1426152>.
- Standard Norge (2023). *NS-EN ISO 5173:2023*. Tekn. rapp. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1496702>.
- Store norske leksikon (2019a). *bøying*. URL: <https://snl.no/b%C3%B8ying> (sjekket 24. mar. 2023).
- Store norske leksikon (2019b). *inconel*. no. URL: <https://snl.no/inconel> (sjekket 15. mai 2023).
- Store norske leksikon (2023). *Mekaniske egenskaper*. URL: https://snl.no/mekaniske_egenskaper (sjekket 22. mar. 2023).
- Terjesen, Geir (2021). *Dimensjoneringssteknikk for ingeniører*. Fagbokforlaget. (Sjekket 20. apr. 2023).
- Testresources (2023). *Bend Test*. URL: <https://www.testresources.net/applications/test-types/bend-test/> (sjekket 12. apr. 2023).
- The Efficient Engineer (2020). *Understanding Material Strength, Ductility and Toughness*. URL: <https://efficientengineer.com/material-strength-ductility-toughness/> (sjekket 20. mai 2023).
- The Efficient Engineer (2023). *Understanding Young's Modulus*. URL: <https://efficientengineer.com/youngs-modulus/> (sjekket 11. mai 2023).
- TUV Rheinland (2018). *Why Everyone Should Care About Tensile Testing (And How to Conduct a Proper One)*. URL: <https://insights.tuv.com/blog/why-everyone-should-care-about-tensile-testing-and-how-to-conduct-a-proper-one> (sjekket 15. mai 2023).
- TWI (2023). *What is Electron Beam Welding? Process Definition and Advantages*. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-electron-beam-welding.aspx> (sjekket 2. apr. 2023).
- University of Birmingham (2023). *Physics - Young's modulus*. URL: <https://www.birmingham.ac.uk/teachers/study-resources/stem/physics/youngs-modulus.aspx> (sjekket 11. mai 2023).
- Urke, Eirik Helland (2019). *Nammo har landet sin hittil største romfartskontrakt*. URL: <https://www.tu.no/artikler/nammo-har-landet-sin-hittil-storste-romfartskontrakt/462053> (sjekket 17. apr. 2023).
-

-
- Wikipedia (2021). *Rakettdrivstoff*. nb. URL: <https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Rakettdrivstoff&oldid=21670579> (sjekket 15. mai 2023).
- Wikipedia (2022). *Sveising*. URL: <https://nn.wikipedia.org/w/index.php?title=Sveising&oldid=3427508> (sjekket 2. apr. 2023).
- Xometry (2023a). *Tensile Strength: Definition, Importance, Types, and Examples*. URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/tensile-strength/> (sjekket 11. mai 2023).
- Xometry (2023b). *Yield Strength: Definition, Importance, Graphs, and How to Calculate*. URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/yield-strength/> (sjekket 11. mai 2023).

Vedlegg

A Risikovurdering

RISK ASSESSMENT

ONLY VALID FOR DETAILED ACTIVITIES LISTED IN SECTION 5

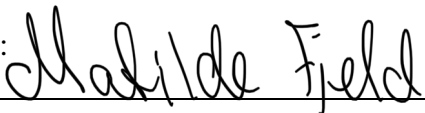

1. Identification

Laboratory name: Fatigue, Fracture and Mechanical Characterization Laboratory	Room number: 102F
User's name: Matilde Fjeld	<input type="checkbox"/> Master <input type="checkbox"/> PhD <input type="checkbox"/> Post-Doc <input type="checkbox"/> SINTEF <input checked="" type="checkbox"/> Other: BSc
User's e-mail: matildcf@stud.ntnu.no	User's Phone: 95109311
Supervisor: Anna Olsen	Supervisor's phone: 73412532
Project number: MTP-K-2023-08	
Period: 09.01.2023-26.05.2023	

Description of the project and needs:
<p>The project aims to characterize the mechanical response after welding two nickel-based superalloys, Alloy 617 and Alloy 625. This will be done by performing three different tests, fracture toughness tests, bending tests and tensile tests. The purpose of the project is to carry out a comparative study, both between the two alloys in question, and verify the validity of the results. The results from the tests say something about how the integrity of the weld and the HAZ-zone is affected by the welding and the operating temperature.</p>

2. Signatures

The user and the supervisor are aware of all the risks involved in the lab activities that are going to be performed. Additionally, the user confirms that they will follow the preventive measures described in this form to minimize all the risks that have been identified.

User's signature	Supervisor's signature
Signature: 	Signature: 
Name: Matilde Fjeld	Name: Anna Olsen
Date: 07.03.2023	Date: 07.03.2023

Approved by:

Signature:	Name:	Date:
------------	-------	-------

Room responsible:	Romansvarlig var	ikke til stede for signering	
Lab manager:	<i>Arve Skorstad</i>	Arve Skorstad	16.03.2023

Note: a pdf copy with all signatures shall be sent to everyone who has signed above.

3. Team (write "NR" if not relevant)

Project manager and organization (Student)	Mari Røyne Valle, Matilde Fjeld, Guri Sollien Hulbak	Responsible for instrumentation	Mari Røyne Valle, Matilde Fjeld, Guri Sollien Hulbak
Laboratory responsible	Christian Frugone	Operator	Mari Røyne Valle, Matilde Fjeld, Guri Sollien Hulbak
Auditor for safety check	Sayed Mohammad Javad Razavi	Responsible for running the experiment	Mari Røyne Valle, Matilde Fjeld, Guri Sollien Hulbak
Responsible for experimental and scientific content (Advisor)	Sayed Mohammad Javad Razavi	Responsible for logging and storing experimental data	Mari Røyne Valle, Matilde Fjeld, Guri Sollien Hulbak
Responsible for dimensioning load bearing and pressurized components	NR	Responsible for building the rig	Mari Røyne Valle, Matilde Fjeld, Guri Sollien Hulbak

4. Administration

Answer: Yes, No or NR (Not relevant)

Is the work order signed? (only for external work)	NR
Has the operator the required courses/training on the equipment?	Yes
Has the operator followed the safety courses? (Mandatory)	Yes
Can the work be done alone?	Yes
- If not, the work may have to be done under special conditions (evaluated in section 5)	
Does an expert have to check the start of the experiment?	Yes
- If yes, who?	Christian Frugone

5.1 Description of the Activity

Tensile testing

For each activity performed in the lab, health risks affecting the user or others need to be identified. For each risk identified, a preventive measure must be performed, and the final risk value calculated with the “risk matrix”. Explanation of the “risk matrix” can be found in the last page of this form.

This page must be replicated for each different activity performed in the lab. Activities involving the use of chemicals must be filled out in the page titled “Chemical Risk Assessment” in section 5.2.

Activity: Tensile testing in MTS-series 809 Axial/Torsional 100kN machine

Risk overview: (mark with X the risk that applies for the activity)

Big loads	X	Danger of fire	
Heavy lifting		Working at heights	
Hanging load		Hydraulic pressure	X
Gas pressure		Water pressure	
High temperature		Low temperature	
Parts at high velocity		Chemicals, if yes; fill in sect. 5.2	
Sudden acceleration at fracture/failure	X	Pre-tensioned components	
Dangerous dust		Severe noise	
Danger of pinching	X	Rotating parts	

Detailed risk evaluation:

Risks
1. Pinching finger
2. Potential for sudden break of specimen

Risk	Probability (P) (1-5)	Consequence (C)				Risk value (P x C)
		Health (1-5)	Material values (1-5)	Environment (1-5)	Reputation (1-5)	
1	3	2	1	1	1	6
2	2	4	2	1	1	8

Risk matrix of the activity before any safety measures has been applied (Include corresponding color):

Required safety equipment (mark with X the risk that applies for the activity):

Glasses	X	Safety shoes	
Helmet		Gloves	
Screen	X	Lifting equipment	
Ear protection		Hazard suit	
Harness ropes, other measures to prevent falling		Fume hood	
Lab coat			

Description of other safety measurements: Eg. Safety cap on the instrument prevents the risk of... and/ or the probability of...

Risk after preventative and corrective measures:

Risks	Preventative and corrective measures
1. Pinching fingers	Proper management of the machine and paying attention while at the lab.
2. Potential for sudden break of specimen	Use of safety glasses and protective screen

Risk matrix of the activity after safety measures has been applied:

Risk	Probability (P) (1-5)	Consequence (C)				Risk value (P x C)
		Health (1-5)	Material values (1-5)	Environment (1-5)	Reputation (1-5)	
1	1	2	1	1	1	2
2	2	2	2	1	1	4
3						

5.2 Description of the Activity

Bend testing

For each activity performed in the lab, health risks affecting the user or others need to be identified. For each risk identified, a preventive measure must be performed, and the final risk value calculated with the “risk matrix”. Explanation of the “risk matrix” can be found in the last page of this form.

This page must be replicated for each different activity performed in the lab. Activities involving the use of chemicals must be filled out in the page titled “Chemical Risk Assessment” in section 5.2.

Activity: Bend testing in MTS-series 809 Axial/Torsional 100kN machine

Risk overview: (mark with X the risk that applies for the activity)

Big loads		Danger of fire	
Heavy lifting		Working at heights	
Hanging load		Hydraulic pressure	X
Gas pressure		Water pressure	
High temperature		Low temperature	
Parts at high velocity		Chemicals, if yes; fill in sect. 5.2	
Sudden acceleration at fracture/failure	X	Pre-tensioned components	
Dangerous dust		Severe noise	
Danger of pinching	X	Rotating parts	

Detailed risk evaluation:

Risks
1. Pinching finger
2. Potential for sudden break of specimen
3.

Risk	Probability (P) (1-5)	Consequence (C)				Risk value (P x C)
		Health (1-5)	Material values (1-5)	Environment (1-5)	Reputation (1-5)	
1	2	3	1	1	1	6
2	3	2	2	1	1	6
3						

Risk matrix of the activity before any safety measures has been applied (Include corresponding color):

Required safety equipment (mark with X the risk that applies for the activity):

Glasses	X	Safety shoes	X
Helmet		Gloves	X
Screen	X	Lifting equipment	
Ear protection		Hazard suit	
Harness ropes, other measures to prevent falling		Fume hood	
Lab coat			

Description of other safety measurements: Eg. Safety cap on the instrument prevents the risk of... and/ or the probability of...

Risk after preventative and corrective measures:

Risks	Preventative and corrective measures
1. Pinching finger	Proper management of the machine
2. Potensial for sudden break of specimen	Use of safety glasses, protective screen, gloves and safety shoes.
3.	

Risk matrix of the activity after safety measures has been applied:

Risk	Probability (P) (1-5)	Consequence (C)				Risk value (P x C)
		Health (1-5)	Material values (1-5)	Environment (1-5)	Reputation (1-5)	
1	1	2	1	1	1	2
2	3	1	2	1	1	6
3						

6 Sources for mistakes/errors

Is the following considered? Answer: Yes, No or NR (Not relevant)

Loss of electricity	Yes	Voltage surge	No
Electrical earth failure	Yes	Insufficient power of the machine	No
Climate control in the room (temperature, humidity, etc...)	No	Water jet	No
Unstable pressure or hydraulic force	Yes	Unintended interruption of power supply	Yes
Are load and displacement limits established?	Yes	Leakage of pipes, hoses, joints, etc...	NR
Possible interference from other activities	NR	Possible interference towards other activities	NR
Troubles in acquisition and storage	Yes	Fire in the laboratory	Yes

7 Calibration of equipment

If a calibration of the equipment is performed during the activity, please indicate the date:

Equipment	Date (dd.mm.yy)
A calibration is performed before testing	

8 Traceability

Answer: Yes, No or NR (Not relevant)

Are all experimental materials known and traceable?	Yes
Is there a plan for marking all specimens?	Yes
Is the data acquisition equipment identified?	Yes
Are the original data stored safely without modification?	Yes
Is there a back-up procedure for the data (hard disk crash)?	Yes
Is there a plan for storing samples after testing?	Yes
Is there a plan for disposing of old samples?	Yes

9 Conclusion

In conclusion there is a medium to acceptable risk with this project.

Risk matrix explanation

		Health	Material values	Reputation	Environment
Grade	1	Minor injury/strain that requires simple treatment. Reversible injury. Short recovery time.	Operational shutdown, or shutdown of activities <1 day.	Little effect on credibility and respect.	Negligible injury and short recovery time.
	2	Injury/strain that requires medical treatment. Reversible injury/strain. Short recovery time.	Operational shutdown, or shutdown of activities <1 week.	Negative effect on credibility and respect.	Minor injury and short recovery time.
	3	Serious injury/strain that requires medical treatment. Lengthy recovery time.	Operational shutdown, or shutdown of activities <1 month.	Reduced credibility and respect.	Minor injury and lengthy recovery time.
	4	Serious injury/strain that requires medical treatment. Possible disability /permanent disability.	Operational shutdown > 1/2 year. Shutdown of activities up to 1 year.	Credibility and respect considerably reduced.	Long-lasting injury. Lengthy recovery time.
	5	Death or disability / permanent disability.	Operational shutdown, or shutdown of activities >1 year.	Credibility and respect considerably and permanently reduced.	Very long-lasting and irreversible injury.

Consequence (C)	Very serious	5	10	15	20	25
	Serious	4	8	12	16	20
	Moderate	3	6	9	12	15
	Little	2	4	6	8	10
	Very little	1	2	3	4	5
		Very little	Little	Medium	Big	Very big
Probability (P)						

Red	Unacceptable risk. Measures need to be implemented.
Yellow	Medium risk. Measures need to be considered.
Green	Acceptable risk. Measures can be considered.

Add the color of the risk matrix that corresponds with the value you have placed in your personal risk matrix.

B Testmatriser

B.1 Testmatrise strekkprøving

B.2 Testmatrise bøyepøving

Rekkefølge:
8T
7T
5T
10T
3T
2T
12T
4T
9T
6T
1T
11T

Testmatrise strekkprøving															
Test nr	Materiale	Platentr.	Totalengde (før testing)	Lengde (parallelområde) før testing	Målelengder			Tversnittareal [mm²]	Kraft ved brudd	Startposisjon		Sluttposisjon		Kommentar	
					L1	L2	L3	Før	Etter		Innstilt verdi	Sann verdi	Innstilt verdi	Sann verdi	
Uten varmebehandling															
Test 1T	617	4 2	161,4	60	Før: 20,2 Etter: 34,2	Før: 40 Etter: 59,85	Før: 60,15 Etter: 94,1	12*1,95	8,7*1,45	16,8kN	-50	-49,97	70 ned	-9,744	Bredde på 24,1. Lastcella stod ikke 100% rett, kan være årsaken til brudd først på den ene siden.
Test 2T	617	4 1	161,9	60	Før: 19,9 Etter: 34	Før: 39,85 Etter: 65,834	Før: 59,75 Etter: 95,55	12,1*2	8,55*1,5	16,2kN	-50	-49,96	70 ned	-8,937	
Test 3T	617	4 3	161,7	60	Før: 19,55 Etter: 31,2	Før: 39,95 Etter: 65,9	Før: 59,65 Etter: 96,8	12*1,95	8,8*1,45	16,2kN	-50	-49,97	70 ned	-7,5	Load protect ble skrudd på etter festing
Test 4T	625	4 1	140	60	Før: 19,9 Etter: 27,2	Før: 40,1 Etter: 52,7	Før: 59,75 Etter: 78,55	2*12	10,1*1,7	21kN	-50	-49,72	70 ned	-27,96	Brudd i sveis
Test 5T	625	4 2	140	60	Før: 19,7 Etter: 25,75	Før: 39,7 Etter: 50,4	Før: 59,55 Etter: 74,4	12*1,95	10,4*1,7	19,29kN	-50	-49,97	70 ned	-33,27	Brudd i sveis
Test 6T	625	6 1	139,9	60	Før: 19,85 Etter: 27,6	Før: 39,5 Etter: 52,65	Før: 59,75 Etter: 79,3	12*1,95	10,05*1,4	20,15kN	-50	-49,88	70 ned	-27,71	Brudd i sveis
Med varmebehandling															
Test 7T	617	6 2	161,7	60	Før: 20,4 Etter: 33,65	Før: 39,3 Etter: 64,1	Før: 60,5 Etter: 97,2	2*12,05	8,55*1,5	17,81kN	-50	-49,96	70 ned	-6,4	
Test 8T	617	6 3	162,4	60	Før:20,5 Etter: 34,1	Før: 40,1 Etter: 66,05	Før: 60 Etter: 96,35	12*2	8,75*1,55	17,19kN	-50	-49,97	20 ned	-7,2	Måtte endre til 70 underveis, maskinen stoppet ikke, så ingen påvirkning. Brudd litt under sveisen.
Test 9T	617	6 1	161,7	60	Før: 19,5 Etter: 31,8	Før: 39,8 Etter: 66,85	Før: 60 Etter: 97,8	12*2	8,75*1,4	17kN	-50	-49,98	70 ned	-5,036	Litte hopp på -11,3 mm (disp.)
Test 10T	625	3 1	140,1	60	Før: 10,85 Etter: 26,75	Før: 39,65 Etter: 52,05	Før: 59,4 Etter: 77,8	12*2	10,05*1,7	20,05kN	-50	-49,87	70 ned	-28,83	Brudd i sveis
Test 11T	625	6 2	140	60	Før: 20,4 Etter: 26,25	Før: 39,9 Etter: 51,2	Før: 59,75 Etter: 75,75	12*1,95	10,15*1,55	20kN	-50	-49,85	70 ned	-31,56	
Test 12T	625	3 2	140	60	Før: 19,9 Etter: 26,2	Før: 39,9 Etter: 50,75	Før: 59,85 Etter: 75,4	12*2	10,22*1,65	20kN	-50	-49,86	70 ned	-32,08	Brudd i sveis

- Rekkefølge:
1. Test 1b

2. Test 3b

3. Test 5b

4. Test 7b

5. Test 2b

6. Test 9b

7. Test 11b

8. Test 13b

9. Test 15b

10. Test 4b

11. Test 6b

12. Test 8b

13. Test 10b

14. Test 12b

15. Test 14b

16. Test 16b

Testmatrise bøyeprøving											
Test nr	Rot/råk	Materiale	Platenr.	Gjennomføringsdato	Startposisjon		Sluttposisjon		Max load [kN]	Kommentar	
					Innstilt verdi	Sann verdi	Innstilt verdi	Sann verdi			
Uten varmebehandling											
Test 1b	Rot	617	3_1	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,54	Kalibrerte før start. Et lite hopp på -25	
Test 2b	Rot	617	3_3	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,55	Hopp på ca -21mm	
Test 3b	Råk	617	3_2	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,54	Lite hopp på -21,5. Litt mer "stegvis" mot toppen.	
Test 4b	Råk	617	3_4	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,55		
Test 5b	Rot	625	7_4	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,68	Lite hopp på -21,5 mm	
Test 6b	Rot	625	7_1	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5		-0,68		
Test 7b	Råk	625	7_2	28.03.2023	-13,5	-13,5	50,5	-50,5		Mindre hopp på -21 mm (så ut som et mindre hopp enn på test 1b, 3b og 7b som er gjort til nå). Glemte å notere max load	
Test 8b	Råk	625	7_3	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,73	Denne hadde liten ripe langs sveisen før testing.	
Med varmebehandling											
Test 9b	Rot	617	5_1	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,56		
Test 10b	Rot	617	5_4	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,58	Hopp på -21mm	
Test 11b	Råk	617	5_2	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,55	Hopp på -22, litt større enn på 625 materiale. Kan skyldes at rullene vrir seg.	
Test 12b	Råk	617	5_3	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,55	Lite hopp på -20,5. Hopp ned på -31, og flata ut litt før kraften gikk ned igjen.	
Test 13b	Rot	625	5_3	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,87	Tre små hopp på -21, -28, -30	
Test 14b	Rot	625	5_2	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,89	Hopp på -21,5	
Test 15b	Råk	625	5_4	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,74	Kalibrerte maskinen før start	
Test 16b	Råk	625	5_1	28.03.2023	-13,5	-13,5	-50,5	-50,5	-0,88		

C Resultatmatrise

C.1 Materialegenskaper

C.2 Lengder parallellområdet og bruddforlengelse

C.3 Tverrsnittsareal og bruddkontraksjon

C.4 Gjennomsnitt materialegenskaper

Materiallegenskaper strekk											
Test	Materiale	Behandling	Seighet (toughness) [J/mm³]	0,2% flytetøyning [-]	0,2% flytespenning [MPa]	R _m [MPa]	Estimert E-modul [Gpa] (fra maskin)	Bruddpunkt		Duktilitet [%]	
								Spennig [Mpa]	Tøyning [%]		
1s	617	u/ VB		0,389		327,275	718,298	89,40	671,25	66	65,3
2s	617	u/ VB		0,392	0,00518	323,868	699,529	101,90	505,42	67,9	67,4
3s	617	u/ VB		0,411	0,00583	334,827	705,378	87,52	247,71	70,4	70,2
4s	625	u/ VB		0,253	0,00673	457,185	834,758	96,71	835	35,4	34,5
5s	625	u/ VB		0,185	0,00708	456,043	800,05	89,83	799,58	27,3	26,4
6s	625	u/ VB		0,267	0,00713	468,749	850,139	91,42	812,92	36,6	35,7
7s	617	m/ VB		0,440	0,00541	322,262	735,533	94,46	618,33	72,7	72
8s	617	m/ VB		0,417	0,00549	328,144	716,141	93,92	654,58	70,9	70,2
9s	617	m/ VB		0,449	0,00553	327,819	726,58	92,88	683,33	74,4	73,7
10s	625	m/ VB		0,257	0,00765	507,353	860,272	89,74	829,17	34,6	33,7
11s	625	m/ VB		0,215	0,00725	482,695	831,633	91,87	800	30,2	29,3
12s	625	m/ VB		0,199	0,00709	454,110	814,183	89,30	809,17	28,7	27,8

Materiallegenskaper bøy				
Test	Materiale	Behandling	Rot/råke	Max kraft
1b	617	u/ VB	rot	541,7
2b	617	u/ VB	rot	552,6
3b	617	u/ VB	råke	542,8
4b	617	u/ VB	råke	546,6
5b	625	u/ VB	rot	681,1
6b	625	u/ VB	rot	679,5
7b	625	u/ VB	råke	731,5
8b	625	u/ VB	råke	734,4
9b	617	m/ VB	rot	554,4
10b	617	m/ VB	rot	578
11b	617	m/ VB	råke	551,5
12b	617	m/ VB	råke	595,6
13b	625	m/ VB	rot	872,5
14b	625	m/ VB	rot	894,4
15b	625	m/ VB	råke	744,4
16b	625	m/ VB	råke	903,1

Lengder parallellområde											
Test	Materiale	Behandling	L1 før	L1 etter	ΔL1	L2 før	L2 etter	ΔL2	L3 før	L3 etter	ΔL3
1s	617	u/ VB	20,2	34,2	14	40	59,85	19,85	60,15	94,1	33,95
2s	617	u/ VB	19,9	34	14,1	39,85	65,834	25,984	59,75	95,55	35,8
3s	617	u/ VB	19,55	31,2	11,65	39,95	65,9	25,95	59,65	96,8	37,15
	Gjennomsnitt:		19,8833333	33,1333333	13,25	39,9333333	63,86133333	23,928	59,85	95,4833333	35,6333333
4s	625	u/ VB	19,9	27,2	7,3	40,1	52,7	12,6	59,75	78,55	18,8
5s	625	u/ VB	19,7	25,75	6,05	39,7	50,4	10,7	59,55	74,4	14,85
6s	625	u/ VB	19,85	27,6	7,75	39,5	52,65	13,15	59,75	79,3	19,55
	Gjennomsnitt:		19,816667	26,85	7,03333333	39,766667	51,9166667	12,15	59,6833333	77,416667	17,7333333
7s	617	m/ VB	20,4	33,65	13,25	39,3	64,1	24,8	60,5	97,2	36,7
8s	617	m/ VB	20,05	34,1	13,6	66,05	96,35	25,95	60	96,35	36,35
9s	617	m/ VB	19,5	31,8	12,3	39,8	66,85	27,05	60	97,8	37,8
	Gjennomsnitt:		19,9833333	33,1833333	13,05	48,3833333	75,7666667	25,9333333	60,166667	97,116667	36,95
10s	625	m/ VB	20,85	26,75	5,9	39,65	52,05	12,4	59,4	77,8	18,4
11s	625	m/ VB	20,4	26,25	5,85	39,9	51,2	11,3	59,75	75,75	16
12s	625	m/ VB	19,9	26,2	6,3	39,9	50,75	10,85	59,85	75,4	15,55
	Gjennomsnitt:		20,3833333	26,4	6,0166667	39,816667	51,33333333	11,516667	59,666667	76,316667	16,65

*Alle mål i mm

Bruddforlengelse (L3):			
A%			
Test	Materiale	Behandling	A%
1s	617	u/ VB	56,4422278
2s	617	u/ VB	59,916318
3s	617	u/ VB	62,2799665
	Gjennomsnitt:		59,5461707
4s	625	u/ VB	31,4644351
5s	625	u/ VB	24,9370277
6s	625	u/ VB	32,7196653
	Gjennomsnitt:		29,7070427
7s	617	m/ VB	60,661157
8s	617	m/ VB	60,5833333
9s	617	m/ VB	63
	Gjennomsnitt:		61,4148301
10s	625	m/ VB	30,976431
11s	625	m/ VB	26,7782427
12s	625	m/ VB	25,9816207
	Gjennomsnitt:		27,9120981

Tversnittsareal					
Test	Materiale	Behandling	A_før [mm²]	A_etter [mm²]	ΔA [mm²]
1s	617	u/ VB	23,4	12,615	10,785
2s	617	u/ VB	24,2	12,825	11,375
3s	617	u/ VB	23,4	12,76	10,64
4s	625	u/ VB	24	17,17	6,83
5s	625	u/ VB	23,4	17,68	5,72
6s	625	u/ VB	23,4	14,07	9,33
7s	617	m/ VB	24,1	12,825	11,275
8s	617	m/ VB	24	13,5625	10,4375
9s	617	m/ VB	24	12,25	11,75
10s	625	m/ VB	24	17,085	6,915
11s	625	m/ VB	23,4	15,7325	7,6675
12s	625	m/ VB	24	16,863	7,137

Z%			
Test	Materiale	Behandling	Z%
1s	617	u/ VB	46,0897436
2s	617	u/ VB	47,0041322
3s	617	u/ VB	45,4700855
4s	625	u/ VB	28,4583333
5s	625	u/ VB	24,4444444
6s	625	u/ VB	39,8717949
7s	617	m/ VB	46,7842324
8s	617	m/ VB	43,4895833
9s	617	m/ VB	48,9583333
10s	625	m/ VB	28,8125
11s	625	m/ VB	32,767094
12s	625	m/ VB	29,7375

Materiallegenskaper ved strekkprøving							
Materialer	0,2% flytespenning* [MPa]	Strekfasthet, R_m [MPa]	Estimert E-modul* [GPa]	Bruddpunkt		A%	Z%
				Spenning [Mpa]	Tøyning [%]		
617 u/VB	328,66	707,74	92,94	474,79	68,10	59,55	46,19
617 m/VB	326,07	726,08	93,75	652,08	72,67	61,41	46,41
625 u/ VB	460,66	828,32	92,65	815,83	33,10	29,71	30,92
625 m/ VB	481,39	835,36	90,30	812,78	31,17	27,91	30,44

* Basert på maskinens forskyvning

Materiallegenskaper ved bøyeprøving				
Test	Materiale	Behandling	Rot/råk	Maksimal kraft [N]
1b	617	u/ VB	rot	541,7
2b	617	u/ VB	rot	552,6
3b	617	u/ VB	råk	542,8
4b	617	u/ VB	råk	546,6
5b	625	u/ VB	rot	681,1
6b	625	u/ VB	rot	679,5
7b	625	u/ VB	råk	731,5
8b	625	u/ VB	råk	734,4
9b	617	m/ VB	rot	554,4
10b	617	m/ VB	rot	578
11b	617	m/ VB	råk	551,5
12b	617	m/ VB	råk	595,6
13b	625	m/ VB	rot	872,5
14b	625	m/ VB	rot	894,4
15b	625	m/ VB	råk	744,4
16b	625	m/ VB	råk	903,1

D Materialsertifikater

Inspection certificate 221066/0
DIN EN 10204/01.05 3.1
Order No. 568530 Purchase Order No. 3050004019-1

Page: 1 / 2
printed: 18. DEC 2020

Bibus Metals AG

Allmendstr. 26
CH -8320 Fehraltorf



Trademark

VDM® Alloy 617
NICROFER 5520 CO
2.4663

Product

Bar, round, forged, solution annealed, peeled

ISO 9001, EN 9100
TÜVNord Approval

Specification

Siemens DGTUV 852721001 Index C/ April 2016
AnsaldoEnergia426W764Rev.B without dimensional report
for diam. up to 60 mm AMS 2154 Rev. A using phase array transducer
technology
ABB HTCT 601843 03/94; Item 1-2.3.2
however heat treatment parameter min. 1100°C; Grain size ASTM 5 and coarser
(aim for 2 - 5)
ASTM B 166-11
ASME BPVC.II.B-2017 SB 166
SAE AMS 5887 D Analysis only

Material

NiCr23Co12Mo
2.4663

2.4663

UNS N06617
UNS N06617
UNS N06617



00336989

Item	Pcs	Weight [kg]	Dimension [mm]	Cast	Lot	Delivery No.
4	3	950	115,00 Ø x 3000-6000	354158	105103611	8682015807

Analysis (weight %)

Cast	country of manufacturer	country of melt
354158	Germany	Germany

LE=combustion analysis analysed corresponding to ASTM E1019-18 (acc)

OE=optical emission analysis analysed corresponding to ASTM E1086-14 (acc), ASTM E3047-16 (acc)

RF=X-ray fluorescence spectroscopy analysed corresponding to ASTM E572-13 (acc), ASTM E1085-16 (acc), ASTM E1621-13 (acc), ASTM E2465-19 (acc)

Siemens DGTUV 852721001 Index C/ April 2016; AnsaldoEnergia426W764Rev.B without dimensional report; ABB HTCT 601843 03/94; Item 1-2.3.2; ASTM B 166-11; ASME BPVC.II.B-2017 SB 166; SAE AMS 5887 D Analysis only

100-11, ASME BPVC.II.B-2017 SB 100, SAE AMS 3687 D Analysis Only													
Cast	Melting Pr.		C	S	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Ti	Cu	Fe	P
354158	VIM/ESR	top	0,06	<0,002	21,99	R54,55	0,05	0,05	8,60	0,43	0,02	1,25	0,003
		Meth	LE	LE	RF		RF	RF	RF	RF	RF	RF	RF

Cast	Melting Pr.		Al	Co	B
354158	VIM/ESR	top	1,08	11,75	0,001
		Meth	RF	RF	OE

Sample Condition		Tensile Test									
solution annealed		1 DIN EN ISO 6892-1 02.2017 meth.B10 (acc) / longitudinal specimen									
		2 ASTM E8/E8M - 16a e1 (acc) / longitudinal specimen									
		Temp Yield0.2% Yield1.0% Tensile Elongation RoA									
Lot	Sample No.	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	A	[%]	A	[%]	[%]	[%]
105103611	1-A1	1	RT	341		727	A	68,2			
105103611	1-A1	2	RT	335		729	4D	66,6			

(acc)-marked test standards are accredited according to ISO 17025:2018

We herewith certify, that the material is in conformance with the above mentioned specifications

Mark of the
Inspector

E

Enclosures: 2

T. Gymnich

Thomas Gymnich, authorized inspection representative

Date of release: 18.12.2020

Q

* 221066 - O - E *

This certified test report shall not be reproduced except in full, without the written approval of VDM Metals. The recording of false, fictitious or fraudulent statements or entries on the certificate may be punished as a felony under federal law.

Chairman of the Supervisory Board: Bernardo Velázquez Herreros
Management Board: Dr. Niclas Müller (Chairman),
Daniel Azpitarte Zemp, Frank Morris, Rolf Schencking
Commercial register: Iserlohn local court, #5327
Company domicile: Werdohl

Inspection certificate 221066/0
DIN EN 10204/01.05 3.1
Order No. Purchase Order No.
568530 3050004019-1

Page: 2 / 2
printed: 18. DEC 2020

Sample Condition solution annealed		Notched Bar Impact Testing 1 DIN EN ISO 148-1 May 2017 (acc)KV / longitudinal / L-R (X-Z) / KV ₂ 300/10								Grain size 1 ASTM E112 - 13 (acc)	
Lot	Sample No.	Temp. [°C]	KV [J]	aK [J/cm ²]	Lateral Exp. [mm]						
105103611	1-A1	1	RT	>300	>300	>300					1 No 1.5
105103611	1-A1										

Item	Lot	
4	105103611	Ultrasonic Examination: see enclosure

Heat Treatment	Lot
1180°C/2:41h/Water	105103611

Spectrographic analytical mixup test/PMI check: without objection

Dimensional and visual inspection performed: without objection

No mercury contamination; no Radium, Luminous or Alpha source materials were used in the manufacture or testing of the items furnished.

No weld repairs performed.

Aus Gründen der Rückverfolgbarkeit ist
unter 'Besteller' unser Name eingetragen.
Due to traceability our name is indicated
as 'purchaser'.
Im Namen von / for and on behalf of
BIBUS METALS AG

BIBUS METALS AG	
DIES IST EINE KOPIE DES ORIGINAL WERKSATTESTES	
THIS IS A COPY OF THE ORIGINAL MILL TEST CERTIFICATE	
Unterschrift / signature: <u>A. Rupp</u>	Datum / date: <u>20.01.21</u>
Im Namen von / for and on behalf of BIBUS METALS AG	

Chairman of the Supervisory Board: Bernardo Velázquez Herreros
Management Board: Dr. Niclas Müller (Chairman),
Daniel Azpilarte Zemp, Frank Morris, Rolf Schencking
Commercial register: Iserlohn local court, #5327
Company domicile: Werdohl

WAZ-Kontrolle/Freigabe

Datum: 21.1.21

Visum: 116

Abnahmeprüfzeugnis 237582/0
DIN EN 10204/01.05 3.1
Auftragsnr. Bestellnummer
597621 621735

Seite: 1 / 2
gedruckt: 12. JUL 2022

Enpar Sonderwerkstoffe GmbH

Betriebsweg 10
D - 51645 Gummersbach



Handelsmarke
VDM® Alloy 625
NICROFER 6020 HMO
2.4856

Produkt
Stange, rund, geschmiedet, weichgeglüht, geschält

Spezifikation
ASTM B 446-19
ASTM B 564-19 anwendbar für Schmiedeteile
DIN 17744 12/2020
DIN 17752 08/2019
VdTÜV WB 499:2020-01-24 aber Bestätigung des Kerbschlags nur längs
NACE MR0175 / ISO 15156-3 2015
AMS 5666 J
ASME BPVC.II.B-2021 SB-446
ASME BPVC.II.B-2021 SB 564 anwendbar für Schmiedeteile

Werkstoff
UNS N06625
UNS N06625
NiCr22Mo9Nb
NiCr 22 Mo 9 Nb
UNS N06625
UNS N06625
UNS N06625

Pos.	Stück	Gew [kg]	Abmessung [mm]	Charge	Los	Lieferschein
1	4	1058	100,00 Ø x 3000-5000	371570	105271966	8682072857

Analyse (Gew %)

Charge	Herstellungsland	Erschm. Land
371570	Deutschland	Deutschland

GFAAS=Graphitrohr-AAS analysiert gemäß ASTM E1184-21, ASTM E1834-18

LE=Verbrennungsanalyse analysiert gemäß ASTM E1019-18

OE=optische Emissionsanalyse analysiert gemäß ASTM E1086-14, ASTM E3047-16

RF=Röntgenfluoreszenzanalyse analysiert gemäß ASTM E572-21, ASTM E1085-16, ASTM E1621-21, ASTM E2465-19

Nb+Ta = Niob + Tantal

ASTM B 446-19; ASTM B 564-19 anwendbar für Schmiedeteile; DIN 17744 12/2020; VdTÜV WB 499:2020-01-24 aber Bestätigung des Kerbschlags nur längs;

AMS 5666 J; ASME BPVC.II.B-2021 SB-446; ASME BPVC.II.B-2021 SB 564 anwendbar für Schmiedeteile

Charge	Erschmelzung		C	S	N	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Ti	Nb	Cu
371570	VIM/ESU	Kopf	0,025	<0,001	0,013	22,27	R59,94	0,07	0,15	9,11	0,32	3,35	0,02
		Meth	LE	LE	LE	RF		RF	RF	RF	RF	RF	RF
Charge	Erschmelzung		Fe	P	Al	Mg	Pb	Sn	Ca	V	Zr	Co	Ta
371570	VIM/ESU	Kopf	4,38	0,006	0,23	0,003	<0,0002	<0,0100	<0,001	0,01	<0,01	0,05	<0,01
		Meth	RF	RF	RF	OE	GFAAS	OE	OE	RF	RF	RF	RF
Charge	Erschmelzung		Nb+Ta										
371570	VIM/ESU	Kopf	3,360										
		Meth											

Wir bestätigen hiermit, dass das Material in Übereinstimmung mit den oben genannten Spezifikationen ist

Anzahl Anlagen: 1

U. Ucinu

E-Mail uenal.uecuencue@vdm-metals.com

Unal Ücinu, Abnahmebeauftragter

Freigabedatum: 12.07.2022

* 237582 - 0 - D *

Das Abnahmeprüfzeugnis darf nur als Gesamtdokument vervielfältigt werden, soweit nicht anderweitig schriftlich durch VDM Metals geregelt. Das Aufzeichnen falscher, fiktiver oder betrügerischer Aussagen oder Einträge und Veränderungen kann als Straftat nach Bundesgesetz geahndet werden.

VDM Metals GmbH
Produktbereich Stangen und Schmiedeteile
Plettenberger Straße 2, D-58791 Werdohl
Postfach 18 20, D-58778 Werdohl
Telefon: +49 2392 550
Internet: www.vdm-metals.com

Vorsitzender des Aufsichtsrats: Bernardo Velázquez Herreros
Geschäftsführung: Dr. Niclas Müller (Vorsitzender),
Daniel Aspöckel Zemp, Frank Morris, Rolf Schencking
Handelsregister: Amtsgericht Iserlohn HRB 5327
Sitz der Gesellschaft: Werdohl

Abnahmeprüfzeugnis 237582/0
DIN EN 10204/01.05 3.1

Seite: 2 / 2
gedruckt: 12. JUL 2022

Auftragsnr. Bestellnummer
597621 621735

Probenzustand
weichgeglüht

Zugversuch

- 1 ASTM E8/E8M - 21 / Längsprobe
- 2 DIN EN ISO 6892-1 06.2020 Meth.B10 / Querprobe
- 3 DIN EN ISO 6892-2 07.2018 Meth.B / Querprobe

Korngröße

- 1 ASTM E112 - 13

Los	Probe-Nr.	Temp [°C]	Rp0.2 [MPa]	Rp1.0 [MPa]	Rm [MPa]	Dehnung A [%]	A	4D	49,3	Z [%]
105271966	121T001-A01	3	450	435	758					
105271966	121T001-A01	1	RT	529	566	897	A	47,3	4D	49,3
105271966	121T001-A01	2	RT	532		885	A	38,6		
105271966	121T002-A01	2	RT	530		873	A	39,8		
105271966	121T003-A01	2	RT	529		886	A	39,5		
105271966	121T004-A01									

1 Nr 7.5

Probenzustand
weichgeglüht

Korrosionsprüfung

- 1 SEP 1877 Ver. II - Lieferzustand
- 2 ASTM G 28-02 (Reappr. 2015) Meth.A - Lieferzustand

Los	Probe-Nr.
105271966	121T001-A01
105271966	121T001-A01
105271966	121T001-A01
105271966	121T002-A01
105271966	121T003-A01
105271966	121T004-A01

- 1 ohne Beanstandung
- 2 ohne Beanstandung : 0,32 mm/a

Werte der Endkontrolle

Charge Teil(e) ID
371570 121

Pos. Los
1 105271966 US-Prüfung gem. DIN EN 10228-4 10/2016 Klasse 3 2 Prüfbahnen,
0° und 90°: ohne Beanstandung

Wärmebehandlung	Los	Verformungsgrad	Los
959°C/00:45/Wasserkühlung	105271966	16,97:1	105271966

Spektralanalytische Verwechslungsprüfung/PMI check wurde durchgeführt: ohne Beanstandung
Dimensions- und visuelle Kontrolle durchgeführt: ohne Beanstandung

Das Material ist frei von Quecksilberverunreinigungen; Radium-, Strahlen- oder Alpha-Ausgangsmaterial wurde im Herstellungsprozess oder beim Prüfen der fertiggestellten Positionen nicht verwendet.

Keine Schweißreparaturen durchgeführt.

Obige VDTÜV-Blatt Bestätigung beinhaltet nur die im Zertifikat bestätigten Prüfungen.

Grade 1

VDM Metals GmbH hat die Herstelleranforderungen der AS6279 eingehalten

-
- E Python-kode for resultater av strekkprøving og bøyepøving (Python-kode.zip)
 - F Excel-fil for utregninger av seighet (Seighet_strekk.zip)
 - G Diagrammer fra alle strekk- og bøyepøver (diagrammer.zip)
 - H Bilder strekkpøver og bøyepøver (Bilder_strekkogbøy.zip)

