

2014•2015
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Analyse van de mogelijkheden van rotatiesymmetrisch spinnen van buisvormig materiaal

Promotor :
ing. John BIJNENS

Promotor :
ing. JOS REESKENS

Copromotor :
ir. XIAOXU PENG

Michael Didden , Michiel Heleven

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Analyse van de mogelijkheden van rotatiesymmetrisch
spinnen van buisvormig materiaal

Promotor :
ing. John BIJNENS

Promotor :
ing. JOS REESKENS

Copromotor :
ir. XIAOXU PENG

Michael Didden , Michiel Heleven

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: elektromechanica*

Woord vooraf

Ter afsluiting van onze studie master Industriële Ingenieurswetenschappen Elektromechanica voerden we een onderzoek uit bij de onderzoeks- en ontwikkelingsafdeling van het bedrijf Bosal in Lummen. Gedurende deze masterproef hebben we interessante ervaringen opgedaan waaruit we veel geleerd hebben. Het was dus een leerrijke ervaring die we zeker zullen meedragen in de toekomst. Maar uiteraard konden we deze masterproef niet realiseren zonder de hulp van een aantal personen.

In de eerste plaats willen we onze bedrijfspromotor de heer Jos Reeskens bedanken voor het mogelijk maken van deze thesis. Ook heeft hij ons gedurende het hele jaar begeleid, allerlei zaken voor ons geregeld en een deel van zijn ervaring aan ons doorgespeeld. Hij heeft ongetwijfeld een groot aandeel in het slagen van deze masterproef. Daarnaast gaat er ook veel dank uit naar onze bedrijfscopromotor mevrouw Xiaoxu Peng, omdat we bij haar altijd terecht konden voor vragen. Dankzij haar uitgebreide kennis van katalysatoren was een vlotte verwerking van onze meetresultaten mogelijk. Ten slotte bedanken we de heer John Bijmens om deze masterproef mede mogelijk te maken en voor zijn kritische reflectie op onze thesis. We konden ook altijd bij hem terecht voor allerlei vragen over de masterproef. Dankzij de interessante opdracht van de firma Bosal is de uitvoering van de masterproef een hoogtepunt geweest in onze schoolcarrière.

Michael Didden en Michiel Heleven, juni 2015.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren	9
Verklarende woordenlijst	13
Abstract.....	15
Abstract in English.....	17
1 Inleiding.....	19
1.1 <i>Spin forming</i>	19
1.1.1 <i>Spin forming</i> algemeen	19
1.1.2 Indeling <i>spin forming</i>	20
1.2 Voorstelling bedrijf	23
1.3 Probleemstelling	24
1.4 Doelstelling	25
1.5 Structuur masterproef.....	27
2 Axisymmetrisch spinnen	29
2.1 Wat is axisymmetrisch spinnen	29
2.2 De beweging van het vervormingsgereedschap	31
2.2.1 Gereedschapsbaan A	31
2.2.2 Gereedschapsbaan B	33
2.2.3 Gereedschapsbaan C	34
2.3 Plastisch vervormen	35
2.3.1 Wat is plastisch vervormen?	35
2.3.2 Spanning-rekdiagram.....	35
2.3.3 Vervormingsversteviging.....	38
2.4 Krachten en spanningen in het spinformingproces	38
2.5 Defecten tijdens <i>spin forming</i>	40
2.5.1 Invloed van de spanningen.....	40
3 Onderzoek naar de invloed parameters van <i>spin forming</i>	43
3.1 Invloed van het materiaal	43
3.2 Invloed van de gereedschapsbanen	44
3.3 Invloed van diameterreductie	48
3.3.1 Invloed van de diameterreductie op de spinningkrachten	48

3.3.2	Invloed van de diameterreductie op de rek	49
3.3.3	Invloed van de diameterreductie op de diameternauwkeurigheid	50
3.3.4	Invloed van de diameterreductie op de oppervlakteruwheid.....	51
3.4	Invloed van de conushoek	52
3.5	Invloed van de wanddikte van de buis	52
3.6	Invloed van de gereedschapsgeometrie	53
3.7	Invloed van het aantal vervormingsgereedschappen.....	53
3.8	Invloeden van de voedingssnelheden.....	55
3.8.1	Invloed van de voedingen op de oppervlaktenauwkeurigheid	62
3.9	Samenvatting invloed parameters.....	63
3.10	Overzicht van enkele invloedsparementers	64
4	Uitvoering van de testen.....	65
4.1	Fabriceren van de buizen uit plaatmateriaal.....	65
4.1.1	Plaatmateriaal lasersnijden	65
4.1.2	Rollen.....	65
4.1.3	Zagen van de gelaste buizen op de correcte lengte.....	66
4.1.4	Dummykatalysator	67
4.1.5	Mat	68
4.1.6	Opvullen van de testbuizen	68
4.1.7	Lassen bij Schnelldorfer-Maschinenbau.....	69
4.1.8	Laserlassen.....	69
4.1.9	TIG-lasproces	71
4.1.10	Kenmerken van het TIG-lasproces in vergelijking met andere processen	73
4.1.11	De wolfram elektrode	74
4.1.12	Verschillende stappen bij de instelling van de machine	75
4.2	Vorbereiding van de testen	76
4.2.1	Opbouw van de analyse	76
4.2.2	Overzicht proeven	81
4.2.3	Datasheets proeven.....	85
4.2.4	Identificatie van de spinformingbuizen.....	85
4.3	Uitvoering spinformingproces.....	86
4.3.1	Bespreking spinformingmachine	86
4.3.2	Vervormingsgereedschap.....	87
4.3.3	Klemmechanisme	88

4.3.4	Klemprobleem 1.....	89
4.3.5	Klemprobleem 2.....	89
4.3.6	Vergelijking speciale klemmen <i>spin forming</i>	90
4.3.7	Afsteeklengte	91
4.3.8	Uitleg over gekozen gereedschapsbaan.....	92
4.4	Lasermetingen.....	93
5	Resultaten.....	95
5.1	Resultaten testen diameter 85 mm.....	95
5.1.1	Eerste serie testen diameter 85 mm	95
5.1.2	Tweede serie testen diameter 85 mm	97
5.1.3	Besluit testen diameter 85 mm	98
5.2	Resultaten testen diameter 124	99
5.2.1	Analyse van de resultaten met behulp van de Taguchi-methode ..	99
5.2.2	Analyse van handmatige testen.....	113
5.2.3	Algemene conclusie <i>spin forming</i> diameter 124 mm	121
5.3	Resultaten testen diameter 156 mm.....	123
5.3.1	Diameter 156 mm en wanddikte 1,2 mm.....	123
5.3.2	Test verhoging van de axiale voeding	123
5.3.3	Diameter 156 en wanddikte 1,5 mm	129
5.3.4	Test verhoging van het toerental materiaal 1.4512.....	129
5.3.5	Testen materiaal 1.4301.....	134
5.3.6	Testen materiaal 1.4509 verhoging van het toerental.....	136
5.3.7	Conclusie testen diameter 156 mm	140
5.4	Resultaten wanddikteverloop na <i>spin forming</i>	142
5.4.1	Dikteprofiel bij wanddikte 1,2 mm.....	143
5.4.2	Dikteprofiel bij wanddikte 1,5 mm.....	146
5.4.3	Algemene conclusie wanddikteprofiel.....	149
5.5	Resultaten hardheidsmetingen	149
5.5.1	Kalibratiemetingen.....	151
5.5.2	Metingen op niet vervormde teststukjes.....	151
5.5.3	Metingen op vervormde testblokjes	152
5.5.4	Bespreking van hardheidsmeetresultaten.....	156
5.5.5	Algemene conclusie hardheidsmetingen	157
6	Conclusie.....	159

7	Literatuurlijst.....	161
8	Bijlagen.....	165

Lijst van tabellen

Tabel 1: Vergelijking van argon en helium als beschermgas bij TIG-lassen	73
Tabel 2: Overzicht spinformingparameters van Taguchi-analyse Ø124 mm	100
Tabel 3 Ranking parameters wanddikte	102
Tabel 4: Analyse van verlenging in functie van spinformingparameters	104
Tabel 5 Overzicht ranking parameters verlening.....	106
Tabel 6: Analyse terugvering in functie van de spinformingparameters.....	108
Tabel 7 parameter ranking terugvering.....	110
Tabel 8 Overzicht ranking parameters rondheid.....	113
Tabel 9: Procesparameters test verhoging van axiale voeding.....	113
Tabel 10: Meetresultaten test verhoging axiale voeding	114
Tabel 11: Procesparameters van test verhoging van de bewerkingsnelheid ...	116
Tabel 12: Meetresultaten verhoging van de bewerkingsnelheid	117
Tabel 13: Procesparameters bij testen waarbij de las brak.....	120
Tabel 14: Procesparameters verhoging axiale voeding.....	125
Tabel 15: Meetresultaten verhoging axiale voeding	125
Tabel 16: Procesparameters verhoging toerental	130
Tabel 17: Meetresultaten verhoging van het toerental	130
Tabel 18: Procesparameters 1.4301 wanddikte 1,5 mm	134
Tabel 19: Meetresultaten 1.4301 en wanddikte 1,5 mm.....	135
Tabel 20: Procesparameters materiaal 1.4509 verhoging van het toerental ...	136
Tabel 21: Meetresultaten materiaal 1.4509 verhoging van het toerental.....	136
Tabel 22: Kalibratiemetingen van het vickershardheidsmeettoestel.....	151
Tabel 23: Overzicht theoretische hardheden geteste materialen	151
Tabel 24: Hardheidsmetingen op de nog niet-gevormde teststukjes	151
Tabel 25: Hardheidsmeetresultaten van buis 29b19	152
Tabel 26: Hardheidsmeetresultaten van buis 87c21	153
Tabel 27: Hardheidsmeetresultaten van buis 97b18	153
Tabel 28: Hardheidsmeetresultaten van buis 95b18	153
Tabel 29: Hardheidsmeetresultaten van buis 92a5	153
Tabel 30: Hardheidsmeetresultaten van buis 16a6	153
Tabel 31: Hardheidsmeetresultaten van buis 94a5	154
Tabel 32: Hardheidsmeetresultaten van buis 67a11	154
Tabel 33: Hardheidsmeetresultaten van buis 33b17	154
Tabel 34: Hardheidsmeetresultaten van buis 94b13	154
Tabel 35: Hardheidsmeetresultaten van buis 17b14	154
Tabel 36: Vergelijking hardheden met conushoek 60°.....	155
Tabel 37: Vergelijking hardheden materiaalsoort 1.4512 reductie 70 mm.....	155
Tabel 38: Vergelijking hardheden materiaalsoort 1.4512 reductie 50 mm.....	155
Tabel 39: Vergelijking hardheden materiaalsoort 1.4301	156

Lijst van figuren

Figuur 1: Schematische voorstelling spinformingproces	19
Figuur 2: Indeling van de verschillende spinformingtechnieken	20
Figuur 3: Neck spinning	21
Figuur 4: Schematische weergave van shear spinning.....	21
Figuur 5: Inwendig en uitwendig spinnen	22
Figuur 6: Logo Bosal.....	23
Figuur 7: Delen van katalysatorbehuizing	24
Figuur 8: vormgegeven behuizing van katalysator met <i>spin forming</i>	25
Figuur 9: Conus	26
Figuur 10: Doorsnede van behuizing.....	26
Figuur 11: (a) symmetrisch spinnen en (b) niet-symmetrisch pinnen	29
Figuur 12: (a) symmetrisch, (b) offset en (c) oblique spinnen.....	29
Figuur 13: Symmetrisch spinnen	30
Figuur 14: Opstelling voor symmetrisch spinnen.....	30
Figuur 15: Afbeelding van het vervormingsgereedschap	31
Figuur 16: Gereedschapsbaan A	31
Figuur 17: Schets van een unidirectionele gereedschapsbaan	32
Figuur 18: Schets van een bidirectionele gereedschapsbaan	33
Figuur 19: Gereedschapsbaan B	33
Figuur 20: Gereedschapsbaan C	34
Figuur 21: Vergelijking tussen gereedschapsbaan B en gereedschapsbaan C ...	35
Figuur 22: Spanning-rek diagram.....	36
Figuur 23: (a) spanning-rek-diagram, (b) werkversteving	37
Figuur 24: Krachten tijdens spinformingproces	38
Figuur 25: Contactoppervlakken gedurende het spinformingproces	39
Figuur 26: verloop van de spinkrachten	39
Figuur 27: Spanningsverloop tijdens het spinformingproces	40
Figuur 28: Omtrekspanning	41
Figuur 29: Spanning volgens de as	41
Figuur 30: Beeld eindige elementen simulatie van axiale rek na het spinnen...	42
Figuur 31: defecten bij <i>spin forming</i> ; linkse figuur scheuren en rechtse figuur knikken	42
Figuur 32: Wanddikte i. f. v. de afstand tot het buiseinde voor twee materialen met andere anisotropiecoëfficiënt r	43
Figuur 33: Wanddikte van de buis i. f. v. de afstand tot het uiteinde van de buis.	44
Figuur 34: Verschil in maximale spinningkracht voor gereedschapsbanen A en B	45
Figuur 35: Verschil in totale axiale rek bij gereedschapsbanen A en B.....	45
Figuur 36: Spinningkrachten i f v de axiale voeding voor zowel een voorwaartse als een achterwaartse gereedschapsbaan	46
Figuur 37: links: wanddikteverdeling bij voorwaarts spinnen; rechts: wanddikteverdeling bij achterwaarts spinnen.....	47

Figuur 38: Bidirectionele gereedschapsbaan waarbij het gereedschap tijdens de radiale voeding de schuine wand volgt	47
Figuur 39: Verschillende contactsituaties tussen het gereedschap en het werkstuk	48
Figuur 40: Wanddikteverdeling na het spinningproces dat afgebeeld wordt in Figuur 38 en Figuur 39	48
Figuur 41: Maximale spinningkracht i. f. v. de diameterreductie	49
Figuur 42: Totale axiale rek in functie van de diameterreductie	49
Figuur 43: Dikterek i.f.v. de diameterreductie voor verschillende voedingen....	50
Figuur 44: Diameteronnauwkeurigheid in functie van de diameterreductie....	50
Figuur 45: Oppervlakteruwheid in functie van de diameterreductie	51
Figuur 46: Totale axiale rek in functie van de conushoek	52
Figuur 47: Spinningkracht t.o.v. de positie op het cilindrisch gedeelte.....	52
Figuur 48: Diameterafwijking i.f.v. de neusradius van het vervormingsgereedschap.....	53
Figuur 49: Wanddikte gerelateerd met het aantal rollers	54
Figuur 50: Invloed van de axiale voeding op het ingedrukte oppervlak.....	55
Figuur 51: Maximale spinningkracht in functie van de axiale voeding	55
Figuur 52: Dikterek in functie van de radiale voeding	56
Figuur 53: Maximale spinningkrachten i.f.v. de radiale voeding	56
Figuur 54: Maximale spinningkracht in functie van de radiale voeding.....	57
Figuur 55: Diameterafwijking in functie van de radiale indrukking voor verschillende waarden van axiale voeding	57
Figuur 56: Axiale rek i.f.v. radiale indrukking	58
Figuur 57: Dikterek in functie van de afstand, gemeten van de conus richting het vrije uiteinde	59
Figuur 58: Enkele faalcriteria in functie van de conushoek en axiale voeding..	59
Figuur 59: Maximale spinningkracht in functie van de diameterreductie	60
Figuur 60: Procesvenster voor axiale en radiale voeding bij spinning	60
Figuur 61 rimpeling	61
Figuur 62: Oppervlakteruwheid in functie van de diameterreductie	62
Figuur 63: Maximale oppervlakteruwheid in functie van de radiale indrukking voor enkele waarden van axiale voeding	62
Figuur 64: Maximale diameteronnauwkeurigheid in functie van de axiale voedingssnelheid (zwarte lijn)	63
Figuur 65: Buizen die vervormd zijn door rotatiesymmetrisch spinnen; het materiaal is een aluminiumlegering.....	64
Figuur 66: Foto van de CNC platenrolmachine.....	65
Figuur 67: Zaaggereedschap om buizen recht door te snijden.....	67
Figuur 68: Matten voor rond de katalysator	68
Figuur 69: Dummykatalysator met mat in het conusvormig geleidingshulpstuk	68
Figuur 70: Pers tijdens het inpersen van een dummykatalysator en mat in een testbuis	69
Figuur 71: Laserlasinstallatie.....	70
Figuur 72: Laserlaskop gemonteerd op de slede	71

Figuur 73 TIG lasmachine.....	72
Figuur 74 TIG-lasmachine (klemmen).....	72
Figuur 75: Spoelkanaaltjes bij TIG-lasinstallatie.....	74
Figuur 76 identificatie van de buizen	86
Figuur 77: Spinformingmachine bij Fraiponts	87
Figuur 78: Vervormingsgereedschap gemonteerd op gereedschapshouder	87
Figuur 79: Onderdelen van het vervormingsgereedschap.....	88
Figuur 80: Klemmen diameter 85 mm	88
Figuur 81 klemaanpassing	90
Figuur 82 indenting.....	90
Figuur 83 optimale klemmen	91
Figuur 84 Optimale klemmen met buis	91
Figuur 85: Rimpels op eindproduct	92
Figuur 86: Bidirectionele gereedschapsbaan, gebruikt bij de testen	92
Figuur 87: Lasermeetmachine voor de diameter en rondheid.....	93
Figuur 88: Eerste testbuis, met duidelijk niet ronde vorm onderaan, afdrukken van de klemmen en aan de bovenkant een licht conisch gereduceerd gedeelte..	96
Figuur 89: Testbuis Ø85 mm met wanddikte 0,8 mm met ernstige rimpelvorming over het volledige gereduceerde gedeelte.....	96
Figuur 90: Buis met rimpels en kleine scheur aan het begin van de lasnaad	96
Figuur 91: Goed eindresultaat (Ø85 mm, conushoek = 60°).....	97
Figuur 92: Testbuis met aan de onderkant duidelijke markeringen van de klemmen.....	98
Figuur 93: Recht gereduceerd gedeelte	99
Figuur 94: Wanddikte in functie van de spinformingparameters	101
Figuur 95: Buis Ø124 mm, reductie 70 mm en conushoek 40°.....	103
Figuur 96: Verlenging in functie van de spinformingparameters	105
Figuur 97: Buis Ø124 mm met reductie 50 mm en conushoek 50°	107
Figuur 98: Terugvering in functie van de spinformingparameters.....	109
Figuur 99: Rondheid in functie van de spinformingparameters	112
Figuur 100: Overzichtsfoto buizen met stijgende axiale voeding	114
Figuur 101: Wanddikte in functie van axiale voeding.....	115
Figuur 102: Verlenging in functie van axiale voeding.....	115
Figuur 103: Terugvering in functie van axiale voeding.....	115
Figuur 104: Rondheid in functie van axiale voeding	116
Figuur 105: Overzichtsfoto verhoging van de bewerkingsnelheid.....	117
Figuur 106: Wanddikteverandering in functie van toerental.....	118
Figuur 107: Verlenging in functie van toerental	118
Figuur 108: Terugvering in functie van toerental	119
Figuur 109 rondheid in functie van het toerental.....	119
Figuur 110: Buizen 8C6 (links) en 17C6 (rechts).....	120
Figuur 111: Openingen tussen kern en buis	123
Figuur 112: Onregelmatige vervorming.....	124
Figuur 113: Verlenging in functie van axiale voeding	126
Figuur 114: Procentuele verlenging in functie van axiale voeding	126
Figuur 115: Wanddikte in functie van de axiale voeding	127

Figuur 116: Rondheid in functie van de axiale voeding	127
Figuur 117: Terugvering in functie van de axiale voeding	128
Figuur 118: Procentuele terugvering in functie van de axiale voeding	128
Figuur 119: Verlenging in functie van het toerental.....	131
Figuur 120: Procentuele verlenging in functie van het toerental.....	131
Figuur 121: Wanddikte in functie van het toerental.....	132
Figuur 122: Rondheid in functie van het toerental	133
Figuur 123: Procentuele terugvering in functie van het toerental	133
Figuur 124: Terugvering in functie van het toerental.....	134
Figuur 125 Defecten bij de buizen 1.4301 wanddikte 1,5 mm	135
Figuur 126: Verlenging in functie van het toerental.....	137
Figuur 127: Procentuele verlenging in functie van het toerental	137
Figuur 128: Wanddikte in functie van het toerental.....	138
Figuur 129: Rondheid in functie van het toerental	138
Figuur 130: Terugvering in functie van het toerental.....	139
Figuur 131: Terugvering in functie van het toerental.....	139
Figuur 132: Meetpunten voor wanddikteprofiel.....	142
Figuur 133: Open gezaagde buis voor bepaling wanddikteverloop.....	143
Figuur 134: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 40° bij verschillende toerentallen.....	143
Figuur 135: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4301, conushoek 50°	144
Figuur 136: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4509, conushoek 60°	144
Figuur 137: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 50° bij verschillende axiale voeding	145
Figuur 138: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 40° bij verschillende axiale voeding	146
Figuur 139: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4301, conushoek 50° bij verschillende toerentallen.....	146
Figuur 140: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 50° bij verschillende axiale voedingen	147
Figuur 141: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 50° bij verschillende bewerkingssnelheid	148
Figuur 142: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4301, conushoek 50° bij scheur	148
Figuur 143: Scheur op overgang van conus naar recht gedeelte bij materiaal 1.4301	149
Figuur 144: Testblokje ingebed in thermohardende kunststof.....	150
Figuur 145: Zwick Roell micro-vickershardheidsmeettoestel	150
Figuur 146: Hardheid in functie van de axiale voeding bij materiaal 1.4512 ..	156
Figuur 147: Hardheid in functie van toerental bij materiaal 1.4512.....	157

Verklarende woordenlijst

De eenheden van toerental en axiale en radiale voeding worden afgekort door hun meer gebruikelijke Engelstalige afkortingen. Deze afkortingen staan hieronder opgelijst.

	Eenheid	Afkorting
Axiale/radiale voeding	Millimeter per omwenteling (revolution)	mm/rev
Toerental	Toeren per minuut (revolutions per minute)	rpm

Abstract

De onderzoeks- en ontwikkelingsafdeling van Bosal te Lummen wil achterhalen of *spin forming* een geschikt alternatief biedt voor de productie van katalysatorbehuizingen. De huidige techniek bestaat eruit de drie afzonderlijke delen van de behuizing aan elkaar te lassen. Dit heeft enkele nadelen zoals warmtebeïnvloeding door lassen, gebruik van verschillende onderdelen, meerdere processtappen en de drie onderdelen moeten juist dezelfde diameter hebben. De spinformingtechniek biedt enkele voordelen zoals de behuizing die bestaat uit één geheel en waardoor deze dus steeds lekvrij is, geen warmtebeïnvloeding door lassen, minder productiestappen en een lichter geheel. Het doel van dit onderzoek is de procesparameters te analyseren en die om te zetten naar proceslimieten zoals maximale axiale aanzet, stapdiepte, conushoek, vervormingssnelheid en diameterreductie.

Eerst werden via een literatuurstudie de theoretische proceslimieten en invloedparameters onderzocht. Er is echter niet veel specifieke literatuur beschikbaar waarin het vervormingsproces theoretisch wordt toegelicht. Vervolgens zijn er aan de hand van een *design of experiments*, meer bepaald met de Taguchi-methode, testen opgesteld. In deze testen werd geanalyseerd wat de invloeden zijn van conushoek, materiaal, wanddikte, bewerkingssnelheid, axiale en radiale voeding en bewerkingrichting op eigenschappen zoals wanddikteverdeling, verlenging, maatnauwkeurigheid en hardheid.

Bosal zal in de toekomst de katalysatorbehuizingen kunnen maken met behulp van *spin forming*. Hierbij moet rekening gehouden worden met de juiste gereedschapsbaan, axiale en radiale voeding, reductie en conushoek. Deze parameters zijn zeer afhankelijk van het gebruikte materiaal en wanddikte.

Abstract in English

The research- and development department of Bosal in Lummen wants to find out if spin forming offers a suitable alternative for the production of catalytic converters housings. The current technique consists of welding three separated parts together. This technique has several disadvantages like heat influences due to the welding, the use of different parts, multiple process steps and the three separated parts need to have the same diameter. Spin forming offers several advantages: the housing consists of one piece therefore it is always leak-free, no heat influences due to the welding, less production steps and finally a lighter assembly. The purpose of this study is to analyse the process parameters and to convert them into process limits such as maximum axial feeding, radial feeding, step depth, taper angle, forming rate and diameter reduction.

The theoretical process limits and influence parameters were studied first. However, there is not much literature available which explains the deformation process theoretically. In the next stage tests are performed on the basis of a design of experiments, in particular the Taguchi-method. The influence is of the cone angle, material, wall thickness, speed of processing, axial and radial feeding and machining direction on features such as wall thickness distribution, elongation, hardness and dimensional accuracy was analysed.

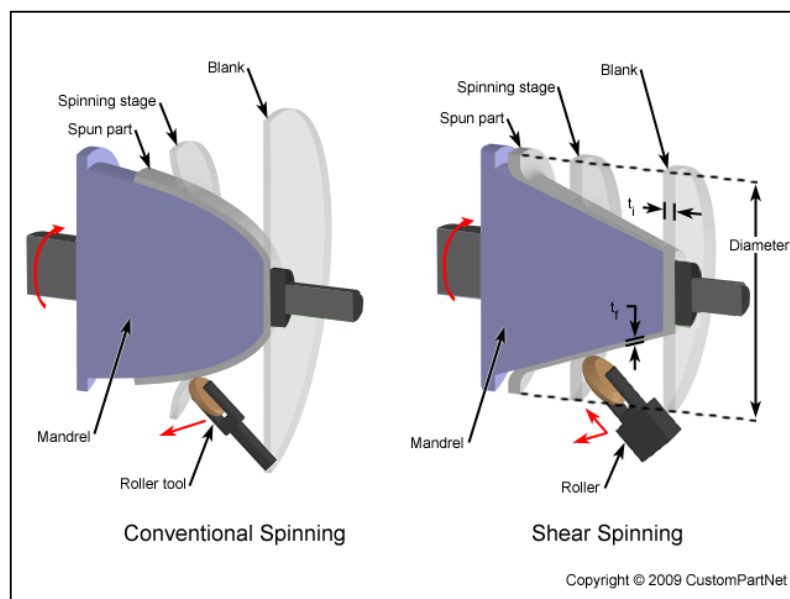
Bosal will be able to produce catalytic converters in the future with spin forming. It is important that correct tooling, tool path, axial and radial feeding, reduction and taper angle are used. These parameters are highly dependent on the material used and wall thickness.

1 Inleiding

1.1 Spin forming

1.1.1 Spin forming algemeen

Metaal spinnen of *spin forming* is één van de oudste spanloze vervormingstechnieken. Doorheen de jaren heeft deze vervormingstechniek terrein verloren ten opzichte van processen zoals dieptrekken. Toch heeft *Spin forming* de afgelopen jaren terug aan aandacht gewonnen. Dit is te wijten aan de voordelen verbonden aan *spin forming* zoals het gebruik van eenvoudige gereedschappen, lage vervormingskrachten en de evolutie van de industrie naar *near-net shape* vervormingsprocessen van dunwandige lichtgewicht onderdelen. *Spin forming* is dus geëvalueerd naar een veelzijdig proces voor de productie van lichtgewicht producten [1]. Figuur 1 is een schematische voorstelling van het spinformingproces.



Figuur 1: Schematische voorstelling spinformingproces [2]

Metaal spinnen of *spin forming* is een van de *near-net shape* vervormingsprocessen die wereldwijd uitgebreid toegepast worden voor de productie van symmetrische, dunwandige en holle cirkelvormige onderdelen. *Near-net shape* wil zeggen dat de vorm van het uitgangsmateriaal dicht aanleunt met de vorm van het uiteindelijke product. Dit heeft als grote voordeel dat er geen nabehandelingen noodzakelijk zijn voor een verbetering van de oppervlaktekwaliteit. Hierdoor worden de productiekosten beperkt [3].

Het spinformingproces vindt plaats op een draaibank of een speciaal ontwikkelde spinformingmachine. Tijdens het spinningproces bewegen één of meerdere rollen in voedingssnelheid tegen een metalen *blank* of een buis die ronddraait in de machine en ingeklemd is in de klauwplaat. De gewenste geometrische vorm wordt verkregen door de *blank* of buis plaatselijk plastisch te vervormen. Dit gebeurt onder invloed van de uitgeoefende kracht van het gereedschap.

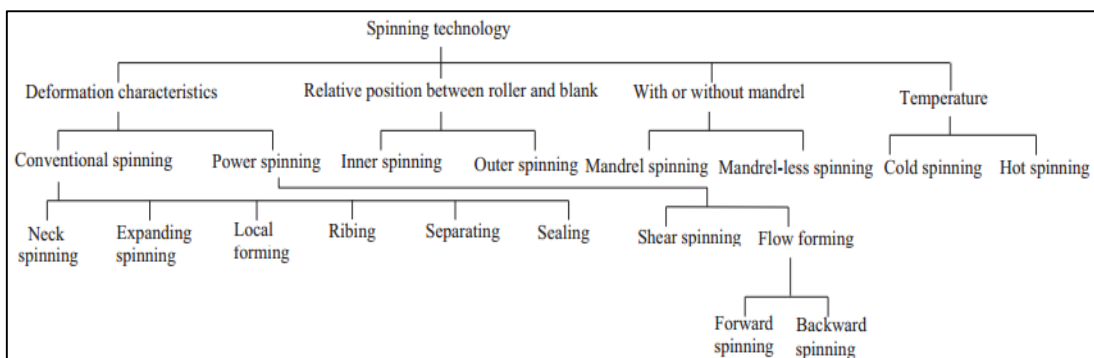
De voordelen van het plastisch vervormen met de spinformingtechniek ten opzichte van andere conventionele vervormingstechnieken zijn: kleinere vervormingskrachten, eenvoudige gereedschappen, goede dimensionele nauwkeurigheid, optimale materiaalbenutting, lage productiekost en het verbetert de mechanische eigenschappen.

Door middel van *spin forming* kunnen lichtgewicht producten verkregen worden. Daarnaast is er een grote flexibiliteit tijdens de productie. *Spin forming* kan toegepast worden voor producten met een diameter van 3 mm tot 10 m, en met een dikte van 0,4 mm tot 25 mm [3].

De laatste jaren, zijn er verschillende spinningprocessen ontwikkeld welke de beperkingen blootleggen van de traditionele spintechnologie voor de productie van symmetrische en cirkelvormige producten met een uniforme wanddikte. De ontwikkeling van deze nieuwe spinformingprocessen heeft het werkingsgebied van de traditionele spinformingtechnieken verbreed [3].

1.1.2 Indeling *spin forming*

De spinformingtechnologie heeft een breed toepassingsgebied. *Spin forming* kan op verschillende manieren ingedeeld worden. Een mogelijke indeling is te zien in figuur 2.

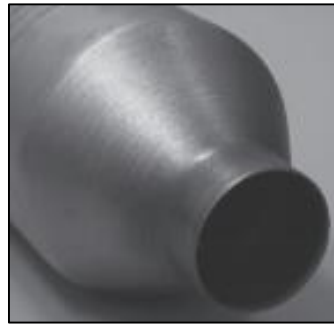


Figuur 2: Indeling van de verschillende spinformingtechnieken[3]

Zo kunnen de verschillende spinformingtechnieken ingedeeld worden in vier grote onderdelen: op basis van vervormingskarakteristieken, relatieve positie van de roller en de *blank*, met of zonder mal en op basis van temperatuur.

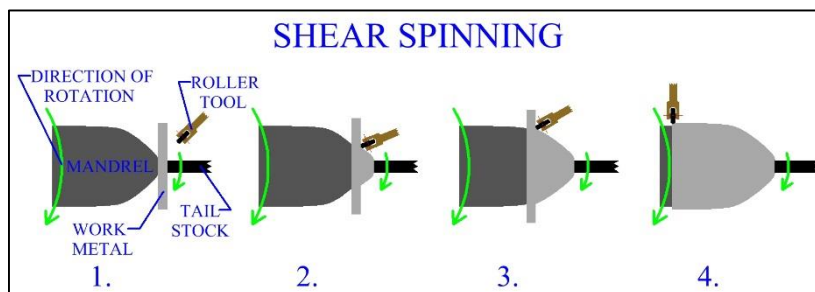
De tak van “deformation characteristics” is opgedeeld in conventionele *spin forming* en *power spin forming*.

In de groep van “conventionele *spin forming*” bevinden zich verschillende technieken zoals *neck spinning*, *expanding spinning*, *local forming*, *ribing*, *separating en sealing*. Het rotatiesymmetrisch *neck spinning* is de toepassing die wij verder in deze thesis onderzoeken. Bij conventioneel spinnen is het meestal de bedoeling dat de wanddikte constant blijft gedurende het vervormen.



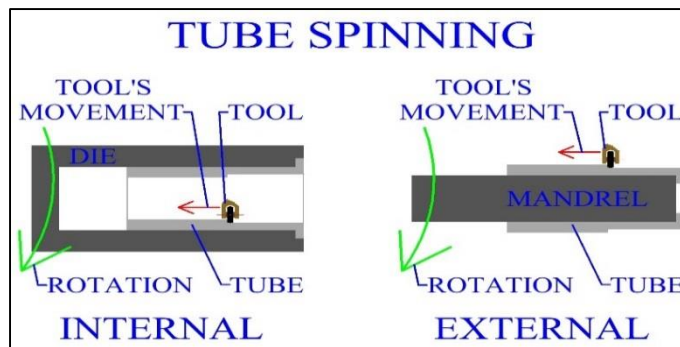
Figuur 3: Neck spinning [4]

Bij *power spinning* is er een onderscheid te maken tussen *shear spinning* en *flow forming*. Bij *flow forming* is het de bedoeling dat de wanddikte van de blank of buis verandert. Waardoor het uiteindelijke werkstuk dus niet dezelfde wanddikte heeft als de blank of de buis. Dit is niet het geval bij *shear spinning*, hier is niet het doel om de wanddikte te veranderen.



Figuur 4: Schematische weergave van shear spinning [5]

In de tweede tak van Figuur 2, deze van relatieve positie tussen roller en blank, wordt onderscheid gemaakt tussen inwendig en uitwendig spinnen. Dit is vrij vanzelfsprekend, bij inwendig spinnen wordt het product van binnenuit gespind. In tegenstelling tot uitwendig spinnen, hier rolt het gereedschap aan de buitenkant van het product. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 5.



Figuur 5: Inwendig en uitwendig spinnen [5]

Een derde tak in het schema is spinnen met een mal of spil. In sommige toepassingen zoals bij *tube spinning* is het noodzakelijk om gebruikt te maken van een spil. De mal of spil is vooral gemakkelijk wanneer er een bepaalde vorm gemaakt moet worden. Hier wordt dan de blank of buis tegen de mal of spil gedrukt met behulp van de roller. Dit kan gebeuren in één of meerdere passen.

Een laatste tak die besproken wordt is *hot-* en *cold spinning*. Dit wil zeggen spinnen op hoge en lage temperatuur. Het spinnen op hoge temperatuur gebeurt typisch op 1000°C, deze temperatuur wordt verkregen door het materiaal te verwarmen door bijvoorbeeld inductieverwarming. Door deze hogere temperatuur is materiaal gemakkelijker en beter te vervormen. Vervormen op lage temperatuur betekent dat de buis niet extern wordt opgewarmd. Hierbij is de starttemperatuur van het product dus de omgevingstemperatuur.

Aan de hand van dit overzicht werd duidelijk gemaakt dat *spin forming* in vele toepassingen gebruikt kan worden. *Spin forming* was een vergeten vervormingstechniek, echter het laatste decennium wordt er steeds meer en meer gebruikt van gemaakt. Dit is te wijten aan de volledig automatische bewerkingscentra enerzijds en anderzijds door de vele voordelen die deze techniek met zich meebrengt. In het verdere verloop van deze thesis wordt de spinformingstechniek "rotatiesymmetrisch spinnen" of "*neck spinning*" verder onderzocht.

1.2 Voorstelling bedrijf

De masterproef vindt plaats bij de onderzoeks- en ontwikkelingsafdeling van de firma Bosal te Lummen. Bosal is een producent van:

- uitlaatsystemen voor passagier voertuigen,
- uitlaatsystemen voor vrachtwagens en industriële toepassingen,
- katalysatoren,
- trekhaaksystemen,
- dakdragers,
- windgeleiders,
- stalen buizen,
- voertuig cabines,
- irrigatie toepassingen,
- warmtewisselaars.

Bosal is een Nederlandse onderneming die haar hoofdkwartier heeft in Lummen (België). De firma Bosal werd in 1923 opgericht in Alkmaar. Momenteel biedt de onderneming werk aan ruim 5500 mensen in 34 fabrieken, 5 onderzoeks- en ontwikkelingsafdelingen en 18 distributiecentra over de hele wereld en Bosal heeft de ambitie om steeds verder te groeien in deze uitdagende tijd [6] [7].

Volgens Bosal is onderzoek en ontwikkeling de sleutel tot succes. Het streven naar innovatie leidt tot het gebruik van hoogwaardige materialen, gewichtsbesparing en rendement en emissiereductie.

Moderne uitlaatsystemen zijn complexe producten. Het uitlaatsysteem combineert verschillende functies, zoals het reduceren van emissies, temperatuurmanagement, beheersen van de akoestiek, algemene geluidsreductie en het isoleren van vibraties. [8]

Voor de verdere innovatie van het uitlaatsysteem wil Bosal in de toekomst meer gebruik maken van de spinformingtechniek. Daarom moet er onderzoek gedaan worden naar de mogelijkheden van de spinformingtechniek. De eerste interesse gaat naar de analyse van de mogelijkheden van rotatiesymmetrisch spinnen van buisvormig materiaal. Hieronder is het logo van Bosal afgebeeld.



Figuur 6: Logo Bosal [6]

1.3 Probleemstelling

In de huidige situatie bestaat de behuizing van de katalysator uit drie delen. Deze drie delen zijn: een diepgetrokken voorzijde, een cilindrisch gedeelte en een diepgetrokken achterzijde. Het samenvoegen van de drie delen gebeurt door middel van lassen. In het cilindrische gedeelte bevindt zich de katalysator.

Deze techniek heeft verschillende nadelen. De stukken moeten namelijk nog aan elkaar gelast worden, er moeten verschillende onderdelen gebruikt worden en de verschillende onderdelen moeten precies dezelfde diameter hebben om correct gelast te kunnen worden. Ook heeft dit proces vele handelingen nodig om tot een afgewerkt product te komen. De Figuur 7 geeft de verschillende delen van de katalysatorbehuizing weer.



Figuur 7: Delen van katalysatorbehuizing [9]

De spinformingtechniek biedt enkele voordelen die deze problemen grotendeels oplossen. Ten eerste zal de behuizing van de katalysator uit één geheel bestaan en dus steeds lekvrij zijn. Ten tweede treedt er geen warmtebeïnvloeding op door het lassen. Ten derde wordt de behuizing in minder productiestappen gerealiseerd. Daarnaast is het geheel ook lichter. Ten slotte is er een gunstigere wanddikteverdeling van de buis. Deze voordelen leiden tot een vermindering van de productiekosten. Deze beperking van de kosten is zeer gewenst bij massaproductie.

In zijn vestiging in Ypsillanti, U.S.A. maakt Bosal al gebruik van de spinformingtechniek voor de vervaardiging van de behuizing voor een bepaalde katalysator. De firma weet echter nog niet wat alle mogelijkheden van deze techniek zijn omdat deze productielijn zich beperkt tot één specifiek materiaal, één diameterreductie en één wanddikte. Daardoor is er bijkomend onderzoek nodig naar de limieten van het spinnen van een buis. In Figuur 8 is een vormgegeven behuizing van een katalysator zichtbaar met behulp van *spin forming*.



Figuur 8: vormgegeven behuizing van katalysator met behulp van spin forming

De te onderzoeken parameters zijn diameterreductie, conushoek, wanddikte van de buis en de materiaalsoort. Om een duidelijke afbakening van het onderzoeksgebied te verkrijgen heeft Bosal voor iedere parameter een boven- en ondergrens opgegeven.

1.4 Doelstelling

Het spinnen van buismateriaal is een productietechniek waarover nog niet veel gekend is binnen Bosal. Onze opdracht bestaat er dus in om deze kennis verder uit te diepen en de mogelijkheden van het proces af te bakenen. Hierdoor kan Bosal deze kennis in de toekomst veelvuldig toepassen in zijn productieomgevingen.

Dit onderzoek concentreert zich op enerzijds het bepalen van de procesparameterlimieten en anderzijds het bepalen van de machineparameters. Procesparameterlimieten zijn de maximale vervormingen waarbij geen defecten optreden. Defecten zijn onder andere scheuren, rimpels en breuken die optreden in de behuizing.

Een eerste belangrijke procesparameter is de materiaalkeuze. Er zijn drie verschillende materialen die onderzocht moeten worden. Deze materialen worden aangeduid door hun werkstofnummer: 1.4509, 1.4512 en 1.4301. Dit zijn allemaal roestvaste staalsoorten, waarbij de 1.45** de ferritische roestvrijstalen zijn en de 1.4301 het austenitisch roestvrij staal is.

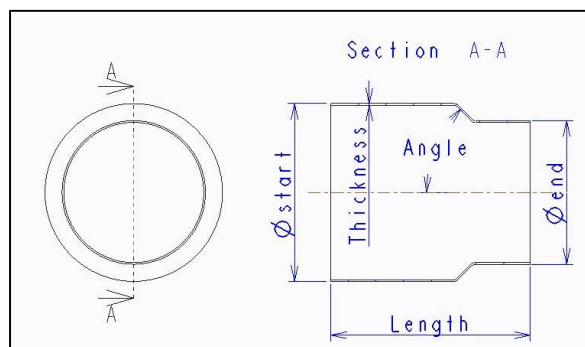
Een tweede belangrijke procesparameter is de buisdiameter. Bosal heeft verschillende buisdiameters die het in de toekomst wil omvormen door middel van spinnen. Wat vooral belangrijk is, is de reductie van de diameter. Reductie duidt het diameterverschil voor en na de vervorming aan. De maximum begindiameter is 160 mm en die moet maximaal gereduceerd worden naar 65 mm. De minimum begindiameter is 80 mm en die moet maximaal gereduceerd worden naar 40 mm. Bovenstaande waardes zijn slechts richtwaarden. Indien er meer reductie behaald kan worden, is dit wenselijk.

Een derde procesparameter is de wanddikte van de buis. Er wordt gestreefd naar een zo klein mogelijke wanddikte, omwille van de gewichtsreductie en de lagere kostprijs. Bosal heeft ervaring met het spinnen van materiaal met een wanddikte van 1,2 mm. In de toekomst zou men ook materialen met een kleinere wanddikte willen spinnen met een minimale wanddikte van 0,8 mm.



Figuur 9: Conus

Een laatste procesparameter is de hoek van de conus. De ideale conushoek wordt berekend op basis van een simulatie van de uitlaatgasstroom. De vraag van Bosal is welke conushoeken mogelijk zijn met *spin forming*. Deze hoek wordt gedefinieerd door de hoek tussen de hartlijn van de buis en het schuine vlak. Deze moet minimaal 40° en maximaal 60° bedragen.



Figuur 10: Doorsnede van behuizing

De machineparameters zoals toerental, dwars- en langsvoeding hebben een belangrijke invloed op de meetnauwkeurigheid, verschil in wanddikte, defecten, cyclustijd en oppervlaktekwaliteit. Deze machineparameters moeten geoptimaliseerd worden. Dit is in tegenstelling tot de procesparameters die zijn opgelegd.

Het uiteindelijke doel van dit onderzoek is om een duidelijk overzicht te voorzien waaruit de machineparameters gehaald kunnen worden aan de hand van de procesparameters. In dit overzicht zal ook rekening gehouden worden met de beperkingen van het proces.

1.5 Structuur masterproef

In het hoofdstuk axissymmetrisch spinnen wordt het theoretisch proces rond axissymmetrisch spinnen verklaard, hier worden zaken zoals de gereedschapsbanen, vervormingsproces, defecten, spanningen en krachten van het spinformingproces besproken.

In hoofdstuk 3 is een onderzoek gedaan naar de parameters die invloed hebben parameters op het spinformingproces, dit onderzoek is verricht door middel van een zeer uitgebreide literatuurstudie.

Vervolgens wordt hoofdstuk 4 het opstellen van de testen besproken en het uitvoeren van de testen uitgelegd. Ook zijn de verschillende stappen in de productie van de spinformingbuizen uitgelegd.

In het hoofdstuk 5 vindt de verwerking van de meetresultaten plaats.

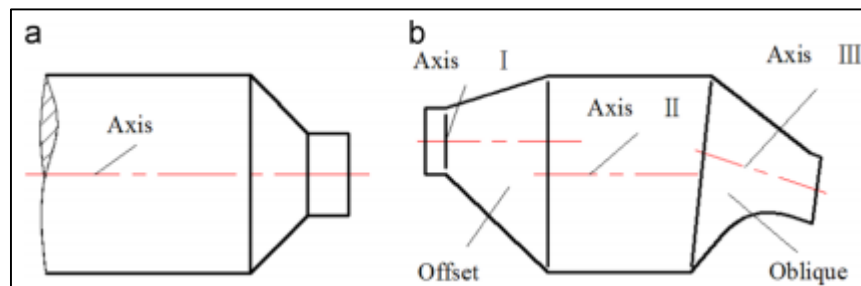
Tenslotte zal er in hoofdstuk 6 een conclusie worden getrokken omtrent het spinformingproces

2 Axisymmetrisch spinnen

2.1 Wat is axisymmetrisch spinnen

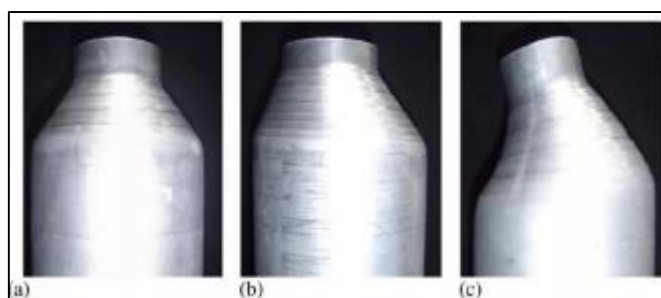
Afhankelijk van de relatieve positie van de rotatie-as van het spinformingonderdeel ten opzichte van de rotatie-as van de machine, kan *spin forming* ingedeeld worden in symmetrisch en niet-symmetrisch spinnen. Niet-symmetrisch spinnen kan verder opgedeeld worden in *offset spinning* en *oblique spinning* [3].

Bij symmetrisch spinnen is er slechts 1 rotatie-as van het te spinnen werkstuk, de dwarsdoorsnede is cirkelvormig en symmetrisch. Terwijl bij niet-symmetrisch spinnen er twee of meer rotatieassen zijn, de dwarsdoorsnede blijft wel cirkelvormig maar het gehele werkstuk is niet meer symmetrisch. Dit is af te leiden uit figuur 11 [3].



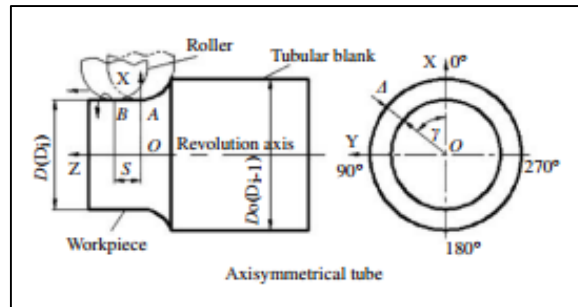
Figuur 11: (a) *symmetrisch spinnen* en (b) *niet-symmetrisch pinnen* [3]

Figuur 12 geeft een overzicht van de verschillende methodes voor het spinnen van buisvormig materiaal namelijk het symmetrisch spinnen, het offset spinnen en het *oblique spinning*.



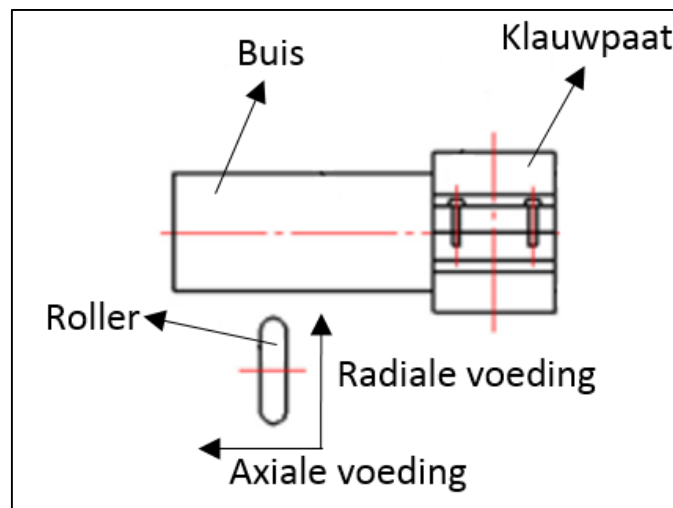
Figuur 12: (a) *symmetrisch*, (b) *offset* en (c) *oblique spinnen* [3]

Vanaf dit punt in de masterproef wordt er enkel nog over het symmetrisch spinnen gesproken. In Figuur 13 is een tekening zichtbaar met een doorsnede van een werkstuk vervormd met *spin forming*.



Figuur 13: Symmetrisch spinnen [10]

Gedurende het symmetrisch spinnen wordt het buisvormige materiaal geklemd door de klauwplaat van de CNC¹-draaibank. Het vormgeven van het symmetrische werkstuk gebeurt door het gereedschap te bewegen over het werkstukoppervlak. Dit gereedschap kan zich verplaatsen in axiale en radiale richting. Het gereedschap heeft de vorm van een schijf met een bepaalde neusradius. Door het axiaal en radiaal verplaatsen van het gereedschap wordt de gewenste geometrie verkregen. Het buisvormige materiaal vervormt door de kracht die het gereedschap lokaal op de buis uitoefent. In Figuur 14 is een schematische voorstelling van de proefopstelling afgebeeld.



Figuur 14: Opstelling voor symmetrisch spinnen

¹ Computer Numerical Control

2.2 De beweging van het vervormingsgereedschap

Het vervormingsgereedschap is een schijf die vrij kan roteren rond zijn as. Een voorbeeld van een spinninggereedschap is zichtbaar in Figuur 15. Soms wordt dit gereedschap ook benoemd als “roller” of “tooling”.

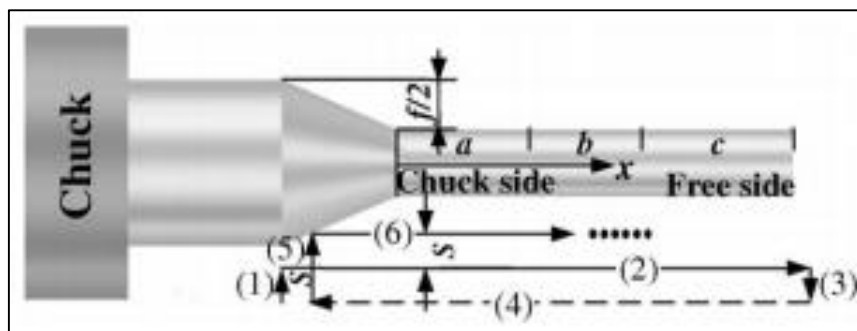


Figuur 15: Afbeelding van het vervormingsgereedschap [11]

De positie van het gereedschap is eenvoudig in te stellen of te programmeren op een machine. Er zijn verschillende configuraties van gereedschapsbanen mogelijk. Deze verschillende gereedschapsbanen worden besproken in de volgende paragrafen.

2.2.1 Gereedschapsbaan A

Eén van de mogelijkheden voor de beweging van de roller is de baan weergegeven in Figuur 16. De buis is links ingeklemd in de klauwplaat, aan de rechterkant bevindt zich het vrije uiteinde waar de roller steeds naartoe beweegt.



Figuur 16: Gereedschapsbaan A

De beweging volgens baan A verloopt als volgt:

- (1) *Radiale indrukking*. De roller drukt de buis in volgens zijn diameter op de startdiameter. Dit wordt ook wel de aanzet genoemd.
- (2) *Axiaal bewegen volgens de as van buis*. De roller beweegt axiaal naar het vrije uiteinde.

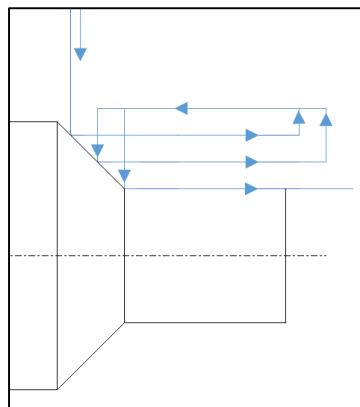
- (3) *Terugtrekking.* De roller trekt zich terug wanneer het voorbij het vrije uiteinde is gekomen.
- (4) *Axiaal terug bewegen volgens de as van de buis.* De roller beweegt naar een nieuwe begin locatie. Het nieuwe beginpunt verplaatst zich stelselmatig naar het vrije uiteinde.
- (5) *Nieuwe radiale indrukking.* De roller drukt weer in op de buis maar deze keer met een indrukking 2 maal de aanzet.
- (6) *Nieuwe axiale beweging volgens de as van de buis.* De roller beweegt zich weer naar het vrije uiteinde [12].

De axiale en radiale voeding blijven constant gedurende het hele spinproces, totdat de gewenste diameter overeen komt met de werkelijke diameter van de buis.

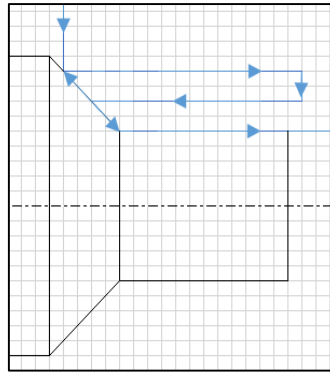
Bij gereedschapsbaan A valt er op dat er enkel een bewerking wordt uitgevoerd naar het vrije uiteinde toe. Terwijl er geen bewerking gebeurt in als het gereedschap in de andere richting beweegt. Dit wordt unidirectioneel spinnen genoemd. Wanneer een unidirectionele gereedschapsbaan gebruikt wordt, zijn er nog twee varianten te onderscheiden, namelijk voorwaarts en achterwaarts spinnen. Bij een voorwaartse baan beweegt de het gereedschap van de conusvorm in de richting het vrije uiteinde van de buis. Dit in tegenstelling tot achterwaarts spinnen, hierbij beweegt het gereedschap van het vrije uiteinde in de richting van de conus.

Wanneer er tijdens de beweging van het vrije uiteinde naar het geklemde uiteinde ook vervorming plaatsvindt dan wordt dit bidirectioneel spinnen genoemd.

Een schets van een unidirectionele gereedschapsbaan is zichtbaar in Figuur 17. Een bidirectionele gereedschapsbaan is afgebeeld in Figuur 18.



Figuur 17: Schets van een unidirectionele gereedschapsbaan

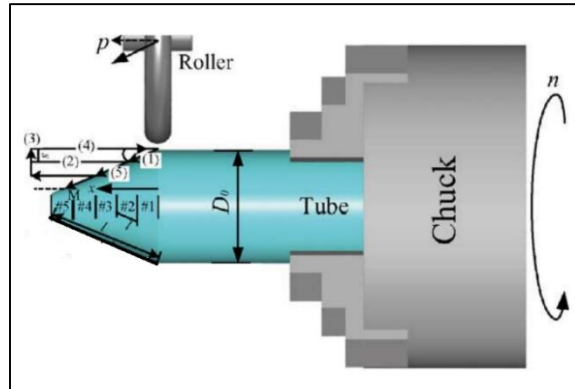


Figuur 18: Schets van een bidirectionele gereedschapsbaan

Gedurende de testen wordt ook gebruik gemaakt van deze gereedschapsbanen, zowel de unidirectioneel spinnen als bidirectioneel spinnen. Aangezien de bidirectionele gereedschapsbaan in veel literatuur gebruikt wordt en Bosal in de U.S.A. al gebruikt maakt van bidirectioneel spinnen, is er het meeste onderzoek gebeurd naar bidirectioneel spinnen. Voor de volledigheid worden de andere paden die bij *spin forming* gebruikt worden ook besproken.

2.2.2 Gereedschapsbaan B

Een tweede methode die gebruikt wordt voor *spin forming* is te zien in Figuur 19.



Figuur 19: Gereedschapsbaan B

Het gereedschap beweegt bij baan B als volgt:

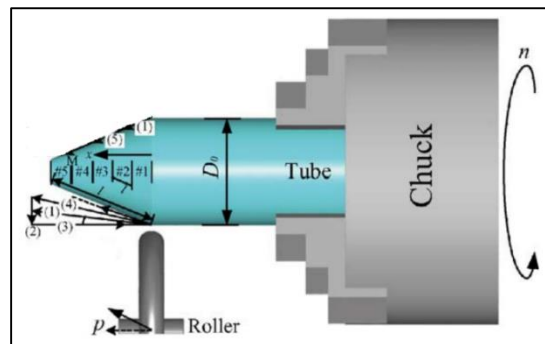
- (1) *Conusvorming*. De roller beweegt in de richting van de conus volgens de conushoek θ totdat de radiale indrukking gelijk wordt aan de ingestelde waarde.
- (2) *Axiaal bewegen volgens de as van de buis*. De roller beweegt in de richting van het vrije uiteinde zodat de hele buis vervormd.
- (3) – (4) *Terugkeren naar de startpositie*. De roller trekt zich terug van de buis en beweegt naar zijn startpositie.

- (4) *Verdere conusvorming*. De roller beweegt in de richting van de conus volgens de conushoek totdat de radiale indrukking gelijk wordt aan 2 maal de ingestelde waarde [13].

2.2.3 Gereedschapsbaan C

Een derde gereedschapsbaan die gebruikt wordt voor *spin forming* is te zien in

Figuur 20.

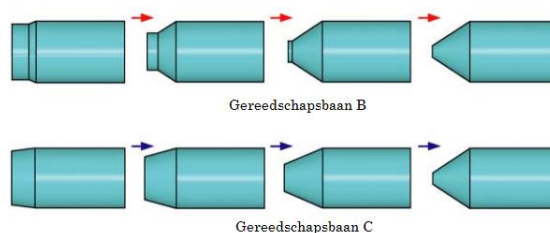


Figuur 20: Gereedschapsbaan C

Het gereedschap beweegt bij baan C als volgt:

- (1) *Conusvorming met behulp van staphoeken*. De roller beweegt in de richting van de staphoek $\Delta\theta$ totdat de buis gevormd is in de gewenste conusvorm.
- (2) – (3) *Terugkeren naar de startpositie*. De roller trekt zich terug van de buis en keert terug naar de startpositie.
- (4) *Conusvorming met behulp van dubbele staphoek*. De roller beweegt in de richting van de conushoek $2\Delta\theta$ totdat de buis vervormd is tot de gewenste conusvorm.

Figuur 21 geeft duidelijk weer wat het verschil is tussen gereedschapsbaan B en gereedschapsbaan C. Bij gereedschapsbaan C is de conusvorm meteen volledig aanwezig in de vervormde zone, terwijl bij baan B de conusvorm geleidelijk gevormd wordt.



Figuur 21: Vergelijking tussen gereedschapsbaan B en gereedschapsbaan C [12]

Deze paragrafen gaven een overzicht van de verschillende mogelijke gereedschapsbanen voor het spinformingproces. In deze thesis wordt er enkel gebruik gemaakt van gereedschapsbaan A. Hierbij worden de invloeden van zowel de uni- als bi-directionele gereedschapsbanen onderzocht.

2.3 Plastisch vervormen

2.3.1 Wat is plastisch vervormen?

Het vervormingsproces *spin forming* berust op het feit van plastische vervorming. Vooraleer een materiaal plastisch gaat vervormen, is het eerst elastisch vervormd.

Wanneer een kleine belasting wordt aangebracht op een materiaal dan vervormt dit elastisch. Als deze kracht terug weggenomen wordt, veert het materiaal terug naar zijn oorspronkelijke vorm. Er is een lineair verband tussen de spanning en de rek.

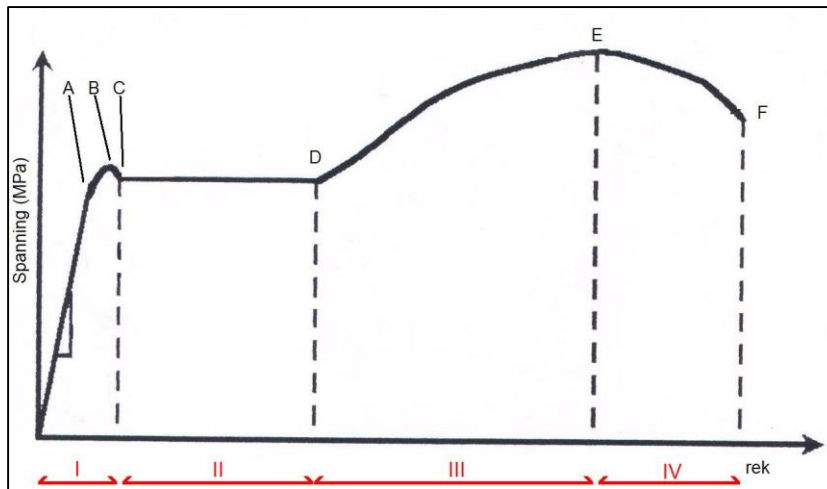
Wanneer er grotere belastingen op een materiaal worden aangebracht, zoals bij *spin forming*, geldt het lineaire verband tussen de rek en de belasting niet meer. Dan vervormt het materiaal plastisch. Van zodra de belasting wordt weggenomen keert het elastische deel van de vervorming terug, dit is meestal onder de vorm van terugveren. De plastische vervorming blijft echter wel aanwezig [14] [15].

Bij het plastisch vervormen glijden de kristalkorrels langs elkaar, Hierdoor ontstaan er lijnvormige fouten en neemt de materiaalspanning toe, dit noemt vormversteving. Dit wil zeggen dat de weerstand tegen verdere vervorming toeneemt, wat tot uiting komt in een grotere hardheid. De vormversteving is een gevolg van koud vervorming met een verhoging van de sterkte als gevolg. De oorzaak ligt in de dislocaties, die zich verplaatsen en vastzetten. Het effect vormversteving kan wenselijk zijn. Koud vervorming maakt het materiaal sterker maar ook gevoeliger voor breuk. Door het werkstuk na vervorming te gloeien wordt het materiaal terug meer vervormbaar en vertoont het terug meer ductiel gedrag [16] [15].

Spin forming is een voorbeeld van koudvervormen. Kort wil dit zeggen dat er steeds grotere krachten nodig zijn voor het verder vervormen van het metaal te wijten aan de vervormingsversteving.

2.3.2 Spanning-rekdiagram

Het plastisch gedrag kan afgeleid worden uit het spanning-rekdiagram. Er is een spanning-rekdiagram van koolstofstaal afgebeeld in Figuur 22. In dit diagram wordt de spanning ten opzichte van de rek uitgezet.



Figuur 22: Spanning-rek diagram [17]

In het spanning-rekdiagram zijn verschillende punten te onderscheiden:

- *punt A: proportionaliteitsgrens*. Links van dit punt in het spannings-
rekdiagram is de wet van Hooke geldig. Boven dit punt is de rek niet
meer lineair in functie van de spanning.
- *punt B: elasticiteitsgrens*. Dit is de bovenste vloeigrens, boven deze grens
zal het materiaal niet meer elastisch maar plastisch vervormen.
- *punt C: vloeigrens*. Hier zal het materiaal starten met vloeien. De spanning
die optreedt wordt de vloeispanning genoemd.

Praktisch vallen de punten A, B en C samen. Enkel wordt de bovenste vloeigrens weergegeven.

- *vanaf punt D: versteviging*. Vanaf het punt D zal het materiaal starten met
verstevigen. De versteviging start bij de vloeigrens en blijft continu
stijgen totdat de maximale spanning bereikt wordt.
- *punt E: treksterkte*. Maximale spanning die optreedt in het materiaal.
- *punt F: breuk*. Op het punt F zal het materiaal breken.

In het spanning-rekdiagram zijn verschillende gebieden te onderscheiden namelijk:

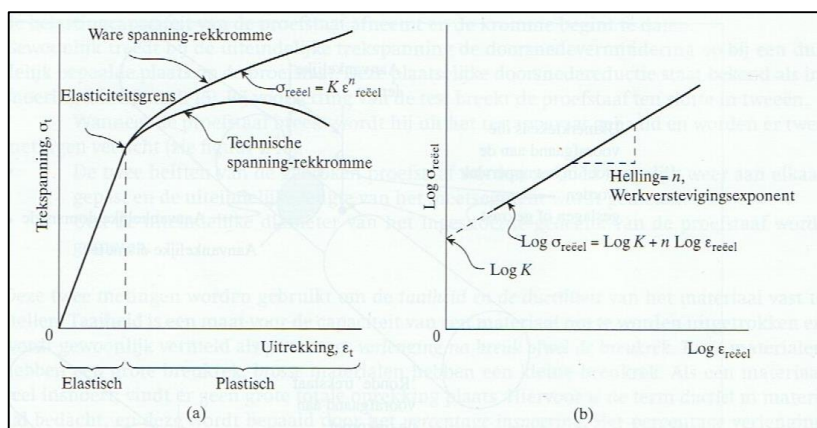
- I) *Elastische gebied*. In dit gebied zal een materiaal, wanneer de kracht van het materiaal wordt weggenomen, terug naar zijn oorspronkelijke afmetingen terugkeren. Uit de helling van de grafiek wordt de elasticiteitsmodulus afgeleid.

- II) *Vloeien*. Vloeien van het materiaal of in dit geval het metaal. Hier gaat de rek van het materiaal onder constante spanning veranderen. Bij metalen kan deze fase sterk aanwezig zijn afhankelijk van het soort metaal dat wordt gebruikt. Zo zullen ductiele metalen meer kunnen vloeien dan brosse metalen.

- III) *Werkverstevinging*. In dit gebied zal het materiaal gaan versteven door het verplaatsen van de dislocaties, hierdoor zal het materiaal sterker en harder worden.

- IV) *Insnoering*. Vanaf het punt van maximale spanning zal het materiaal erg te beginnen insnoeren. In dit gebied blijft de spanning gelijk, totdat het proefstukje stuk zal gaan. Ergens anders dan de plaats waar de dwarsdoorsnede insnoert zal de spanning dalen. Het materiaal zal wel degelijk op een spanning hoger dan de maximale treksterkte bezwijken.

De oppervlakte onder het spanning-rekdiagram is een maat voor de taaiheid ofwel een maat voor de hoeveelheid energie die het materiaal kan opnemen. Op Figuur 23 zijn een spanning-rek-diagram en reëel spanning-rek-diagram afgebeeld. Zo zal een bros materiaal, een relatief kleine oppervlakte bestrijken. Wat wil zeggen dat het materiaal geen insnoering en niet of slechts weinig plastisch kan vervormen. Het tegenovergestelde is waar voor een taai materiaal [15] [17] [16].



Figuur 23: (a) spanning-rek-diagram, (b) werkverstevinging [15]

2.3.3 Vervormingsverstevinging

Wanneer het materiaal uitgerekt wordt voorbij zijn elasticiteitsgrens, treedt er plastische vervorming op. Door de wisselwerking van de dislocaties in de materiaalstructuur wordt het materiaal sterker en harder. Dit verschijnsel is werkverstevinging. In reële spanning-rekproeven kan gebruik worden gemaakt van een vergelijking om de vorm van het plastisch gebied van de spanning-rekkromme te benaderen:

$$\sigma_{re\ddot{e}el} = K \cdot \epsilon_{re\ddot{e}el}^n$$

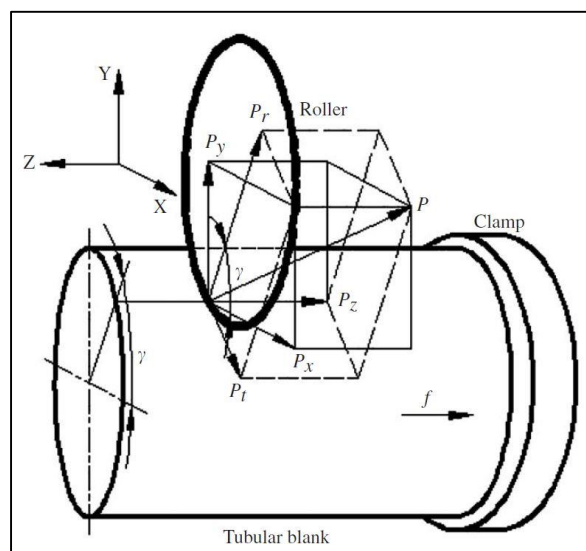
Waarbij $\sigma_{re\ddot{e}el}$ de ware spanning is, $\epsilon_{re\ddot{e}el}$ de ware rek, K een sterktecoëfficiënt en n de werkverstevingsexponent. Deze laatste parameter geeft aan hoe groot de neiging van een materiaal tot werkverstevinging is bij plastische vervorming, terwijl de sterkte van een materiaal met een lage werkverstevingsexponent niet belangrijk toeneemt bij plastische vervorming [15].

Aangezien *spin forming* een proces van plastische vervorming is zal er dus zeker rekening mee moeten gehouden worden dat het materiaal gaat versteven gedurende het vervormen en de proceskrachten dus vergroten.

2.4 Krachten en spanningen in het spinformingproces

De spinformingkracht P is de resulterende kracht uitgeoefend door de roller op de buis. Voor het bepalen van het gewenste vermogen voor de laterale, longitudinale servo-actuator en de hoofdmotor van de spinningmachine, moet de maximale spinkracht gekend zijn. De spinkracht is samengesteld uit een axiale, radiale en tangentiële component P_r , P_t en P_z [10].

Uit Figuur 24 volgt: $P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} = \sqrt{P_r^2 + P_t^2 + P_z^2}$ [10]



Figuur 24: Krachten tijdens spinformingproces [10]

Uit tekening is af te leiden dat de tangentiële spin kracht zeer klein is vergeleken met de radiale en axiale spinformingkracht.

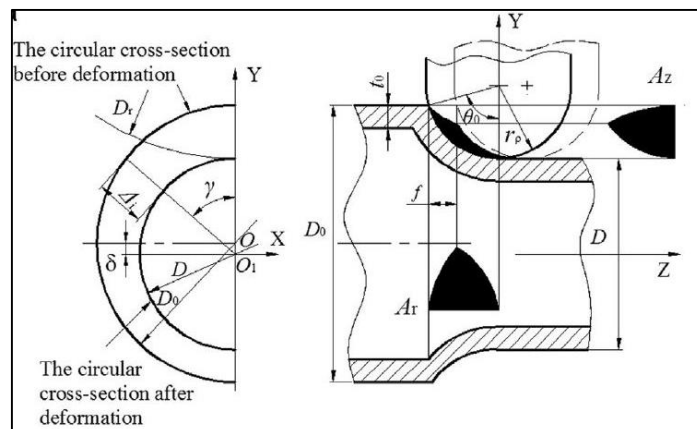
De axiale en radiale spinformingkrachten kunnen als volgt berekend worden:

$$P_r = \sigma_{c,r} A_r$$

$$P_z = \sigma_{c,z} A_z$$

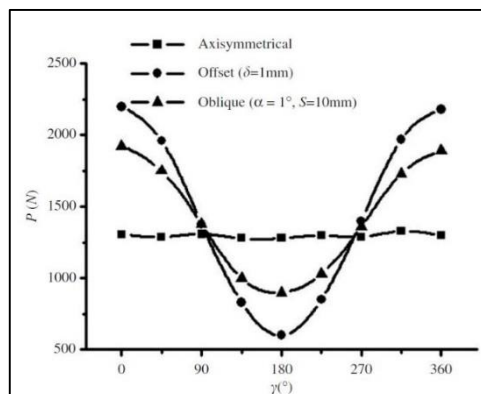
Hierbij zijn $\sigma_{c,r}$ en $\sigma_{c,z}$ de gemiddelde radiale en axiale contactspanningen tussen de roller en buis zijn. De oppervlakken A_r en A_z zijn de geprojecteerde radiale en axiale contactoppervlakken tussen de roller en de buis [3].

In figuur 25 zijn de spinkrachten afgebeeld tijdens één omwenteling van buis tegen de roller tijdens symmetrisch en niet-symmetrisch spinnen. Waarbij γ de omwentelingshoek van de buis is. Uit de figuur kan afgeleid worden dat de spinkracht gedurende het symmetrisch spinnen licht verandert met γ . Dit is bij niet-symmetrisch spinnen helemaal anders, hier zal de spinkracht periodisch veranderen met γ , de periode is 1 volledige omwenteling van de buis [10].



Figuur 25: Contactoppervlakken gedurende het spinformingproces [3]

Uit Figuur 26 kan aangenomen worden dat bij *symmetrisch spinnen* de spinkracht vrij constant is tijdens een rotatie van de buis.

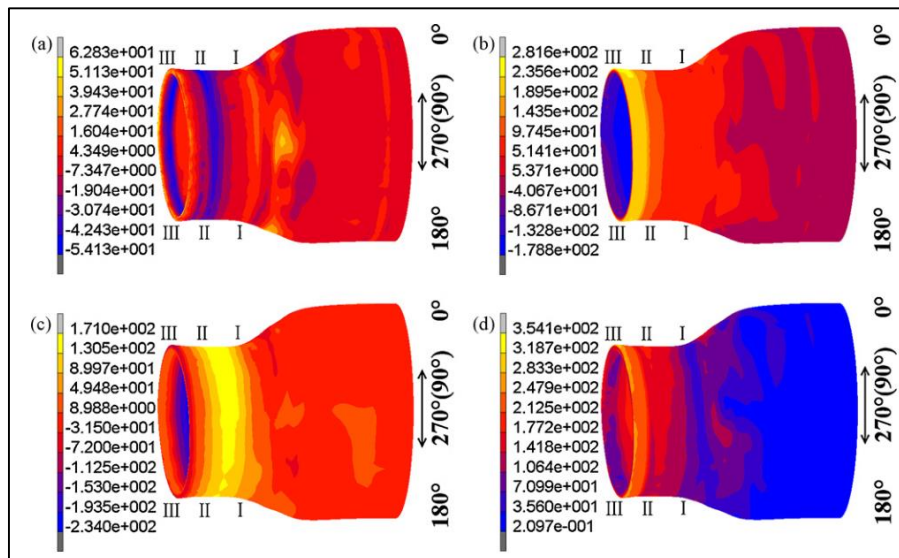


Figuur 26: verloop van de spinkrachten [10]

De Figuur 27 geeft weer hoe de spanningen verdeeld zijn over het buisoppervlak na de vijfde spinningsstap. In Figuur 27(a) is de radiale spanning weergegeven. Deze radiale spanning bereikt het maximum in gedeelte I en III. In Figuur 27(b) is de tangentiële spanning weergegeven, deze is maximaal aan het uiteinde van de buis in gedeelte III. De axiale spanning daarentegen is in III het kleinst. Dit komt doordat de buis in III vrij kan vervormen omdat deze niet tegengehouden wordt door ander materiaal.

Deze axiale spanning bereikt een maximum tussen gedeelte I en II, omdat het materiaal daar wel wordt tegengehouden om te vervormen door het materiaal erlangs.

In Figuur 27(d) is de equivalente spanning weergegeven. Dit is de som van de deelspanningen (radiale, tangentiële en axiale spanning). In gedeelte III is de spanning het grootst, dit is te verklaren door een grote tangentiële spanning in dit punt [18].



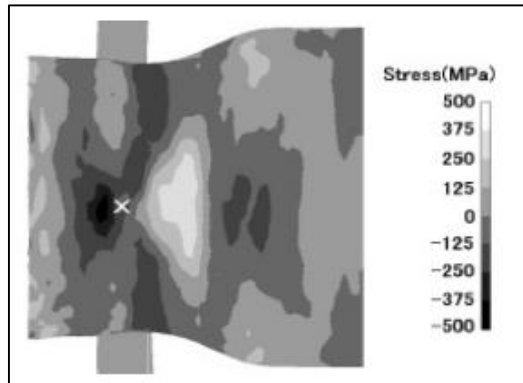
Figuur 27: Spanningsverloop tijdens het spinformingproces

2.5 Defecten tijdens spin forming

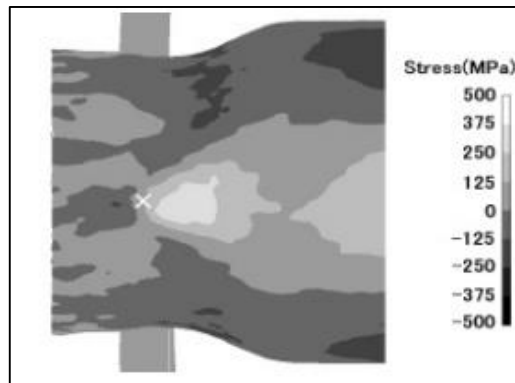
2.5.1 Invloed van de spanningen

Bij het spinformingproces vindt de vervorming plaats in een kleine zone rondom de roller. Dit wil zeggen dat het spanningsverloop in de buis varieert met de positie van de roller.

Figuur 28 toont het beeld van het omtrekspanningsverloop op een bepaald punt gedurende het spinformingproces. De rollers bewegen zich hier van de conus naar het vrije uiteinde. Figuur 29 geeft een beeld van het spanningsverloop volgens de as van de buis gedurende het spinformingproces.



Figuur 28: Omtrekspanning [19]

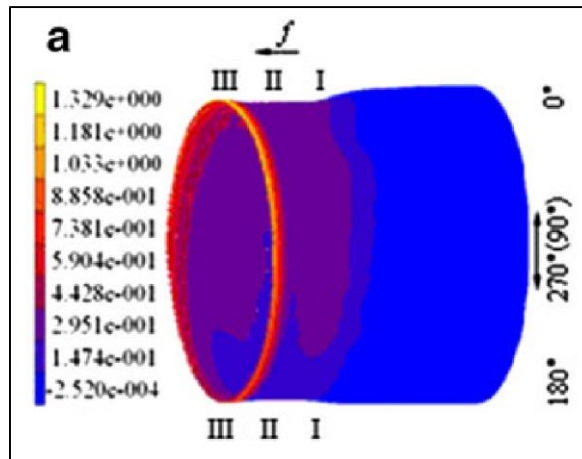


Figuur 29: Spanning volgens de as [19]

De zone rondom het contactpunt van het gereedschap ondervindt een trekspanning. Terwijl de zone net achter het gereedschap een samendrukspanning ondergaat. Dit is rechtstreeks verbonden met de samendrukspanning of de krimpspanning. Echter zijn sommige zones buiten de contactzone onderworpen aan de maximale spanning of treksterkte, specifiek de zone achter de contactzone in de lengterichting van de as [19].

Volgens de lengterichting van de as is uit Figuur 29 is af te leiden dat de maximale spanning of de treksterkte zich kegelvormig uitspreidt. Dit is te wijten aan de axiale verplaatsing van de roller [19].

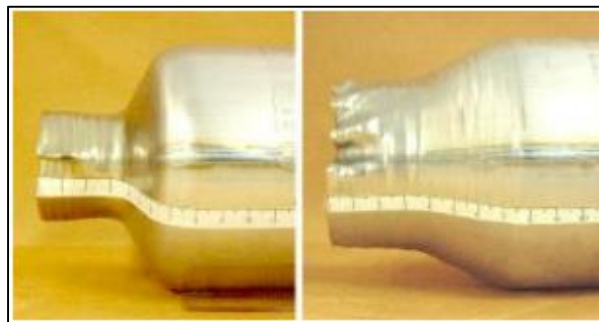
Op Figuur 30 is zichtbaar dat er bij het vrije uiteinde van de buis de grootste axiale rek optreedt. Hierdoor is er op het vrije uiteinde het meeste wanddiktevermindering. Dit is dus de positie waar mogelijke defecten kunnen optreden en waaraan aandacht moet geschonken worden bij het spinningproces [20].



Figuur 30: Beeld van eindige elementen simulatie van de axiale rek na het spinnen [20]

Hoewel spinning kan lijken op een eenvoudige drukvervorming moet er echter opgemerkt worden dat de treksterkte en de drukspanning cyclisch optreden gedurende het spinformingproces.

Enkele defecten die kunnen optreden zijn scheuren en knikken van de buis, dit is zichtbaar in Figuur 31. Het scheuren wordt veroorzaakt door een te grote omtrekspanning en grote koudvervorming. Terwijl knikken optreedt wanneer de drukspanning te hoog oploopt, dit uit zich onder de vorm van rimpels. Voor een succesvol spinformingproces is het cruciaal rekening te houden met deze oorzaken van defecten [19].



Figuur 31: defecten bij spin forming; linkse figuur scheuren en rechtse figuur knikken [19]

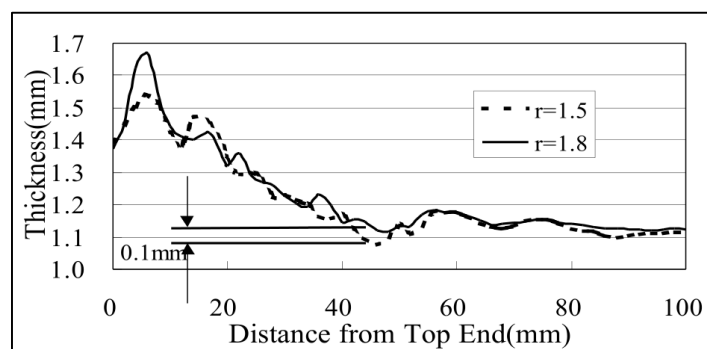
3 Onderzoek naar de invloed parameters van spin forming

De volgende paragrafen verklaren hoe de machine- en procesparameters het eindproduct na het spinningproces beïnvloeden. Telkens wordt er een invloedparameter besproken en worden de invloeden op het proces en eindproduct uitgelegd.

3.1 Invloed van het materiaal

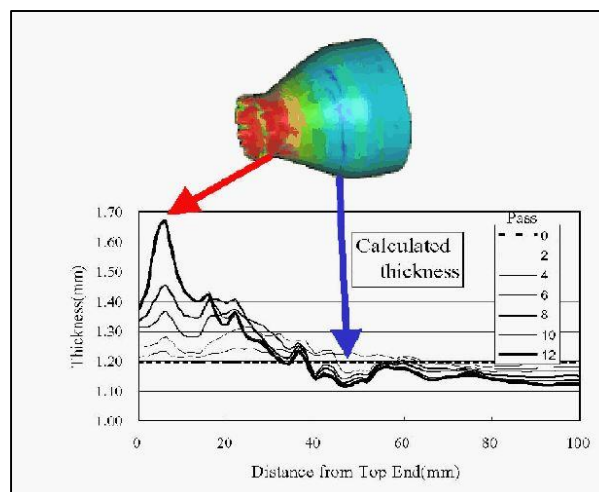
De materiaalkeuze heeft een belangrijke invloed op het vervormingsgedrag van de buis. Bij wetenschappelijk onderzoek is er vooral gebruik gemaakt van verschillende soorten aluminium, bij slechts enkele onderzoeken is roestvast staal onderzocht. Belangrijke materiaalparameters zijn de breukrek en vervormingsversteving. De breukrek is belangrijk om te zien hoeveel vervorming mogelijk is tot breuk. De vervormingsversteving geeft weer hoeveel de bewerkingskrachten stijgen bij toenemende vervorming.

De anisotropiecoëfficiënt is ook een belangrijke factor in het proces. Bij een materiaal met een hoge anisotropiecoëfficiënt heeft de dikterek minder invloed dan de breedterek. Hierdoor treedt er bij vervorming minder wanddiktevermindering op, dit is zichtbaar in Figuur 32. Een eerste waarneming is dat door een hoge anisotropiecoëfficiënt, er minder wanddiktevermindering is. Bij de testresultaten is de dikte verminderd met 0,1 mm bij een plaat die initieel een dikte had van 1,2 mm. Deze vermindering heeft dus een belangrijke invloed. Door een materiaal met een hogere R-waarde te gebruiken kan het startmateriaal dunner zijn, wat een kosten- en gewichtsdaling oplevert [19].



Figuur 32: Wanddikte i. f. v. de afstand tot het buiseinde voor twee materialen met een andere anisotropiecoëfficiënt r [19]

In de Figuur 33 is te zien hoe de wanddikte van de buis verandert gedurende het spinning proces. Er is de wanddikte van de buis weergegeven in functie van de afstand tot het uiteinde van de buis. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat er verdikking is in het rechte gereduceerde gedeelte en dat er verdunning is op de schuine wand. Ook is er af te lezen dat de wanddikteverandering vergroot bij iedere pas. Eigenlijk veroorzaakt het spinningproces een toename in wanddikte. Enkel als er ook axiale vloeit van het materiaal zal er verdunning kunnen optreden. Verdunning kan enkel optreden tijdens spinnen wanneer de verdunning door axiale verlenging groter is dan de verdikking die het spinproces veroorzaakt.



Figuur 33: Wanddikte van de buis i. f. v. de afstand tot het uiteinde van de buis.

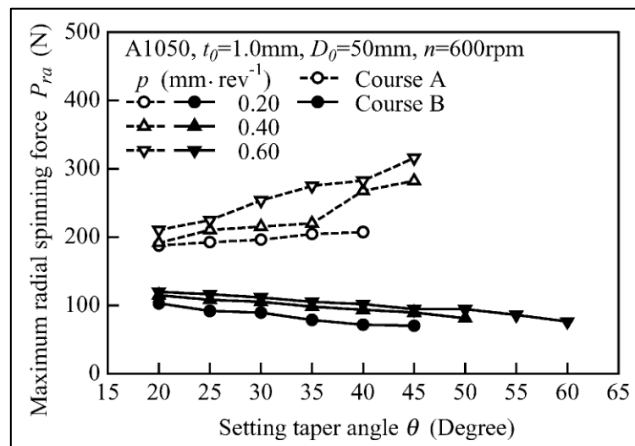
3.2 Invloed van de gereedschapsbanen

Er zijn verschillende gereedschapsbanen mogelijk. In verschillende wetenschappelijke onderzoeken worden vaak andere gereedschapsbanen gebruikt. Hierdoor is het moeilijk om deze onderzoeken met elkaar te vergelijken.

In een eerste is er onderzoek geweest naar de invloed van vorm van de gereedschapsbaan op verschillende parameters. Er werden twee verschillende gereedschapsbanen vergeleken. In hoofdstuk 2 is er al reeds gesproken over de verschillende gereedschapsbanen, wanneer er in het volgende deel gesproken wordt over A en B zal dit gaan over respectievelijk gereedschapsbaan B en C uit hoofdstuk 2.

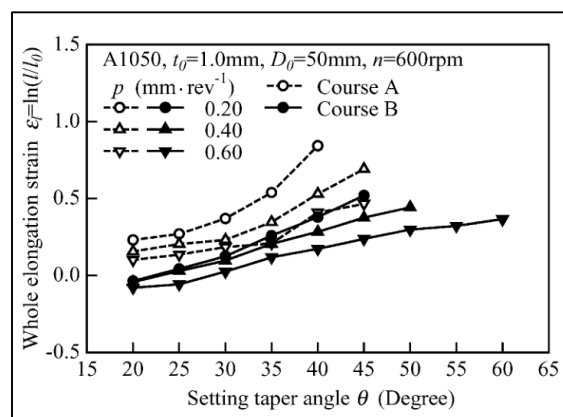
Uit Figuur 34 blijkt dat de radiale spinningkracht veel groter is bij gereedschapsbaan A dan bij gereedschapsbaan B. Dit geldt voor iedere geteste conushoek en axiale voedingsnelheid. Dit is te verklaren door de vervormingsrichting. In Figuur 34 is te zien welk verschil er is in vervormingsrichting bij baan A en B.

Deze illustratie geeft duidelijk weer hoe het gereedschap tegen het werkstuk aandrukt. Het materiaal vervormt bij baan A veel meer, hier is dan ook te zien dat de maximale spinningkrachten groter zijn ten opzichte van baan B. Uit deze Figuur 34 is ook duidelijk te zien dat de maximale spinningkracht groter wordt als de axiale voeding van het gereedschap stijgt. Dit komt omdat, bij stijgende axiale voeding, het gebied van de het gereedschap dat in de buis gedrukt groter wordt en daardoor meer materiaal vervormt. Hierdoor zal de spinningkracht stijgen [13].



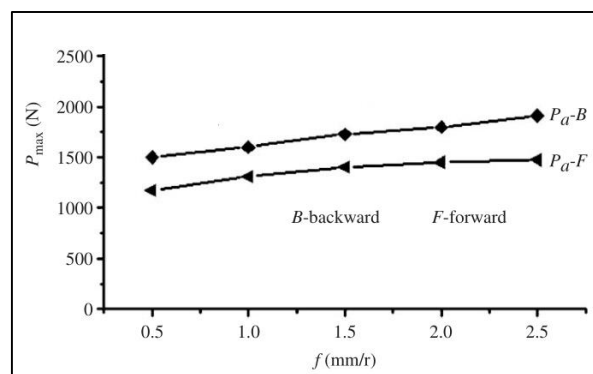
Figuur 34: Verschil in maximale spinningkracht voor gereedschapsbanen A en B [13]

De vorm van de gereedschapsbaan heeft ook invloed op de totale axiale rek. De totale axiale rek zal veel hoger liggen bij gereedschapsbaan A dan bij gereedschapsbaan B. Dit geldt voor iedere conushoek en axiale voedingsnelheid omdat de axiale rek vooral veroorzaakt wordt bij het vervormen van het rechte gedeelte. Bij baan A wordt er meer vervormd over een recht gedeelte dan bij baan B. Dus is er bij baan A een grotere totale axiale rek als bij baan B [13].



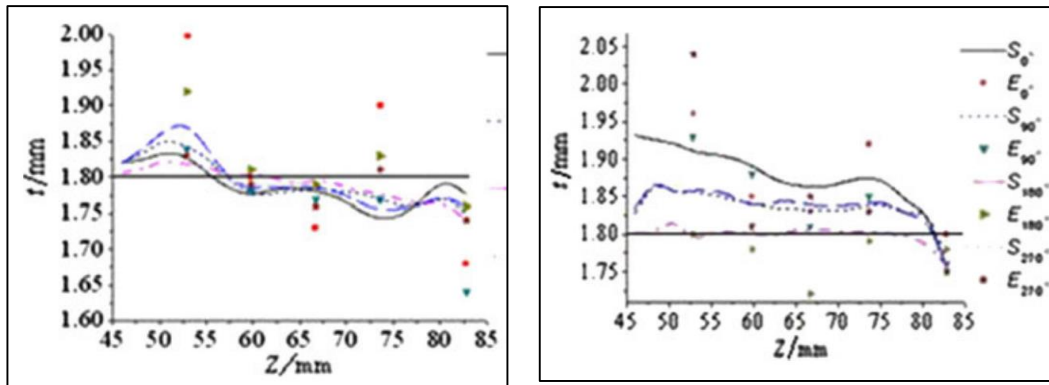
Figuur 35: Verschil in totale axiale rek bij gereedschapsbanen A en B [13]

Daarnaast hangen de spinningkrachten ook sterk af van de spinningrichting. Er is een groot verschil tussen voorwaarts spinnen en achterwaarts spinnen. Bij voorwaarts spinnen beweegt het gereedschap steeds richting het vrije uiteinde van de buis. In tegenstelling tot achterwaarts spinnen. Hierbij vertrekt het gereedschap aan het vrije uiteinde en beweegt richting de conusvorm. Uit Figuur 36 blijkt dat voor elke voedingssnelheid de spinningkrachten bij voorwaarts spinnen kleiner zijn ten opzichte van achterwaarts spinnen. Dit komt doordat bij voorwaarts spinnen het materiaal richting het onvervormde vrije uiteinde kan vloeien. De weerstand tegen vervorming is hierdoor klein. Bij het achterwaarts spinnen daarentegen hoopt het onvervormde metaal zich op voor het frontale gereedschapsoppervlak. Er gebeurt lokale verdikking, wat zorgt voor grotere weerstand tegen vervorming en dus grotere spin krachten [10].



Figuur 36: Spinningkrachten i f v de axiale voeding voor zowel een voorwaartse als een achterwaartse gereedschapsbaan [10]

In Figuur 37 is er een grafiek te zien van de wanddikte in functie van de afstand tot het vrije uiteinde bij een offset spinning proces. De beginwanddikte is 1,80 mm, dit is de zwarte lijn op de figuur. De andere, gekleurde, lijnen geven het dikteverloop weer. De verschillen tussen de verschillende gekleurde lijnen zijn te verklaren door de spinningstrategie want door het offset-spinnen is de spanning niet constant over de omtrek. Daarom zal het dikteverloop niet constant zijn over de omtrek. Het dikteverloop is meer constant bij conventioneel spinnen. De linker figuur geeft de wanddikteverdeling weer bij een voorwaartse gereedschapsbaan. Er is vooral wanddikte verdunning. De rechterfiguur geeft de wanddikteverdeling weer bij een achterwaartse gereedschapsbaan. Hier valt op dat er bijna overal verdikking is, enkel op het laatste stukje van het vrije uiteinde zal er verdunning optreden. Deze verdikking is te verklaren doordat het materiaal zich zal ophopen voor de roller [20].

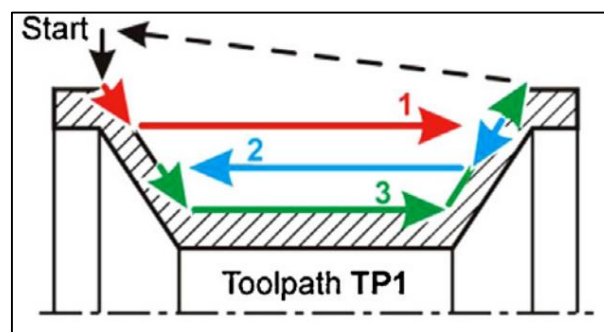


Figuur 37: links: wanddikteverdeling bij voorwaarts spinnen; rechts: wanddikteverdeling bij achterwaarts spinnen [20]

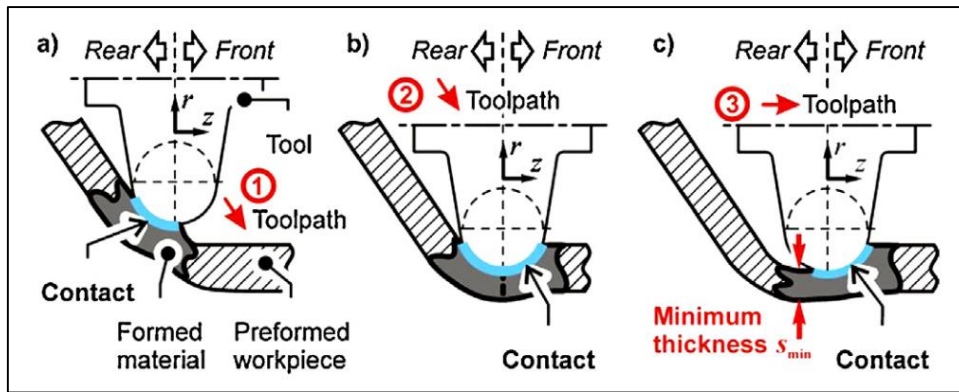
Als er een andere gereedschapsbaan gebruikt wordt, dan verandert deze de wanddikteverdeling. Er wordt in Figuur 38 een bidirectionele gereedschapsbaan gebruikt waarbij het gereedschap tijdens de radiale voeding de schuine wand volgt. In meerdere tussenstappen wordt het eindproduct gevormd [21].

Tijdens het vervormen zijn er drie contactsituaties van het gereedschap met het werkstuk. Deze drie contactsituaties zijn afgebeeld in Figuur 39. In de Figuur 39a vervormt het gereedschap de schuine wand. Het gereedschap raakt enkel met de achterkant. In Figuur 39b bereikt het gereedschap het begin van het cilindrisch gedeelte. Het gereedschap vervormt nu met zowel de voor- als achterkant. Vervolgens komt het gereedschap volledig op het cilindrisch gedeelte, het gereedschap vervormt dan enkel aan de voorkant. Dit is zichtbaar in Figuur 39c [21].

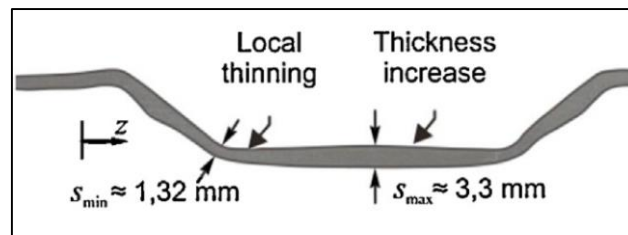
Het gereedschapscontact heeft invloed op de wanddikteverandering. In Figuur 40 is de wanddikteverdeling zichtbaar die ontstaat na het spinningproces met deze gereedschapsbaan. Het opvallendst is dat op de overgang van de conus naar cilinder er een lokale wanddiktevermindering is. Op het conusvormige en cilindrische gedeelte zijn er lichte wanddiktoenames. Afhankelijk van de gewenste diameterverdeling kunnen er andere gereedschapsbanen gebruikt worden. Er moet vooral opgelet worden op de plaatsen waar het gereedschap overgaat van radiale naar axiale voeding [21].



Figuur 38: Bidirectionele gereedschapsbaan waarbij het gereedschap tijdens de radiale voeding de schuine wand volgt [21]



Figuur 39: Verschillende contactsituaties tussen het gereedschap en het werkstuk [21]



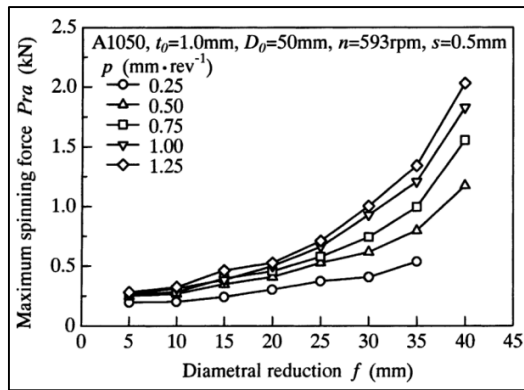
Figuur 40: Wanddikteverdeling na het spinningproces dat afgebeeld wordt in Figuur 38 en Figuur 39 [21]

3.3 Invloed van diameterreductie

De diameterreductie geeft aan hoe groot het diameterverschil is tussen het begin en het einde van het spinningproces. Deze lengte wordt gemeten op het uiteinde van de buis. Er moet rekening gehouden worden met de hoeveelheid vervorming, dit veroorzaakt defecten.

3.3.1 Invloed van de diameterreductie op de spinningkrachten

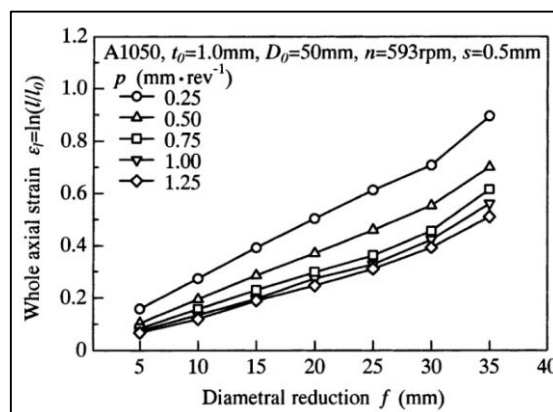
Ten eerste beïnvloedt de diameterreductie de maximale spinningkrachten. Uit Figuur 41 blijkt dat als de diameterreductie stijgt, ook de maximale spinningkracht stijgt. Dit is te verklaren door twee verschijnselen. Een eerste verschijnsel is de vervormingsversteving van het materiaal. Hierdoor stijgen de benodigde minimale vervormingskrachten bij stijgende vervorming. Ten tweede stijgt de wanddikte bij toenemende diameterreductie. Hierdoor wordt de weerstand tegen vervorming groter en stijgen dus de spinningkrachten. Dit stijgen van de maximale spinningkrachten bij stijgende diameterreductie is zichtbaar in Figuur 41 [12].



Figuur 41: Maximale spinningkracht i. f. v. de diameterreductie [12]

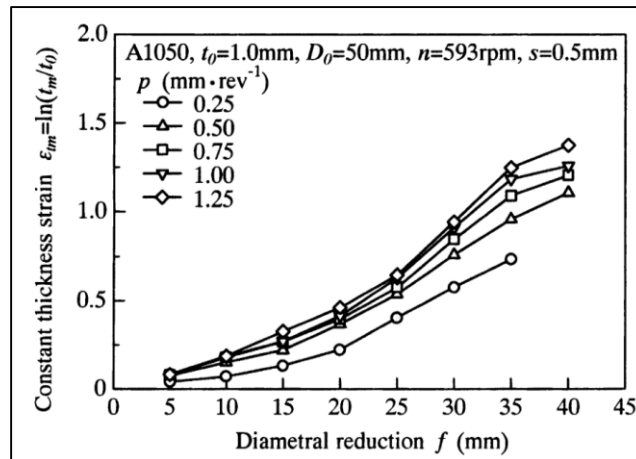
3.3.2 Invloed van de diameterreductie op de rek

De diameterreductie beïnvloedt ook de totale axiale rek na het spinnen. Uit Figuur 42 blijkt dat als de diameterreductie stijgt, de totale axiale rek ook zal stijgen. Dit verloop kan benaderd worden door een rechte. Doordat het uiteinde van de buis vrij is vloeit tijdens het spinnen het materiaal in axiale richting [12].



Figuur 42: Totale axiale rek in functie van de diameterreductie [12]

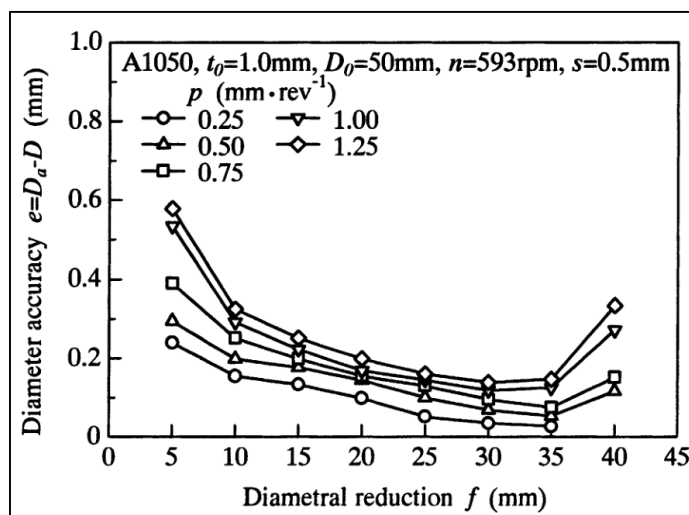
In Figuur 43 is zichtbaar hoe de dikterek vergroot wanneer de diameterreductie stijgt. Bij elke diameterreductie neemt de dikterek ongeveer lineair toe. Dit geldt voor iedere voeding. De voeding is zelfs een versterkende factor want als de voeding stijgt, vergroot de wanddikte nog meer. De verklaring voor het verdikken van de wanddikte van de buis is de grotere radiale component die het contactoppervlak van het gereedschap krijgt. Hierdoor neemt het radiale vervormen van het materiaal toe. Dus evenredig met de grotere radiale component stijgt de wanddikte van de buis [12].



Figuur 43: Diktere k i.f.v. de diameterreductie voor verschillende voedingen [12]

3.3.3 Invloed van de diameterreductie op de diameternauwkeurigheid

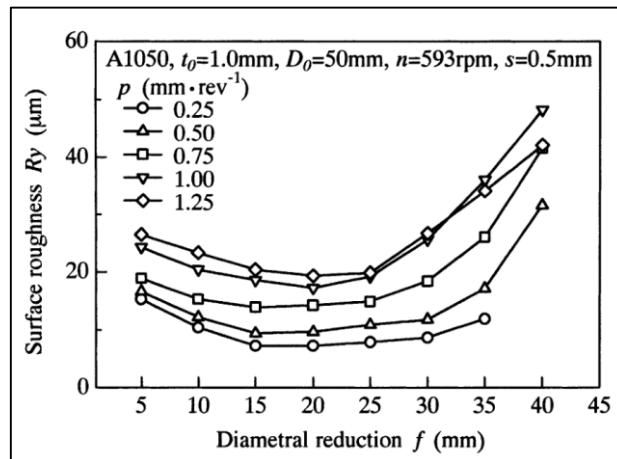
De diameterreductie heeft een invloed op de diameternauwkeurigheid. Dit is zichtbaar in Figuur 44. Als de diameterreductie klein is, zal de onnauwkeurigheid groot zijn omdat de buis relatief flexibel is en geen ronde vorm zal behouden. Als de diameterreductie stijgt, krijgt de buis een grotere stijfheid. Hierdoor treedt er in de buis minder elastische vervorming op door verlies van de ronde vorm en daalt de diameterfout tot een minimale waarde. Maar als de diameterreductie nog stijgt, stijgt de onnauwkeurigheid omwille van vibraties van de machine die sterker worden door de toenemende spinningkrachten [13].



Figuur 44: Diameteronnauwkeurigheid in functie van de diameterreductie [13]

3.3.4 Invloed van de diameterreductie op de oppervlakteruwheid

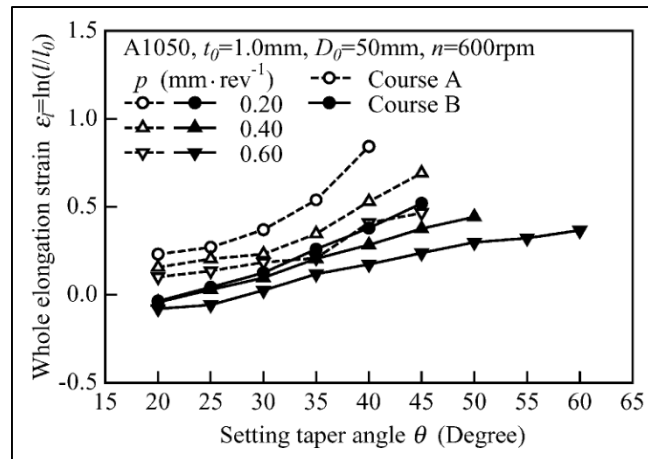
Het spinninggereedschap is een schijf met een cirkelvormige tip. Door met het gereedschap het materiaal te vervormen komen er cirkelvormige indrukkingen op het werkstukoppervlak die op een helicoidale baan liggen. In Figuur 45 is zichtbaar hoe de oppervlakteruwheid bij de testbuis verandert in functie van de diameterreductie voor verschillende voedingen. Bij deze test daalt de oppervlakteruwheid totdat de reductie 20 mm wordt. Hier bereikt de oppervlakteruwheid haar minimum. Deze daling is te verklaren door het verloop van het spinning proces. Als er meer stappen worden gezet zal de diameterreductie stijgen. Doordat het materiaal vervormt zal de weerstand tegen vervorming ook stijgen. Daardoor daalt de diepte van de gereedschapsindrukkingen en daalt dus de oppervlakteruwheid. Als de reductie groter wordt dan 20 mm, dan stijgt de oppervlakteruwheid terug. Dit is te verklaren doordat er meer vibraties gaan optreden en daardoor worden de gereedschapsindrukkingen dieper en stijgt dus de oppervlakteruwheid [12].



Figuur 45: Oppervlakteruwheid in functie van de diameterreductie [12]

3.4 Invloed van de conushoek

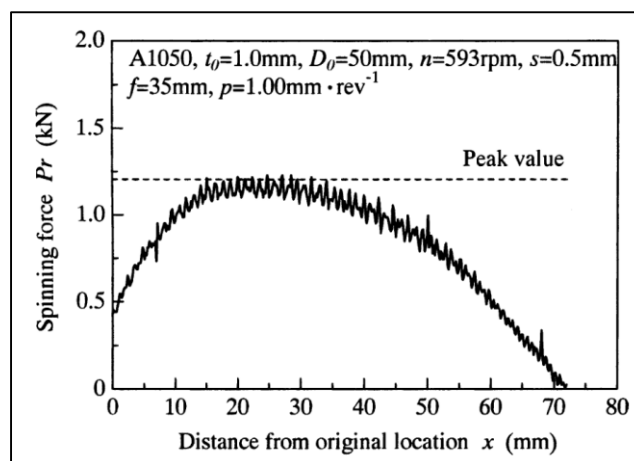
De conushoek heeft invloed op de totale axiale rek. Uit Figuur 46 blijkt dat de totale axiale rek steeds stijgt als de conushoek stijgt. Er zijn nog kleine invloeden van de conushoek maar deze zijn niet zo uitgesproken als het effect op de totale axiale rek [13].



Figuur 46: Totale axiale rek in functie van de conushoek [13]

3.5 Invloed van de wanddikte van de buis

De Figuur 47 geeft aan hoe de spinningkracht verandert bij het spinnen van het cilindrisch gedeelte. Dit krachtenverloop komt overeen met de dikteverandering, zie Figuur 57. Dit is logisch omdat de wanddikte bepaalt hoeveel weerstand er wordt geboden tegen vervorming [12].

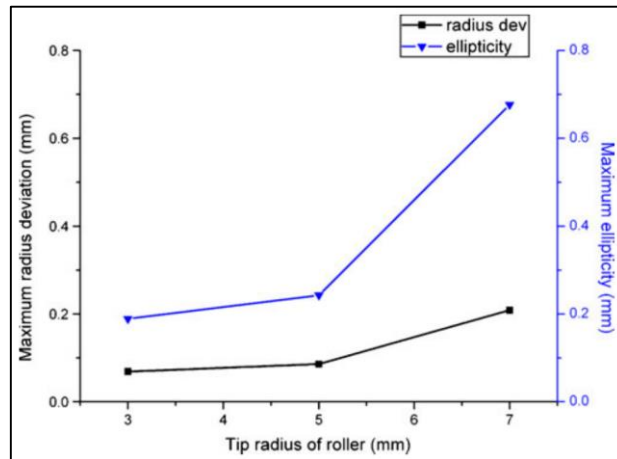


Figuur 47: Spinningkracht t.o.v. de positie op het cilindrisch gedeelte [12]

3.6 Invloed van de gereedschapsgeometrie

Vooral de neusradius van het gereedschap is belangrijk. Uit Figuur 48 blijkt dat als de neusradius stijgt, de diameterafwijking ook stijgt [22].

In de figuur is ook een aanduiding van de ellipticiteit (blauwe lijn) gegeven. Hiermee houden we geen rekening omdat wij slechts werken met één roller en in het artikel waaruit de grafiek komt, worden er twee rollers gebruikt. De gereedschappen zijn bij die test 180° t.o.v. elkaar verschoven [22].



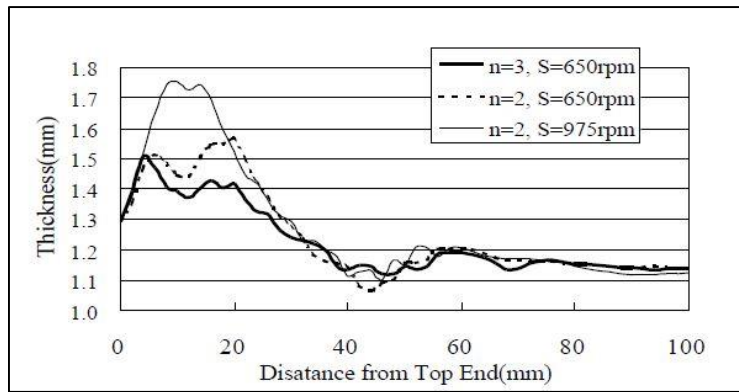
Figuur 48: Diameterafwijking i.f.v. de neusradius van het vervormingsgereedschap [22]

3.7 Invloed van het aantal vervormingsgereedschappen

Het aantal vervormingsgereedschappen heeft invloed op de dikteveranderingen. De testen die zichtbaar zijn in Figuur 49 zijn allemaal uitgevoerd met dezelfde F/S verhouding.

$$\frac{F}{S} = \frac{\text{voedingssnelheid} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right)}{\text{omwentelingssnelheid} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}$$

In Figuur 49 is te zien dat door over te gaan van twee naar drie gereedschappen, de diktevariatie zal verminderen bij een gelijkblijvende F/S verhouding. Hierdoor is het mogelijk om een dunnere plaat te gebruiken en weegt het eindproduct minder [19].



Figuur 49: Wanddikte gerelateerd met het aantal rollers [19]

Door meer gereedschappen te gebruiken vermindert de voeding per gereedschap. Als er dus meer gereedschappen gebruikt worden kan de voeding verhoogd worden zodat de voeding per gereedschap constant gehouden wordt. Toch moet er opgelet worden bij het verhogen van de vervormingssnelheid, omdat dit zorgt voor grote verdikkingen [19].

Uit Figuur 49 is ook af te lezen dat de diktevariatie verandert als het toerental stijgt. Dit kan belangrijk zijn in gevallen waar de wanddikte kritisch is.

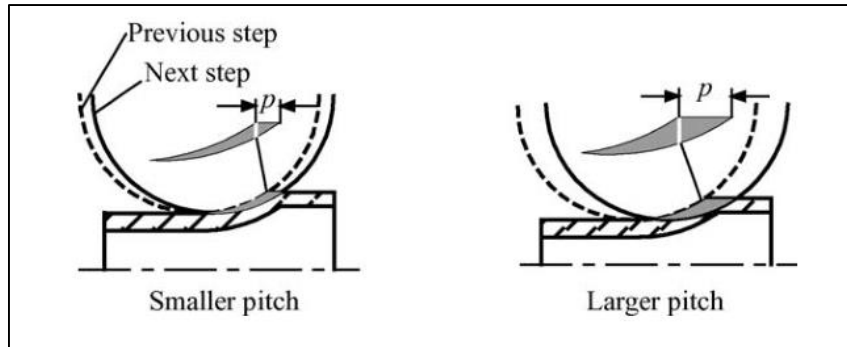
Empirisch is bepaald dat de dikteverandering afhankelijk is van het R verhoudingsgetal [23].

$$R = \frac{F}{n \cdot S} = \frac{\text{voedingssnelheid} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right)}{\text{aantal gereedschappen} \cdot \text{omwentelingssnelheid} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)} [19]$$

Als de R-verhouding stijgt, dan stijgt ook de verdikking. Dit is een eenvoudig verband. Vanuit het oogpunt van dikte moet lijkt het logisch om een zo groot mogelijke R te kiezen. Toch moet er opgelet worden bij het gebruik van deze formule. Want een overmatig grote R veroorzaakt knikken van de buis en een te lage R veroorzaakt scheuren. De R-verhouding moet dus nauwkeurig gekozen worden tussen deze twee grenzen bij een correct spinningproces [19].

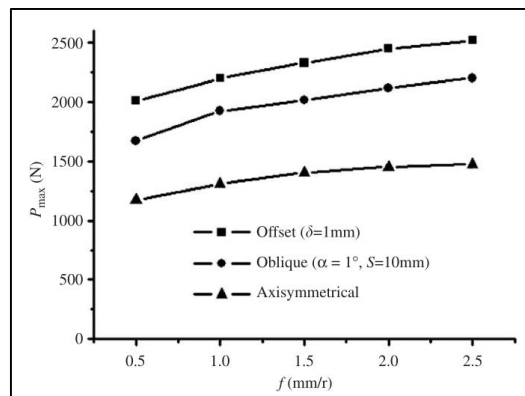
3.8 Invloeden van de voedingsnelheden

De axiale voeding bepaalt hoe het contactoppervlak tussen de roller en werkstuk eruit ziet [13]. Het effect van een toename in axiale voeding is te zien in Figuur 50.



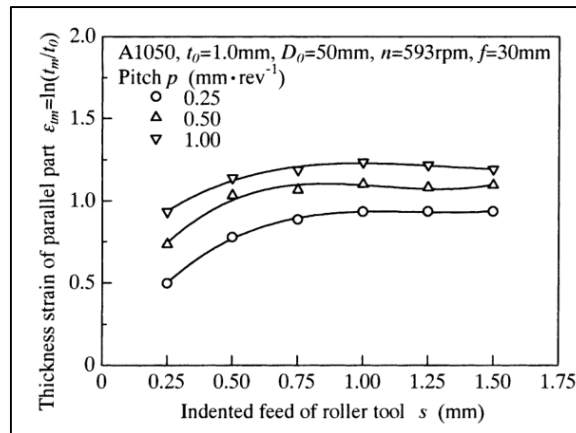
Figuur 50: Invloed van de axiale voeding op het ingedrukte oppervlak [13]

Uit Figuur 51 blijkt dat als de axiale voedingsnelheid stijgt, de maximale spinningkracht die wordt uitgeoefend op de gereedschapshouder stijgt. De verklaring hiervoor is te vinden bij de gereedschapsbeweging, deze vormt een spiraal. Als de axiale voeding klein is, dan zal er veel overlap zijn tussen vervormde en nog niet vervormde buis. Als de axiale voeding stijgt, dan zal de overlap kleiner worden en dus per pas meer materiaal vervormd worden. Hierdoor worden de spinningkrachten groter [10].



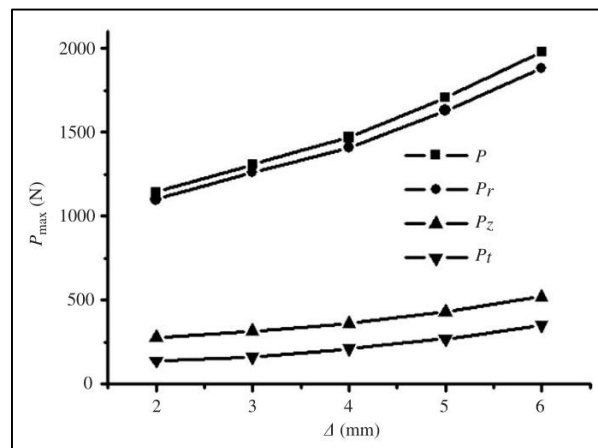
Figuur 51: Maximale spinningkracht in functie van de axiale voeding [10]

De radiale voeding beïnvloedt de wanddikte van het parallelle deel. Als de radiale voeding stijgt tot ongeveer 1 mm, dan stijgt ook de dikterek. Wanneer de radiale voeding groter wordt als 1 mm dan blijft de dikterek ongeveer constant. Dit is zichtbaar in Figuur 52 [24].



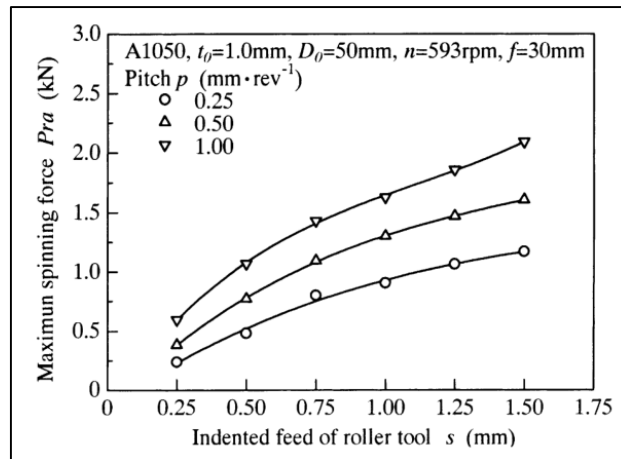
Figuur 52: Diktere ϵ_{th} in functie van de radiale voeding s [24]

Als de radiale indrukking Δ stijgt zullen alle componenten van de spinningkrachten groter worden. Dit is te zien in Figuur 53. De verklaring hiervoor is dat bij stijgende radiale indrukking Δ de plastische vervorming stijgt en dus ook de spinningkrachten [10].



Figuur 53: Maximale spinningkrachten P i.f.v. de radiale voeding Δ [10]

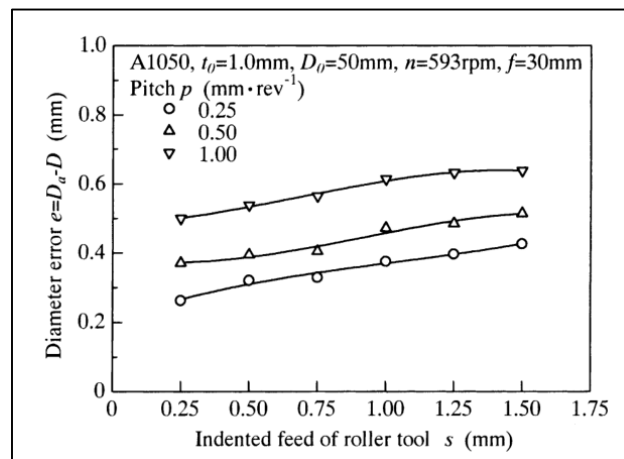
In Figuur 54 staat aangegeven hoe de maximale spinningkracht stijgt in functie van de radiale indrukking. Als de radiale indrukking vergroot zal de buis meer gaan vervormen. Door de vervorming wordt de wanddikte van het parallelle gedeelte groter. Dit zorgt ervoor dat het materiaal meer weerstand biedt tegen vervorming [24].



Figuur 54: Maximale spinningkracht in functie van de radiale voeding [24]

Daarnaast beïnvloedt zowel de radiale indrukking en axiale voeding de diameterafwijking. Dit is zichtbaar in Figuur 55. Als de radiale indrukking groter wordt, stijgt ook de diameterafwijking. Dit komt doordat als de indrukking vergroot, dan zal de radiale vervorming en spinningkrachten ook groter worden. Hierdoor stijgt ook de elastische terugvering van het materiaal en stijgt de diameterafwijking [24].

Een andere conclusie uit Figuur 55 is dat door stijging van de axiale voeding, de diameterfout ook zal stijgen. De verklaring hiervoor is dezelfde als hierboven, namelijk dat door stijging van de axiale voeding, de hoeveelheid vervorming ook stijgt. Hierdoor stijgt de elastische terugvering en stijgt de diameterafwijking [24].



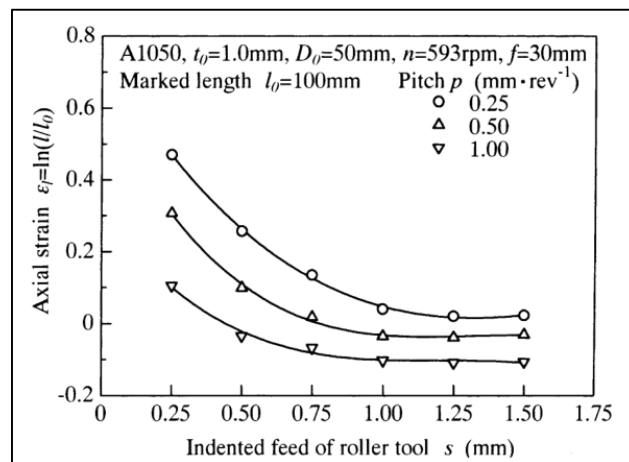
Figuur 55: Diameterafwijking in functie van de radiale indrukking voor verschillende waarden van axiale voeding [24]

De radiale indrukking en axiale voeding veroorzaken ook een verschil in axiale rek. Dit is zichtbaar in Figuur 56. Tot ongeveer een radiale indrukking van 1 mm daalt de axiale rek. Als de radiale indrukking nog verder stijgt, blijft de axiale rek ongeveer constant. Dit komt overeen met de stijgende trend van dikterek. Als de dikterek stijgt, dan daalt de axiale rek zodat het volume constant blijft [21]. Want bij plastische vervorming is er geen volumeverandering:

$$\varepsilon_l + \varepsilon_b + \varepsilon_d = 0$$

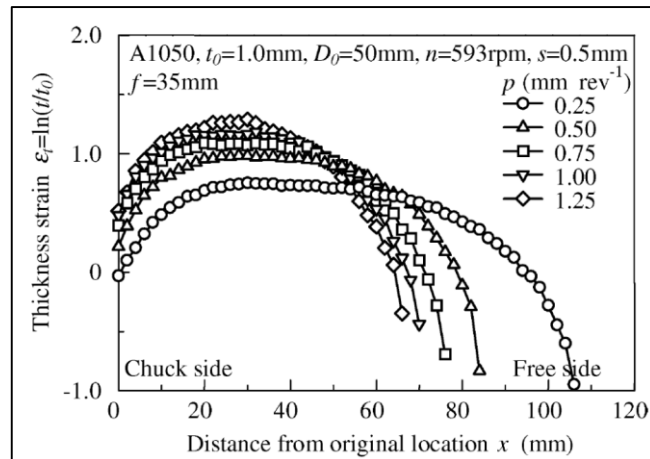
Hierbij is ε_l de lengterek, ε_b de breedterek en ε_d de dikterek.

Dus als de axiale rek daalt, dan stijgt de dikterek evenredig zodat de gelijkheid blijft gelden [24].



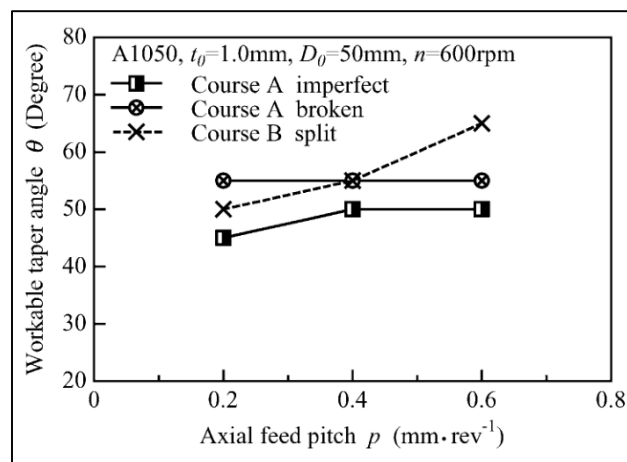
Figuur 56: Axiale rek i.f.v. radiale indrukking [24]

De axiale voeding beïnvloedt zowel de axiale verlenging van de buis als de dikterek. Dit is zichtbaar in Figuur 57. Als de axiale voeding stijgt, dan is er meer verdikking en dus minder verlenging. Bij een kleine voeding verlengt de buis dus sterk en verdikt weinig. Ook is er op het begin van het cilindrisch gedeelte minder verdikking. Dit is te verklaren doordat het gereedschap op deze plaats een radiale voedingsbeweging maakt en daardoor wordt er veel axiale spanningen opgewekt. Hierdoor zal het materiaal axiaal vloeien en de wanddikte verminderen. Aan het vrije uiteinde is er verdunning. Dit is te verklaren doordat er hier gemakkelijk axiale vloeï optreedt en dus eenvoudig de wanddikte verminderd [12].



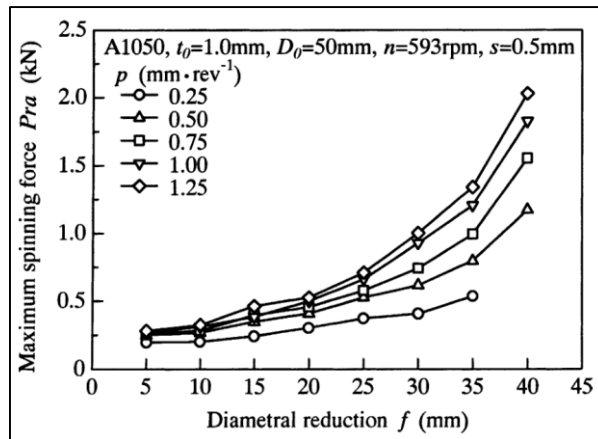
Figuur 57: Dikterek in functie van de afstand, gemeten van de conus richting het vrije uiteinde [12]

In Figuur 58 staat op de horizontale as de axiale voeding en op de verticale as de conushoek. Op de figuur zijn de vervormingslimieten af te lezen afhankelijk van de conushoek en axiale voeding. Het materiaal faalt anders bij een andere gereedschapsbaan. Bijvoorbeeld, bij gereedschapsbaan vorm A is er weinig invloed van de conushoek op het falen. Ook is af te lezen welke de invloed is van de axiale voeding op de imperfecties. Als de axiale voeding stijgt, dan kan de conushoek ook stijgen. Bij gereedschapsbaan B is er veel invloed van de axiale voeding op de maximale conushoek. Als de axiale voeding stijgt, dan kan de conushoek ook groter worden [13].



Figuur 58: Enkele faalcriteria in functie van de conushoek en axiale voeding [13]

Uit Figuur 59 is af te lezen dat de maximale spinningkracht stijgt als de axiale voeding stijgt. Dit komt doordat het oppervlak waartegen het gereedschap drukt groter wordt bij stijgende voeding [12].



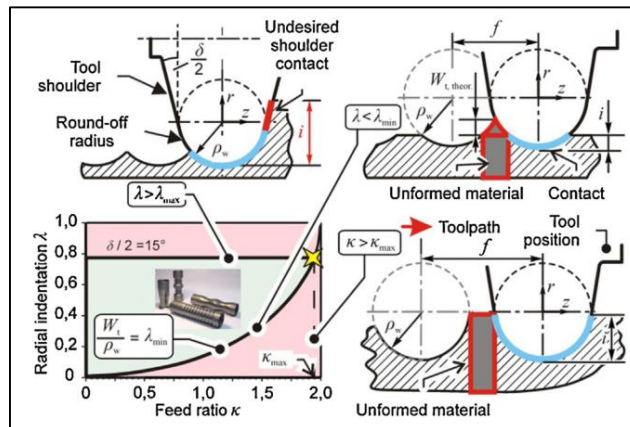
Figuur 59: Maximale spinningkracht in functie van de diameterreductie [12]

Er is een maximum axiale en radiale voedingssnelheid. Deze zijn af te lezen in het procesdiagram in Figuur 60. Wanneer het proces zich in het roze gebied in de grafiek bevindt, ontstaan er fouten. Het moet vermeden worden dat in dit gebied wordt gewerkt zodat dat de oppervlakteruwheid voldoende klein blijft en er geen variërende wanddiktes ontstaan. De horizontale lijn in de grafiek geeft de maximale radiale voeding aan. Als er over deze grens wordt gegaan dan vervormt het gereedschap niet enkel met de tip maar ook met de zijkant van het gereedschap. Daarnaast geeft de horizontale as aan hoe groot de genormaliseerde voeding κ kan zijn. In de onderstaande formule staat de formule om de genormaliseerde voeding te berekenen [21].

$$\kappa = \frac{f}{\rho_{\text{gereedschap}}} [21]$$

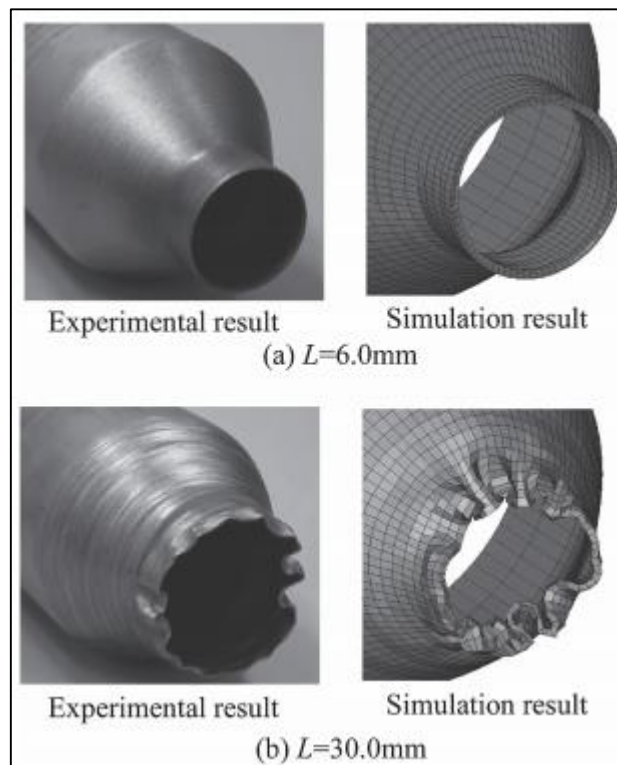
Hierbij is κ de genormaliseerde voeding, f de axiale voeding en $\rho_{\text{gereedschap}}$ de diameter van de tip van het vervormingsgereedschap.

Als de genormaliseerde voeding te groot wordt, dan zal de afstand tussen twee opeenvolgende gereedschapsindrukkingen te groot worden en zal er een stuk materiaal niet vervormd worden. Hierdoor ontstaan ongelijke wanddiktes, dit moet te allen tijde vermeden worden [21].



Figuur 60: Procesvenster voor axiale en radiale voeding bij spinning [21]

De axiale- en radiale voeding hebben ook een belangrijke invloed op het scheuren en rimpelen van de buis. Dit wordt duidelijk gemaakt aan de hand van Figuur 61. Op deze figuur staan buizen afgebeeld na het spinformingproces. Het verschil tussen beide buizen is de grootte van de axiale voeding, deze voeding heeft dus duidelijk invloed op de defecten. In Figuur 32(a) is een buis weergegeven die is vormgegeven met een radiale aanzet van 2,4 mm en een axiale aanzet van 6 mm terwijl Figuur 32(b) vormgegeven is met een radiale aanzet van 2,4 mm en een axiale aanzet 30 mm. De axiale voeding bij buis (b) is dus groter dan bij buis (a). Bij buis (b) valt het op dat het uiteinde van de buis gerimpeld is. Dit geeft dus weer dat de axiale voeding een grote invloed heeft op de vorming en voorkoming van defecten [4].

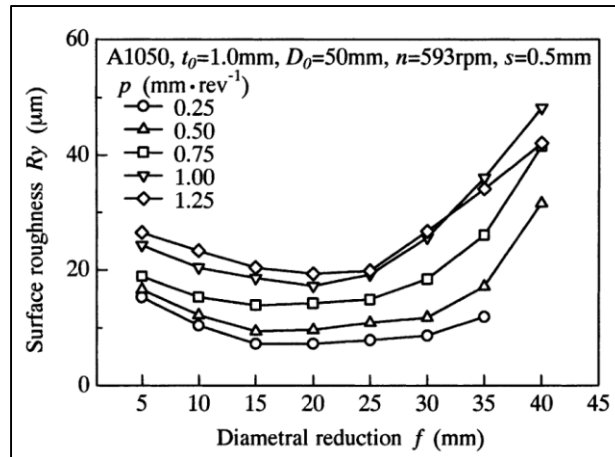


Figuur 61 rimpeling

In het artikel van Takahashi [4] wordt er besloten dat de reductie van de wanddikte toeneemt wanneer de axiale aanzet laag en de radiale aanzet hoog is. Dit is nadelig omdat het scheuren veroorzaakt. Wanneer de axiale voedingssnelheid en de radiale aanzet verhoogd worden, treedt er rimpeling op aan het conusvormige deel.

3.8.1 Invloed van de voedingen op de oppervlakenauwkeurigheid

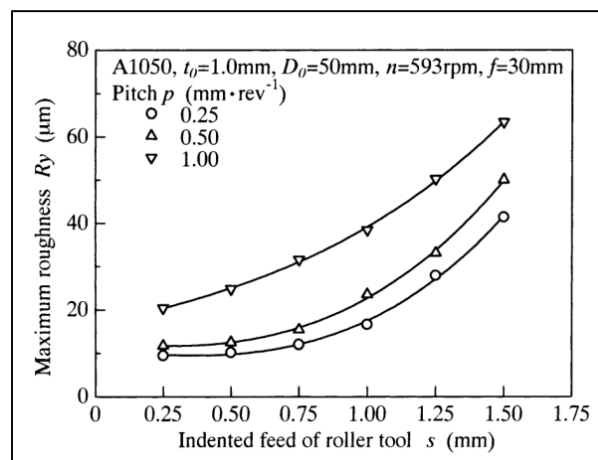
De axiale voeding heeft een invloed op de oppervlakteruwheid. Dit blijkt uit Figuur 62. Wanneer de axiale voeding stijgt, stijgt de oppervlakteruwheid omdat de afstand tussen de gereedschapsindrukkingen stijgt en de diepte van de indrukkingen ook groter wordt [12].



Figuur 62: Oppervlakteruwheid in functie van de diameterreductie [12]

In een andere studie is de relatie tussen oppervlakenauwkeurigheid en de radiale en axiale voeding onderzocht. Dit is zichtbaar in Figuur 63. Als de radiale indrukking stijgt, dan stijgt ook de maximale oppervlakteruwheid. Dit gebeurt omdat de spinningkrachten stijgen, vervolgens nemen de vibraties op de buis toe en worden de cirkelvormige indrukkingen van het gereedschap groter en stijgt dus de oppervlakteruwheid.

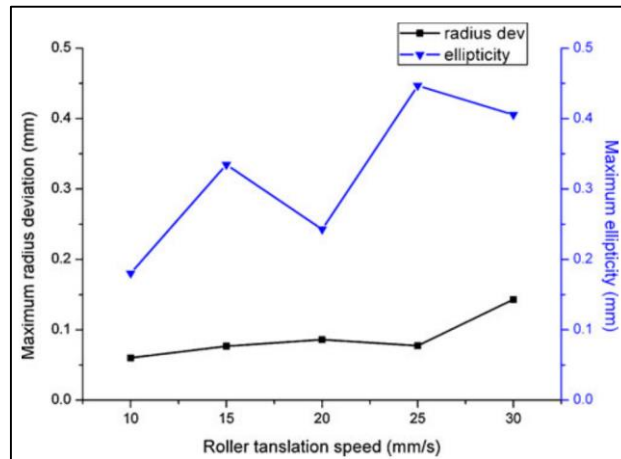
De ruwheid van de buis stijgt ook als de axiale voeding groter wordt. Door een grotere voeding stijgt de tussenafstand tussen twee gereedschapsindrukkingen, ook de diepte ervan neemt toe. Hierdoor stijgt de ruwheid van de buis [24].



Figuur 63: Maximale oppervlakteruwheid in functie van de radiale indrukking voor enkele waarden van axiale voeding [24]

De axiale voeding heeft een belangrijke invloed op de dikterek bij het spinnen van buizen. In Figuur 52 is te zien hoe de dikterek verandert in functie van de axiale voeding. Als de axiale voeding groter wordt, verdikt de buiswand. De verklaring hiervoor is dat wanneer de axiale voeding groter wordt, het contactoppervlak tussen het gereedschap en de buis groter wordt. Hierdoor stijgt de hoeveelheid vervormd materiaal per beweging, dus stijgt de dikterek [24].

Uit Figuur 64 blijkt dat als de axiale voeding stijgt, de diameteron nauwkeurigheid globaal gezien licht stijgt [22].



Figuur 64: Maximale diameteron nauwkeurigheid in functie van de axiale voedingssnelheid (zwarte lijn) [22]

Uit Figuur 64 is af te lezen dat de een verhoging van de axiale voedingssnelheid meestal minder negatieve dikterek tot gevolg heeft. Dit wil zeggen dat er bij verhoging van axiale voedingssnelheid, meestal minder verdunning zal plaatsvinden. Als er dus geen verdunning gewenst is blijkt dat de axiale voeding groot moet zijn [13].

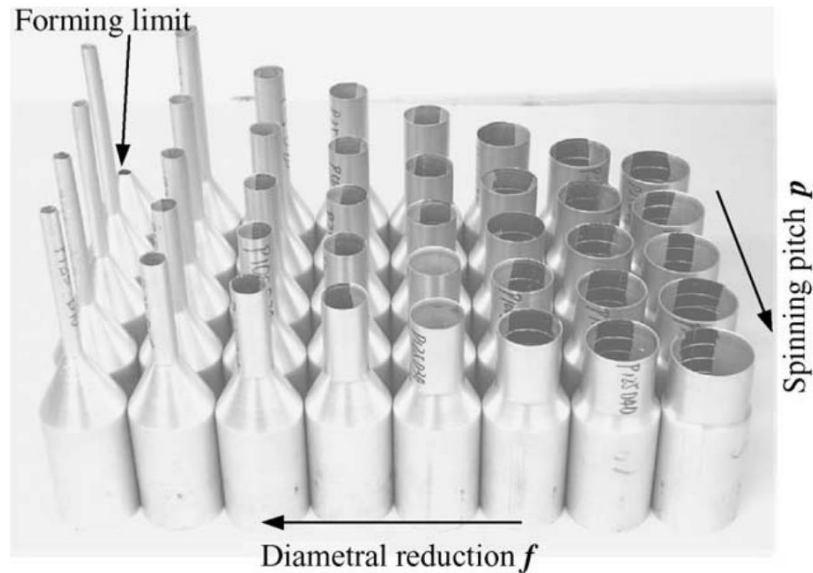
3.9 Samenvatting invloed parameters

Er zijn veel invloed parameters die elk het proces beïnvloeden. In een experimentele studie is het bijna onmogelijk om de invloed van iedere parameter apart te testen omdat hiervoor veel testen nodig zijn. Daarom hebben we een selectie gemaakt van de belangrijkste parameters die gaan getest worden.

De te onderzoeken parameters zijn diameterreductie, conushoek, wanddikte van de buis en de materiaalkeuze. Om een duidelijke afbakening van het onderzoeksgebied te verkrijgen heeft Bosal voor iedere parameter een boven- en ondergrens gegeven.

3.10 Overzicht van enkele invloedsparameters

In Figuur 65 is zichtbaar hoe de verlenging van de buis beïnvloedt wordt door de diameterreductie en axiale voedingssnelheid. Als de diameterreductie stijgt, dan zal de verlenging groter worden. Als de voedingssnelheid stijgt verlengt de buis minder. Als het rechte gereduceerde gedeelte te lang en te dun is, wordt het proceslimiet bereikt. Dit is zichtbaar linksboven op de afbeelding [12].



Figuur 65: Buizen die vervormd zijn door rotatiesymmetrisch spinnen; het materiaal is een aluminiumlegering [12]

4 Uitvoering van de testen

4.1 Fabriceren van de buizen uit plaatmateriaal

4.1.1 Plaatmateriaal lasersnijden

Eerst wordt het plaatmateriaal laser gesneden op de correcte afmetingen. Deze afmetingen werden bepaald op basis van de conushoek en buisdiameter. De buisdiameter bepaalt de plaatbreedte en de conushoek heeft invloed op de lengte.

Er zijn enkele buizen te veel gemaakt, deze dienen als test om het rol- en lasproces te optimaliseren. Hierdoor worden er mogelijk enkele slechte buizen gemaakt. Maar daardoor is er meer kans dat de kwaliteit goed is bij de definitieve buizen.

4.1.2 Rollen

De buizen zijn gerold met een 4 rollen CNC-platenrolmachine. De rollen van deze machine worden automatisch op de juiste snelheid en positie ingesteld. Om een correcte buis te rollen moeten de machineparameters juist ingesteld worden. Dit kan deze machine zelf “leren”. Door enkele platen te gebruiken als test, berekent de machine zelf welk materiaal er gebruikt wordt en hoe de rollen moeten bewegen voor een juist eindproduct te produceren. Echter hebben we geen gebruik kunnen maken van deze functie omdat onze oplage te klein was.



Figuur 66: Foto van de CNC platenrolmachine

4.1.3 Zagen van de gelaste buizen op de correcte lengte

De gelaste buizen zijn 570 mm lang en worden in drie delen gezaagd. Hierdoor ontstaan er buizen met een lengte van 190 mm, dit is de juiste lengte voor de spinformingtesten. Eerst werd een lintzaagmachine gebruikt. Dit ging snel maar de zaagsnede was niet recht en had een golvend profiel. Daarom werd een andere machine gezocht die snede loodrecht rond een aslijn kan maken. Deze volledig rechte zaagsnede is belangrijk bij het opvullen van de buizen met de dummykatalysator. Indien er een schuine zaagsnede is, stropt de mat die rond de dummykatalysator zit op en komt zo op de foute plaats te zitten. Dit moet vermeden worden.

Op de Figuur 67 is het gereedschap zichtbaar die een buis recht kan doorsnijden. Deze machine werkt als volgt:

1. Eerst wordt de diameter van de buis ingesteld met een regelschroef
2. Vervolgens wordt de buis geklemd
3. Daarna wordt de machine aangezet, het zaagblad begint te draaien
4. Dan wordt de zaaginrichting manueel in uurwijzerzin rond de buis bewogen. Gedurende deze beweging is de zaag aan het snijden.
5. Als het gereedschap zich terug in de beginpositie bevindt, is de zaagbewerking voltooid
6. Nu wordt de machine uitgezet.

Er zijn enkele moeilijkheden geweest bij het zagen. Een eerste probleem is dat de zaag “hapt” in de buizen. Dit wil zeggen dat een zaagtand opeens sterk ingrijpt in de buis zonder te snijden. Hierdoor vervormt de buis aan de zaagsnede en wordt deze gekreukt. Daarnaast komt er een grote terugslag op het gereedschap, dit zorgt voor trillingen in de opspanning en laat de buis glijden door zijn opspanning, hierdoor ontstaan krassen en deuken. Dit happen van de zaag is het sterkst kortbij de las. De conclusie hieruit is dat de materiaaleigenschappen lokaal sterk veranderd zijn door het lassen. Hier wordt rekening me gehouden bij de evaluatie van het spinformingproces.

Een tweede probleem is dat de kleminrichting normaal gezien voor een specifieke buisdiameter wordt ontworpen. Omdat de diameter van onze testbuizen niet overeenkomt met de diameter van de aanwezige kleminrichting, is er gebruik gemaakt van een universele kleminrichting. Het nadeel van deze universele kleminrichting is dat de buis slechts in vier punten vastgegrepen wordt i.p.v. over de hele omtrek bij een juist passende kleminrichting. Een gevolg van deze slechtere inklemming is vooral zichtbaar bij dunwandige buizen. Omdat de zaagbewerking een stevige inklemming vereist, moet er veel kracht gezet worden op de kleminrichting. Hierdoor zijn enkele dunwandige buizen lokaal vervormd. Het “happen” van de zaag is sterker bij de universele kleminrichting omdat de buis minder goed is ingeklemd.



Figuur 67: Zaaggereedschap om buizen recht door te snijden

4.1.4 Dummykatalysator

Om de testen zo nauw mogelijk te laten aansluiten bij het werkelijke vervormingsproces is het noodzakelijk om een dummykatalysator (kern) toe te voegen. Deze kern heeft zorgt voor een betere inklemming van de buis in de draaibank.

Er zijn verschillende materialen onderzocht om de kern uit te maken. De mogelijke materialen waren staal, aluminium en kunststof. Er werd niet gekozen voor de stalen kern omdat deze te zwaar is. Aluminium is nog te zwaar en het is relatief duur. De beste keuze is een kunststofkern omdat de massadichtheid van dit materiaal goed overeenkomt met de werkelijkheid. Ook is deze kern herbruikbaar, relatief goedkoop en makkelijk te bewerken. Rond deze dummy katalysator is een mat geplaatst. Deze mat wordt in de volgende paragraaf besproken.

4.1.5 Mat

De matten in Figuur 68 worden rond de katalysator geplaatst, deze matten zijn gemaakt van samendrukbaar materiaal. Dit is nodig omdat de katalysator niet altijd 100% even groot is en de buis waarin deze katalysator geplaatst wordt is ook niet altijd even groot. Vandaar dat er rond de katalysator deze mat wordt geplaatst zodat deze eventueel samengeperst kan worden wanneer er een afwijking in de afmetingen van de katalysator en buis plaatsvindt.



Figuur 68: Matten voor rond de katalysator

4.1.6 Opvullen van de testbuizen

De buizen die op correcte lengte gezaagd werden, worden eerst ontbraamd. Daarna wordt de op maat gesneden mat rond de dummykatalysator geplaatst. De kern met mat wordt vervolgens in een conusvormige mal gestoken. Deze stap is zichtbaar in Figuur 69. Vervolgens wordt dit inzetstuk op onder een pers geplaatst die de kern en mat in de testbuis duwt. De Figuur 70 is een foto die genomen werd bij het inpersen.



Figuur 69: Dummykatalysator met mat in het conusvormig geleidingshulpstuk

Een probleem dat optrad tijdens het inpersen is dat de blok gleeft t.o.v. de mat. Dit probleem werd opgelost door de mantel van de blok te bekleden met papiertape. Hierdoor verhoogt de wrijving tussen de mat en blok en bewegen ze steeds tezamen.



Figuur 70: Pers tijdens het inpersen van een dummykatalysator en mat in een testbuis

4.1.7 Lassen bij Schnelldorfer-Maschinenbau

Op woensdag 4 maart 2015 zijn de heer Reeskens, Michael en Michiel naar Schnelldorfer-Maschinenbau gegaan. Schnelldorfer-Maschinenbau is een bedrijf dat automatische lasapparaten ontwerpt en verkoopt. Het was mogelijk om de buizen daar te gaan lassen. Onze contactpersoon is de heer Gerber, hij is de verkoper maar weet ook zeer veel van de technische kant van de machines. Hij heeft ons ontvangen, uitleg gegeven en geholpen met het instellen van de correcte parameters op de machine. Er waren twee machines ter beschikking, een laserlasmachine en een TIG-lasmachine.

Voordat we begonnen met lassen, werden eerst alle buizen gelabeld zodat de buizen verdeeld werden over de twee lasprocessen. Vervolgens werd het laserlasproces opgestart. Van elke las op de laserlasmachine werden de volgende gegevens genoteerd: materiaal, vermogen en voedingssnelheid. Toen het laserlasproces opgestart was, konden we ook starten met het lassen op de TIG-lasmachine. De machineparameters van het TIG-lasproces zijn steeds op de buizen zelf geschreven. Op het einde van de testen werden er foto's gemaakt van de overige machine-instellingen.

4.1.8 Laserlassen

“Laserlassen is een verbindingstechniek waarbij met behulp van een laserbundel de te verbinden onderdelen tot smelten worden gebracht. Een sterke verbinding, die in het algemeen geen nabewerking vereist, is het gevolg.” [25]

Volgens Benneker en Gales [25] is het laserlassen voor plaat en pijp sneller dan conventionele lastechnieken zoals TIG en MIG. Ook is laserlassen nauwkeuriger en is de warmte beïnvloede zone kleiner. Dit heeft als voordeel dat er weinig vervorming optreedt. De afwerking van een laserlas is zeer goed, er is meestal geen afwerkingsstap nodig zoals slijpen of polijsten. Toch zijn er ook nadelen aan het laserlassen. Zo moeten de te verbinden onderdelen een kleine tolerantie hebben. Hierdoor zijn de lasmatten ook aan nauwe toleranties onderworpen.

Het principe van de werking van de laserlasmachine is eenvoudig. In een bron worden infrarode stralen opgewekt. Deze worden via een glasvezelkabel naar de laskop geleid. Hier worden de stralen gefocust op in een klein oppervlak. Doordat er veel energie geconcentreerd wordt op een klein oppervlak, ontstaat er een grote lokale warmtetoevoer. Hierdoor smelt het materiaal. Meestal wordt laserlassen uitgevoerd zonder toevoegmateriaal. Toch kan bij het laserlassen een koude-draad toevoer worden gebruikt. Hierdoor kunnen de productietoleranties verruimd worden doordat de lasvoeg gevuld wordt. Anderzijds kan toevoegmateriaal de materiaalkundige eigenschappen verbeteren. Ze kunnen bijvoorbeeld de scheurgevoeligheid verlagen. [25]

De laserlasmachine bestaat uit verschillende onderdelen namelijk laserlaskop, laserbron, klemmechanisme voor de werkstukken, bedieningspaneel en slede. De laserbron wordt gekoppeld met de laserlaskop met behulp van een glasvezelkabel. Aan het gebruik van glasvezelkabel zijn enkele voordelen gebonden. Zo is het mogelijk om de laserbron apart van de lasinstallatie te plaatsen, dus bijvoorbeeld in een andere ruimte. Ook is het mogelijk om het vermogen van een bron te splitsen over meerdere installaties of om meerdere bronnen te gebruiken bij één lasproces om een groter vermogen te kunnen afleveren.

Op Figuur 71 en Figuur 72 is de laserlasmachine zichtbaar.



Figuur 71: Laserlasinstallatie



Figuur 72: Laserlaskop gemonteerd op de slede

De focus van de laserbron is een belangrijke parameter. Een goede focus is belangrijk bij het lassen van dunne materialen met hoge lassnelheden. Daarnaast is een goede focus nodig zodat de energie op de juiste plaats wordt geconcentreerd wordt en dus zorgt voor een hogere intensiteit. Hierdoor kan het vermogen van de laserbron lager zijn. Maar ook bij het lassen van dikke materialen is een goede focus belangrijk, omdat de werkafstand tussen kop en werkstuk hierdoor kan vergroten. [25]

Bij het lassen bij Schnelldorfer-Maschinenbau werd de focus bij verschillende wanddiktes anders ingesteld. De heer Gerber stelde de focus diffuser in bij het materiaal met een wanddikte van 1,5 mm (dikste plaat). Hierdoor werd de lasnaad iets breder maar was het lassen wel mogelijk, want de laserbron had maar een beperkt vermogen.

Er zijn nog 50 buizen bijgemaakt. Deze werden gelast mbv de laserlasmachine. Deze keer had de machine een vermogen van 2000 W. Hierdoor kon de focus beter ingesteld worden en is de laskwaliteit veel beter. Dit is zichtbaar geworden bij de spinformingtesten. De lasergelaste buizen van die bijbesteld werden, zijn niet vaak gescheurd op de lasnaad.

4.1.9 TIG-lasproces

Het TIG-lasproces is een elektrisch booglasproces met een open boog tussen een niet-afsmeltende elektrode en het werkstuk, waarbij het smeltbad en elektrode worden beschermd door een inert gas of gasmengsel. De naam TIG is een afkomstig van de Engelse afkorting Tungsten Inert Gas (tungsten = wolfram). De inerte gassen die in hoofdzaak gebruikt worden zijn Argon en in sommige gevallen Helium. Ook worden er soms mengsels van beide gassen gebruikt.

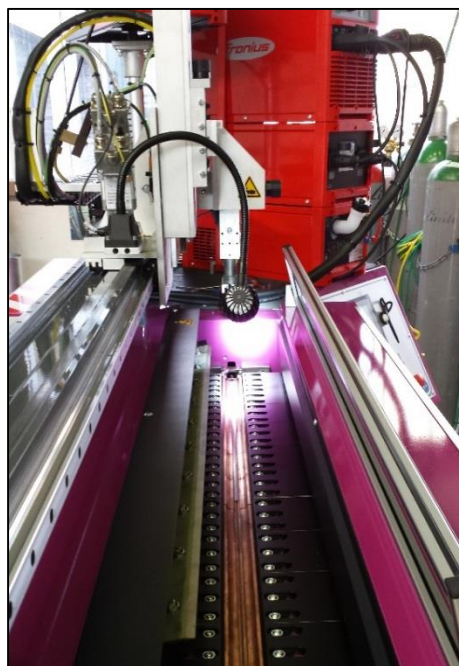
Soms komt het ook voor dat kleine hoeveelheden andere niet-inerte gassen worden toegevoegd.

Vaak wordt het proces uitgevoerd als een handlasproces waarbij de lastoorts met de ene hand wordt voortbewogen. Met de andere hand kan eventueel het lastoevoegmateriaal worden aangevoerd. Ook kan het proces uitstekend geautomatiseerd worden.

Dergelijke automatische lasprocessen worden vaak toegepast bij massafabricage, hierbij worden er hoge eisen gesteld ten aanzien van kwaliteit en reproduceerbaarheid. In Figuur 73 en in Figuur 74 is de TIG-lasmachine zichtbaar die gebruikt werd bij Schnelldorfer-Maschinenbau.



Figuur 73 TIG lasmachine



Figuur 74 TIG-lasmachine (klemmen)

4.1.10 Kenmerken van het TIG-lasproces in vergelijking met andere processen

Het TIG-lasproces onderscheidt zich van vele andere smeltlasprocessen door:

- Een lasboog van zeer hoge temperatuur (ca. 14.000°C) en warmtedichtheid (10 W/mm²) te bezitten;
- Het ontbreken van slakvormige smeltbadbescherming, waardoor steeds een goed zicht op het smeltbad mogelijk is en slakinsluitingen tot hoge uitzondering behoren;
- Grote flexibiliteit door het niet aan de boog gekoppelde toevoer van lastoevoegmateriaal;
- Grotere mogelijkheid tot optimale aanpassing aan de lasopgave door variatie in de procesparameters als type beschermgas, stroomsoort, polariteit...;
- De zeer goede mogelijkheid tot automatiseren met nauwkeurige controlemogelijkheden voor alle procesgegevens;
- Geen verontreinig van werkplaats en werkstuk door spatten, slakdelen of rook.

In het algemeen wordt het proces toegepast indien andere booglasprocessen op grond van de dikte van het werkstuk en/of de materiaalsoort niet toepasbaar zijn. Globaal is TIG-lassen toepasbaar voor dikten beneden 6 mm en aan de meer edele en/of sterk reactieve en/of hoogsmeltende materialen.

Het doel van een beschermgas is het op hoge temperatuur gebrachte werkstukmateriaal, het smeltbad en de wolfram-elektrode te beschermen tegen verbranding door de zuurstof die aanwezig is in de atmosfeer af te schermen. Daarnaast verhindert het beschermgas de opname van stikstof uit de atmosfeer.

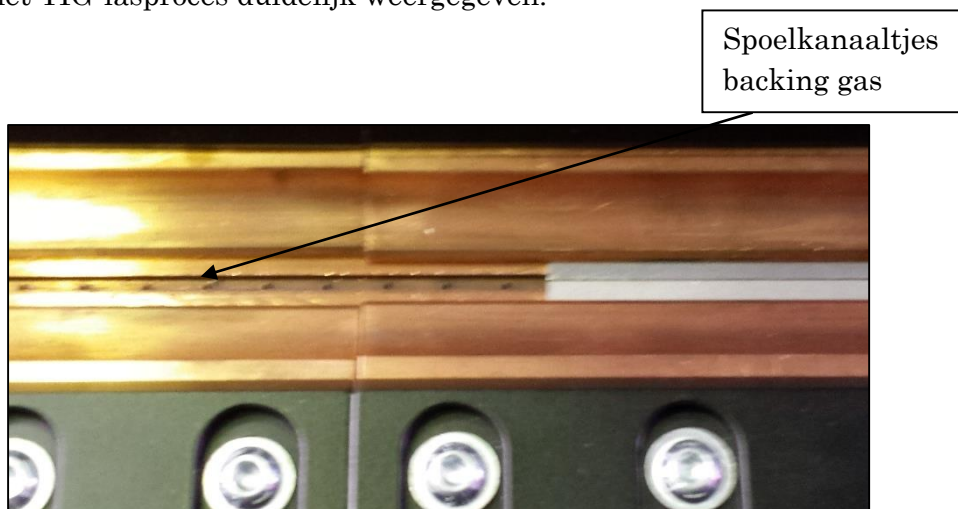
Bij het TIG lassen hebben is er de keuze uit twee inerte gassen ofwel edelgassen, namelijk argon en helium. Een vergelijking tussen de twee edelgassen is te vinden in Tabel 1.

Tabel 1: Vergelijking van argon en helium als beschermgas bij TIG-lassen

Argon	Helium
Relatief goedkoop	Relatief duur
Dichtheid 1,783 kg/m ³	Dichtheid 0,178 kg/m ³
Ca. 1,4 maal zwaarder dan	Ca. 7 maal lichter dan lucht
Betere bescherming	
Relatief lage ontsteekspanning	Relatief hoge ontsteekspanning
Rustige stabiel boog	Onstabiele boog
Lage boogspanning	Hogere boogspanning

Ook voegt men ter verkrijging van een hogere boogtemperatuur tot maximaal 10% waterstof aan argon toe. Daarnaast verlaagt waterstof in sterke mate de oppervlaktespanning en de viscositeit van het smeltbad. Argon-waterstofmengsels geven dan vaak een gladder lasuiterlijk en een geringere kans op poreusheid door de betere ontgassingsmogelijkheden van het smeltbad. Dit was het ook geval bij de machines Schneldorfer Maschinenbau voor het lassen van de buizen [26].

Aan de achterzijde wordt er vaak argon toegevoegd, dit wordt ook wel het *backing-gas* genoemd. Dit is voor het behoud van de materiaaleigenschappen en een goede doorlassing. Op Figuur 75 zijn de spoelkanaaltjes voor het backing gas bij het TIG-lasproces duidelijk weergegeven.



Figuur 75: Spoelkanaaltjes bij TIG-lasinstallatie

4.1.11 De wolfram elektrode

Aan de niet-afsmeltende elektrode voor het TIG lassen worden hoge eisen gesteld, dankzij het hoge smeltpunt van 3410°C blijkt dit materiaal het meest geschikt en daarom wordt dat ook steeds als elektrodemateriaal gebruikt. Voor het verbeteren van de boogeigenschappen worden er legeringselementen toegevoegd.

Ook een belangrijke parameter voor het TIG lasproces is de diameter van de elektrode, dit is afhankelijk van de stroomsoort, polariteit en stroomsterkte. Een te kleine diameter resulteert in oververhitting of afsmelten van de elektrode. Een te grote diameter kan booginstabiliteit en/of kleine inbranding veroorzaken wat evenwel niet wenselijk is.

Het is echter zeer belangrijk dat de elektrode niet verontreinigd wordt door andere metalen. Elke verontreiniging of verbranding van de elektrode doet het smeltbad en de boogstabiliteit snel verslechteren. Daarom vermijdt men dus elk contact van elektrode met werkstuk, smeltbad of toevoegmateriaal en zorgt men dat de elektrode door een goede gasbescherming steeds metallisch blank blijft [26].

4.1.12 Verschillende stappen bij de instelling van de machine

Het systeem om de buizen te klemmen dat ontworpen is door Schnelldorfer-Maschinenbau is eenvoudig in gebruik. De laser- en TIG-lasmachine zijn gelijkaardig in opbouw en bediening. Het verschil tussen deze machines is enkel het soort lastoorts en machine instellingen. De lasmachines worden als volgt ingesteld om de buizen te lassen:

1. Eerst worden de juiste tools geïnstalleerd om de werkstukken te klemmen en te lassen. Deze tools zijn afhankelijk van het soort materiaal, wanddikte, soort las en geometrie van het werkstuk;
2. Daarna worden de correcte lasparameters ingesteld op de machine met het bedieningspaneel;
3. Vervolgens wordt er een kam naar beneden gelaten;
4. Dan wordt de buis over de doorn geschoven tot tegen de achter aanslag waarbij de opening van de buis tegen de kam gedrukt wordt;
5. Daarna wordt de buis geklemd door het achterste klemmechanisme;
6. Vervolgens wordt de voorkant van de buis tegen de kam aan gedrukt;
7. Dan wordt de voorspanning aangelegd op het voorste klemmechanisme en gaat de kam omhoog;
8. Daarna worden de twee kanten die gelast moeten worden perfect tegen elkaar gedrukt door de operator;
9. Vervolgens wordt de buis ook van voor geklemd met de volledige klemdruk;
10. Dan wordt de inklemming gecontroleerd;
11. Als de inklemming goed is, dan moet iedereen de laskamer verlaten. De poort sluit en we kunnen het lasproces laten starten;
12. Als het lasproces gedaan is, gaat de poort terug open en kan de buis van de machine geschoven worden;
13. Daarna wordt de las gecontroleerd op defecten;
14. Ten slotte worden de gegevens en eventuele opmerkingen over het lasproces genoteerd zodat er, later in andere processen, steeds kan teruggevonden worden waar het probleem is opgetreden als er eventueel fouten zouden optreden.

Opmerkingen bij het instellen van de lasmachines:

Als er een buis verkeerd wordt ingeklemd, dan kan de klemming losgemaakt worden. De procedure om de buis terug te klemmen is anders dan de standaardprocedure. Het verschil is bij de voorste kleminrichting. Hierbij moet men dan geleidelijk de druk op terug opbouwen tot de ingestelde waarde. Hiervoor is er wel wat ervaring nodig om dit vlot te kunnen uitvoeren.

4.2 Voorbereiding van de testen

Aangezien de theoretische analyse niet voldoende resultaat opleverde, werd besloten om zeker praktische testen uit te voeren. Omwille van de vele invloedparameters die onderzocht moeten worden, werd gebruik gemaakt van een *design of experiments* meer bepaald de Taguchi methode. De Taguchi methode stelt een minimaal aantal proeven op om toch een besluit te kunnen trekken over de gehele streekproef. Wanneer we niet gebruik maken van deze methode zouden een groter aantal testen moeten uitgevoerd worden. Wat dan zou resulteren in een groot materiaal- en tijdsverbruik. De Taguchi methode maakt het mogelijk om efficiënte conclusies te trekken over de mogelijkheden van het spinformingproces.

4.2.1 Opbouw van de analyse

Voor de Taguchi-analyse zijn 81 buizen nodig. Er zijn van bijna elke test minstens twee buizen beschikbaar, waarvan een laser- en de andere TIG-gelast is. Hierdoor kan de invloed en kwaliteit van de lassen onderzocht worden. Er zal ook gecontroleerd worden welke soort las het beste is voor het spinformingproces.

Vooraleer met de Taguchi-analyse te starten werden er eerst bijkomende tests uitgevoerd om de machine en kleminrichting te optimaliseren. Daarnaast werd er geconcludeerd of de geschatte parameters haalbaar zijn.

Hieronder staat een overzicht van de verschillende variabelen die onderzocht werden:

- Materiaal: 1.4509;
1.4512;
1.4301.
- Buis diameter: Maximum 80 mm reduceren tot 40 mm;
Maximum 160 mm reduceren tot 65 mm.
- Gelaste buizen: Laser gelast;
TIG gelast.
- Wanddikte: Minimaal 0,8 mm;
Maximaal 1,5 mm.
- Conushoek: Minimum 45°;
Maximum 90°.
- Rechte gereduceerde zone: 15 tot 50 mm.

Wanneer echter al deze variabelen afzonderlijk getest zouden worden, zou dit resulteren in een groot aantal testen, materiaal- en tijdverbruik.

Naast het rekening houden met de verschillende variabelen werd er ook een analyse gemaakt worden over de proces parameters namelijk de vervormingssnelheid, axiale voeding en stapdiepte.

Om het aantal testen te beperken is besloten om de testen uit voeren op 3 verschillende diameters, 3 verschillende materiaalsoorten, 3 verschillende wanddiktes, 3 verschillende conushoeken, 3 verschillende vervormingssnelheden, 3 verschillende axiale voedingen en 3 verschillende stapdieptes.

Specificering van de waarden van de gekozen variabelen:

- Materiaal: 1.4301;
1.4509;
1.4512.
- Diameters: 85 mm;
124 mm;
156 mm.
- Wanddikte: 0,8 mm;
1,2 mm;
1,5 mm.
- Conushoek: 40°;
50°;
60°.
- Axiale voeding: 2 mm/omwenteling;
3 mm/omwenteling;
4 mm/ omwenteling.
- Radiale voeding: 2 mm/omwenteling;
3 mm/omwenteling;
4 mm/ omwenteling.
- Stapdiepte: 2 mm;
3 mm;
4 mm.
- Rotatiefrequentie: 220/min;
330/ min;
475/min;

Om een juiste keuze te maken voor de axiale en radiale voeding hebben we een beroep gedaan op de verschillende wetenschappelijke artikels.

- *Numerical simulation and development of tube spinning process for exhaust system components of motor vehicles.*

Axiale voeding (mm/rev)	10
Radiale voeding (mm)	5,67
Toerental (rpm)	650

Bij dit onderzoek maken ze wel gebruik van de 3 rollen die het buisvormige materiaal vervormen. Ons onderzoek heeft echter maar 1 gereedschap.

- *Effects of forming conditions on wrinkling in Necking of Tube end*

Axiale voeding (mm/rev)	4, 5, 6
Radiale voeding (mm)	2,4
Toerental (rpm)	133-1000

Bij dit experiment maken ze net zoals bij het onderzoek in deze thesis gebruik van 1 gereedschap.

- *An experimental study on paraxial spinning of one tube end*

Axiale voeding (mm/rev)	0,25; 0,5; 0,75; 1,00 en 1,25
Radiale voeding (mm)	0,5
Toerental (rpm)	593

Bij dit onderzoek is er gebruik gemaakt van Aluminium in tegenstelling tot het roestvrij staal dat getest wordt in deze thesis.

- *An experimental study of taper shape on tube end*

Axiale voeding (mm/rev)	0,2, 0,4 en 0,6
Radiale voeding (mm)	1,0
Toerental (rpm)	600

Bij dit onderzoek werd er ook gebruik gemaakt van aluminium in tegenstelling tot het roestvrij staal in deze thesis.

- *CNC files verkregen van Bosal USA*

Axiale voeding (mm/rev)	4
Radiale voeding (mm)	4
Vervormingssnelheid (m/min)	320

Aan de hand van deze gegevens hebben we een Taguchi analyse gemaakt per diameter. Dit wil zeggen dat we een Taguchi analyse gedaan hebben voor diameter 85 mm, diameter 124 mm en diameter 156 mm. Per diameter zijn er 27 testen, dit maakt dus een totaal van 81 testen over de gehele steekproef.

4.2.2 Overzicht proeven

Diameter 85

Nummer	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Stapgrootte (mm)	Materiaal	Reductie (mm)	Conushoek (°)	Wanddikte (mm)	Buislengte (mm)
1	220	2	2	1,4509	10	40	0,8	166
2	220	2	2	1,4509	25	50	1,2	170
3	220	2	2	1,4509	40	60	1,5	172
4	220	3	3	1,4512	10	40	0,8	166
5	220	3	3	1,4512	25	50	1,2	170
6	220	3	3	1,4512	40	60	1,5	172
7	220	4	4	1,4301	10	40	0,8	166
8	220	4	4	1,4301	25	50	1,2	170
9	220	4	4	1,4301	40	60	1,5	172
10	320	2	3	1,4301	10	50	1,5	164
11	320	2	3	1,4301	25	60	0,8	167
12	320	2	3	1,4301	40	40	1,2	184
13	320	3	4	1,4509	10	50	1,5	164
14	320	3	4	1,4509	25	60	0,8	167
15	320	3	4	1,4509	40	40	1,2	184
16	320	4	2	1,4512	10	50	1,5	164
17	320	4	2	1,4512	25	60	0,8	167
18	320	4	2	1,4512	40	40	1,2	184
19	475	2	4	1,4512	10	60	1,2	163
20	475	2	4	1,4512	25	40	1,5	175
21	475	2	4	1,4512	40	50	0,8	177
22	475	3	2	1,4301	10	60	1,2	163
23	475	3	2	1,4301	25	40	1,5	175
24	475	3	2	1,4301	40	50	0,8	177
25	475	4	3	1,4509	10	60	1,2	163
26	475	4	3	1,4509	25	40	1,5	175
27	475	4	3	1,4509	40	50	0,8	177

Testen in het geel werden niet uitgevoerd aangezien de buizen van wanddikte van 1,2 en 1,5 mm niet beschikbaar waren.

Diameter 124 mm

Nummer	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Stapgrootte (mm)	Materiaal	Reductie (mm)	Conushoek (°)	Wanddikte (mm)	Buislengte (mm)
1	220	2	2	0,8	20	40	1,4509	147
2	220	2	2	0,8	50	50	1,4512	156
3	220	2	2	0,8	70	60	1,4301	155
4	220	5	4	1,2	20	40	1,4509	147
5	220	5	4	1,2	50	50	1,4512	156
6	220	5	4	1,2	70	60	1,4301	155
7	220	8	6	1,5	20	40	1,4509	147
8	220	8	6	1,5	50	50	1,4512	156
9	220	8	6	1,5	70	60	1,4301	155
10	320	2	4	1,5	20	50	1,4301	143
11	320	2	4	1,5	50	60	1,4509	149
12	320	2	4	1,5	70	40	1,4512	177
13	320	5	6	0,8	20	50	1,4301	143
14	320	5	6	0,8	50	60	1,4509	149
15	320	5	6	0,8	70	40	1,4512	177
16	320	8	2	1,2	20	50	1,4301	143
17	320	8	2	1,2	50	60	1,4509	149
18	320	8	2	1,2	70	40	1,4512	177
19	475	2	6	1,2	20	60	1,4512	141
20	475	2	6	1,2	50	40	1,4301	165
21	475	2	6	1,2	70	50	1,4509	164
22	475	5	2	1,5	20	60	1,4512	141
23	475	5	2	1,5	50	40	1,4301	165
24	475	5	2	1,5	70	50	1,4509	164
25	475	8	4	0,8	20	60	1,4512	141
26	475	8	4	0,8	50	40	1,4301	165
27	475	8	4	0,8	70	50	1,4509	164

Testen in het geel werden niet uitgevoerd aangezien een wanddikte van 0,8 mm enkel defecte eindproducten oplevert.

Diameter 156

Nummer	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Stapgrootte (mm)	Materiaal	Reductie (mm)	Conushoek (°)	Wanddikte (mm)	Buislengte (mm)
1	1,5	40	1.4509	30	220	2	2	176
2	1,2	50	1.4509	60	220	2	2	199
3	0,8	60	1.4509	90	220	2	2	213
4	1,5	40	1.4512	30	220	5	4	176
5	1,2	50	1.4512	60	220	5	4	199
6	0,8	60	1.4512	90	220	5	4	213
7	1,5	40	1.4301	30	220	8	6	176
8	1,2	50	1.4301	60	220	8	6	199
9	0,8	60	1.4301	90	220	8	6	213
10	1,5	50	1.4301	90	320	2	4	232
11	1,2	60	1.4301	30	320	2	4	161
12	0,8	40	1.4301	60	320	2	4	217
13	1,5	50	1.4509	90	320	5	6	232
14	1,2	60	1.4509	30	320	5	6	161
15	0,8	40	1.4509	60	320	5	6	217
16	1,5	50	1.4512	90	320	8	2	232
17	1,2	60	1.4512	30	320	8	2	161
18	0,8	40	1.4512	60	320	8	2	217
19	1,5	60	1.4512	60	475	2	6	187
20	1,2	40	1.4512	90	475	2	6	259
21	0,8	50	1.4512	30	475	2	6	167
22	1,5	60	1.4301	60	475	5	2	187
23	1,2	40	1.4301	90	475	5	2	259
24	0,8	50	1.4301	30	475	5	2	167
25	1,5	60	1.4509	60	475	8	4	187
26	1,2	40	1.4509	90	475	8	4	259
27	0,8	50	1.4509	30	475	8	4	167

Testen in het geel werden niet uitgevoerd aangezien een wanddikte van 0,8 mm enkel defecte eindproducten oplevert.

4.2.3 Datasheets proeven

Voor elk van deze testen hebben we een datasheet opgesteld, waarop de verschillende parameters vermeld staan. Zo zijn er dus in totaal 81 testen. Op deze datasheets wordt ook de verwerking van de resultaten op uitgevoerd.

De verwerking van de meetresultaten houdt in:

- Wanddikte van het rechte deel meten;
- Wanddikte van het conusvormige deel;
- Binnendiameter van het rechte deel;
- Hardheid;
- Oppervlakteruwheid;
- Buitendiameter van het rechte deel;
- Rondheid van de conus;
- Rondheid van het rechte deel;
- Dikteverloop doorheen de buis (doorsnede).

Zo heeft elke proef een specifiek datasheet met zijn specifieke waarde van de variabele en de proces parameters. Op basis van deze 81 datasheets wordt een besluit getrokken over het *spin forming* proces. In bijlage A is een datasheet te vinden.

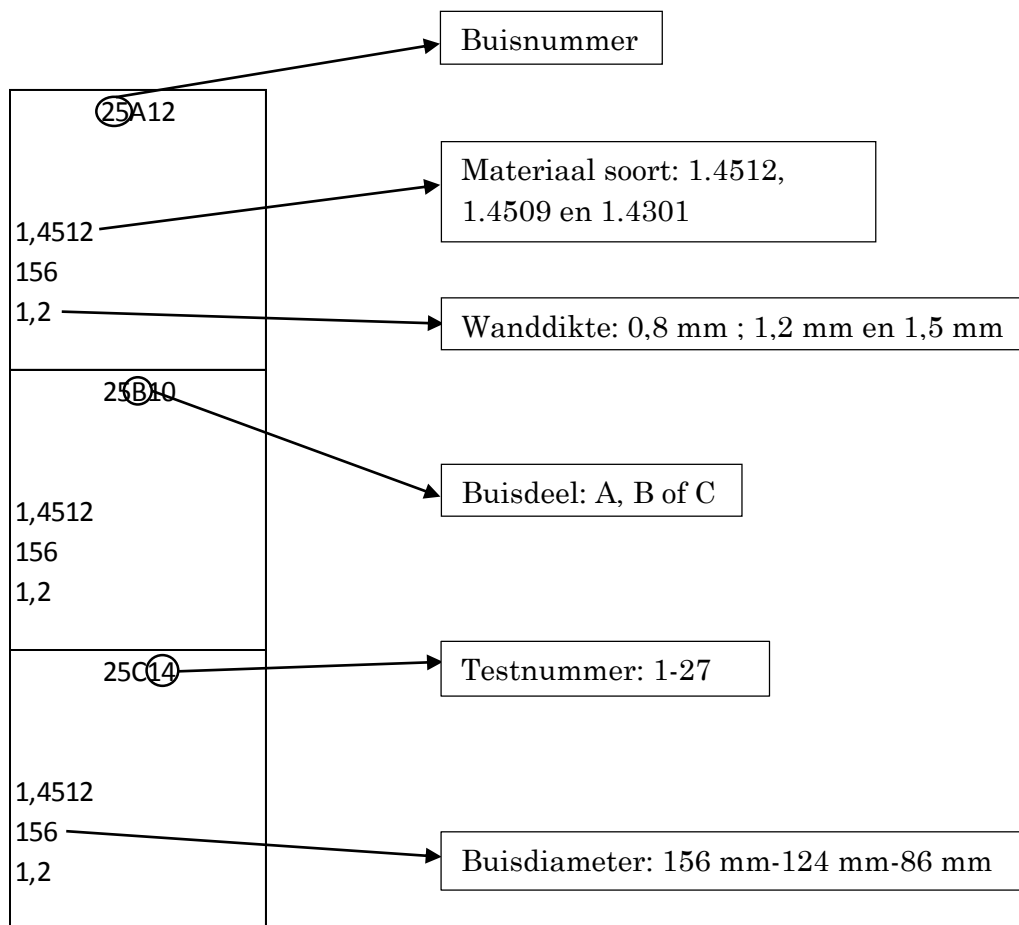
4.2.4 Identificatie van de spinformingbuizen

Om te kunnen achterhalen welke buis voor welke spinformingparameters gebruikt wordt, is er een identificatiesysteem bedacht. Elke buis heeft een nummer gekregen, afhankelijk van dit nummer kan er achterhaald worden wat de specificaties van de buis zijn. Die specificaties zijn onder andere de wanddikte, diameter, materiaalsoort en lasparameters. Zoals gekend wordt er vertrokken van plaatmateriaal. Op dit plaatmateriaal is de wanddikte, diameter en het materiaal gegraveerd. Vervolgens werd van dit plaatmateriaal buizen gerold. De volgende stap in het proces is het dichtlassen van de gerolde platen, dit is gebeurd door middel van TIG- of laserlassen. Ten slotte is de gevormde buis in drie delen gezaagd.

Aangezien de buis in drie delen gezaagd is hebben we elk deel de letter A, B of C meegegeven. Dit is gebeurd voor iedere buis. In Figuur 76 is duidelijk te zien dat op elk deel van de buis het hoofdnummer te zien is, dit is in dit geval nummer 25. Vervolgens heeft elk deel de letter A, B of C meegekregen. Wanneer de buis gezaagd is zijn er dus 3 delen namelijk 25A, 25B en 25C.

Vervolgens hebben we aan elk deel een testnummer toegevoegd voor het verkrijgen van een uniek identificatienummer voor iedere buis. In figuur 36 zie je dus dat er uit 1 plaat 3 spinformingbuizen gehaald kunnen worden. Namelijk 25A12, 25B10 en 25C14 zo zal het ook meteen duidelijk zijn dat welke test op welk deel uitgevoerd zal worden.

Zo zal aan de hand van de buis die we vasthebben gezien kunnen worden met welke voedingssnelheid, reductie, conushoek, radiale inzet en omwentelingsnelheid het spiningproces moet uitgevoerd worden.



Figuur 76 identificatie van de buizen

4.3 Uitvoering spinformingproces

4.3.1 Bespreking spinformingmachine

Het uitvoeren van het *spin forming* heeft plaatsgevonden bij de firma Fraiponts in Zonhoven. Voor de testen hebben we gebruik gemaakt van een CNC draaibank van het merk Hwacheon Hi-TECH 400, deze draaibank had een hoog vermogen. Dit hoge vermogen is noodzakelijk voor het vervormen van de buizen. Deze machine was voorzien van een Fanuc 18i/T8 sturing. Vooraf werd de gereedschapsbaan berekend zodat het eenvoudig was voor de machineoperator om de coördinaten handmatig in te geven.

Figuur 77 is een foto van de spinformingmachine, deze machine is voorzien van speciale klauwen voor het klemmen van de buizen. Ook is het gereedschap zichtbaar.



Figuur 77: Spinformingmachine bij Fraiponts

4.3.2 Vervormingsgereedschap

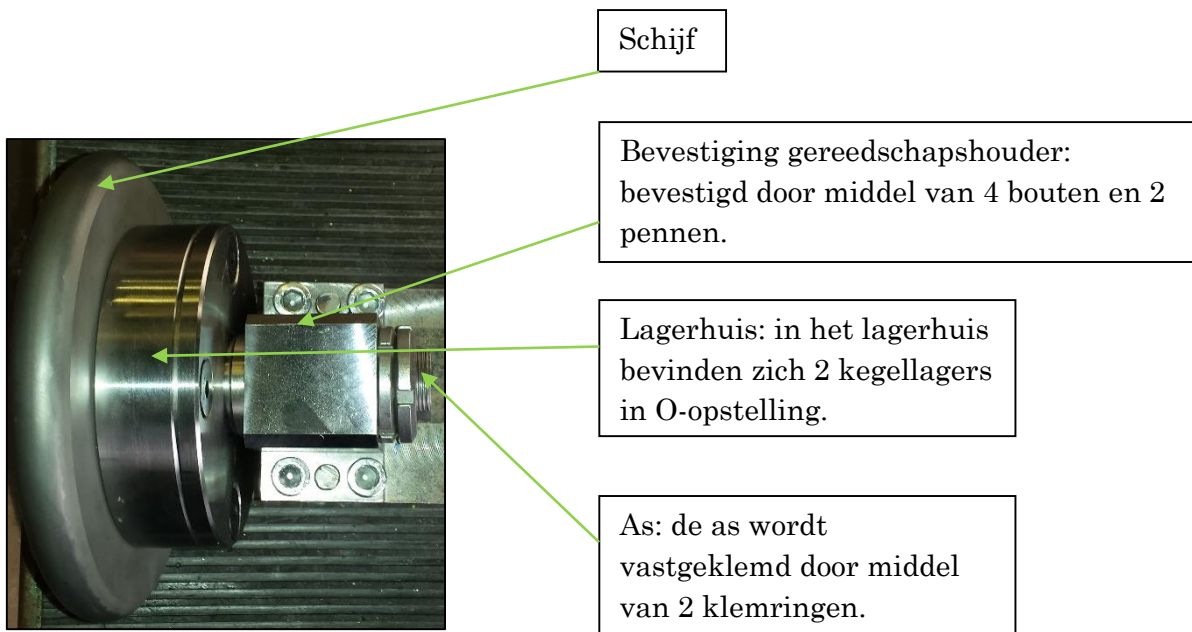
Het vervormingsgereedschap heeft dezelfde geometrie als in de vestiging van Bosal in de Verenigde Staten.



Figuur 78: Vervormingsgereedschap gemonteerd op gereedschapshouder

Dit vervormingsgereedschap is een schijf met een diameter van 120 mm en dikte van 20 mm. De schijf is oppervlaktegehard. De schijf heeft een neusradius (afronding) van $R = 10$ mm.

Op Figuur 79 zijn de verschillende onderdelen van de tooling benoemd.



Figuur 79: Onderdelen van het vervormingsgereedschap

4.3.3 Klemmechanisme

De buizen worden geklemd door extra grote grijpers van het merk Schunk. Deze grijpers worden op de juiste diameter gedraaid zodat de buis er precies in past. Vervolgens worden deze grijpers bevestigd in de klauwplaat. Deze klauwplaat kan op een persdruk van 0 tot 28 bar ingesteld worden. Op Figuur 80 zijn de klemmen diameter 85 te zien.



Figuur 80: Klemmen diameter 85 mm

4.3.4 Klemprobleem 1

Tijdens de spinformingtesten is gebleken dat de combinatie van mat en dummykatalysator problemen geeft bij het klemmen van de buizen. Door de grote klemkracht, die noodzakelijk is, wordt de mat platgedrukt. Dit resulteert in een driehoekvormige buis en wordt het product afgekeurd.

Vervolgens is er gekozen om een dummykatalysator met dezelfde diameter als de inwendige diameter als de buizen te gebruiken. Hierdoor zou de buis niet vervormen door de inklemming. Deze oplossing bleek te werken. Voor de buizen met diameter 85 mm en 124 mm is gebruikt gemaakt van een dummykatalysator van het materiaal POM. Voor de grote diameter 156 mm is er gebruik gemaakt van een aluminium kern, omdat er geen POM van deze diameter in stock was.

Door het gebruik van deze aangepaste kern is er tijdens het testen niet meer gebruik gemaakt van matten. Hierdoor moest er niet meer gestuft worden. Deze inklemming benadert de werkelijkheid minder maar is essentieel voor het slagen van de spinformingtesten met deze machine.

4.3.5 Klemprobleem 2

Bij deze klemmen hebben we gemerkt dat het buisvormige materiaal tijdens de “trekbeweging” uit de klemmen schuift. De trekbeweging is de voedingsbeweging van het gereedschap in de richting van het vrije uiteinde. Dit verschuiven gebeurde zowel bij de buizen $\varnothing 85$ mm als bij de buizen $\varnothing 124$ mm. Het gevolg hiervan is dat er rimpels optreden in het materiaal, dit wordt beschouwd als een defect.

In Figuur 85 is een voorbeeld te zien van dit soort rimpels. De oplossing die hiervoor bedacht is, is de klemmen te voorzien van stiftjes met een tophoek van 90° . Om deze stiftjes vast te zetten in de klemmen zijn er gaten in de klemmen gefreesd waarin de stiftjes met een glijdende passing passen. Een foto van de aangepaste klemmen is weergegeven in Figuur 81. De scherpe punten van de stiftjes steken 1,2 mm uit boven het oppervlak van de klemmen. Zodat wanneer de klemmen sluiten, de punt in het buisoppervlak gedrukt wordt. Figuur 81 klemaanpassing In Figuur 82 is een voorbeeld te zien van de indenting, zo zijn er drie indentingen per buis. Deze oplossing heeft er toe geleid dat de testen uitgevoerd kunnen worden zonder dat er rimpels optraden. Tevens heeft deze oplossing heeft het mogelijk gemaakt dat *spin forming* toegepast kan worden op een gewone CNC draaibank.



Figuur 81 klemaanpassing

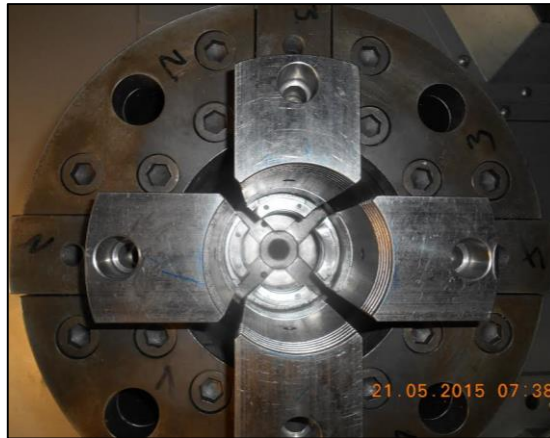


Figuur 82 indenting

Het is klemmen van de buizen is een zeer cruciaal punt bij *spin forming*. De minste verschuiving volgens de as van de draaibank resulteert al in een defect eindproduct. Deze verbeterde klemmen zorgen er dus voor dat het spinformingproces uitgevoerd kan worden.

4.3.6 Vergelijking speciale klemmen *spin forming*

Een optimale klemming wordt verkregen met de klemmen in Figuur 83. Op Figuur 84 is te zien is dat de buis over zijn volledige mantel geklemd wordt en waarbij dus klemkracht verdeeld wordt over de gehele mantel van de buis. In de machine gebruikt voor deze thesis was dit enkel op 3 punten en werkt op een deel van de mantel geen klemkracht. Op de buis in Figuur 84 is te zien dat de klemkracht werkt over de gehele lengte van de buis terwijl dat bij de machine voor deze thesis dat enkel was over een afstand van 80 mm. Zodat het gedeelte buiten klemmen soms groter was dan het gedeelte in de klemmen, dat is bij de klemmen van Figuur 83 nooit het geval.



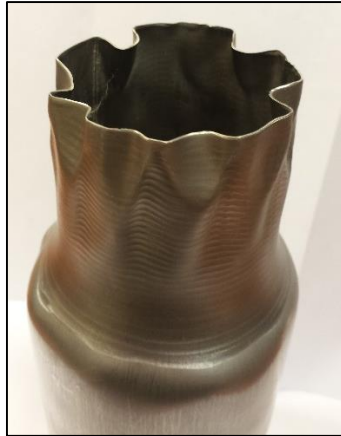
Figuur 83 optimale klemmen



Figuur 84 Optimale klemmen met buis

4.3.7 Afsteeklengte

Ook van zeer groot belang is dat er zo dicht mogelijk tegen de klemmen wordt gevormd omdat dit rimpels helpt te voorkomen. Nog een belangrijke invloedsparameter is de lengte van het rechte gedeelte wanneer deze lengte te lang is veroorzaakt dit op zijn beurt ook rimpels. Omwille van deze twee redenen werden de buizen op de juiste lengte gemaakt. Dit gebeurde op een conventionele draaibank met behulp van een afsteekbeitel. In Figuur 85 is een voorbeeld te zien van dit soort rimpels.

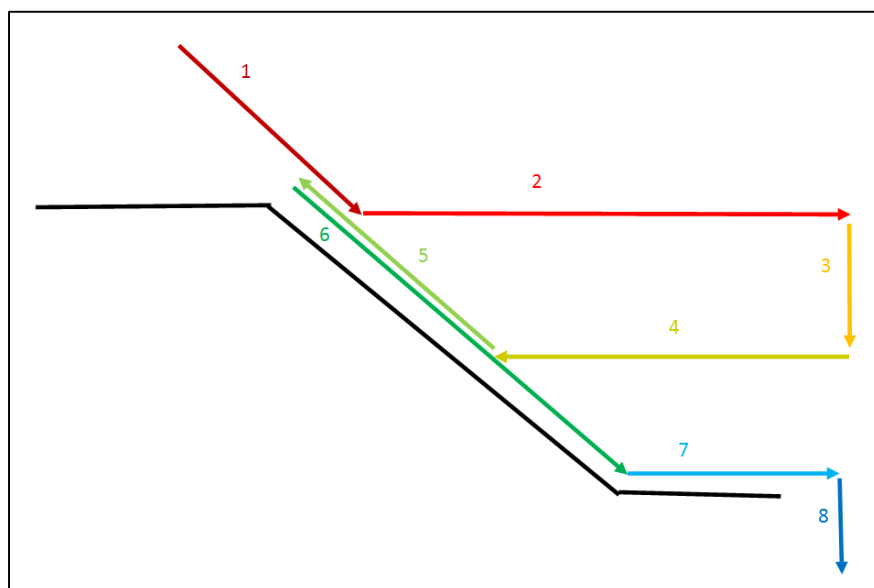


Figuur 85: Rimpels op eindproduct

4.3.8 Uitleg over gekozen gereedschapsbaan

Er is gekozen voor bij de testen gebruik te maken van een bidirectionele gereedschapsbaan. Dit is een weloverwogen keuze. Ten eerste is uit de literatuur gebleken dat deze gereedschapsbaan de beste wanddikteverdeling geeft. Dit komt door het afwisselend “trekken” en “duwen” van het gereedschap. Hierdoor ontstaat er nergens overmatige wanddikteverdikking of –verdunding. Ten tweede is er gebleken uit films op het internet van spinningprocessen dat er in de meeste gevallen een bidirectioneel pad gevolgd wordt. Daarnaast gebruikt Bosal in zijn vestiging in U.S.A. ook deze vorm van gereedschapsbaan.

In Figuur 86 is de gebruikte bidirectionele gereedschapsbaan weergegeven. De bewegingen van het gereedschap zijn aangeduid met gekleurde pijlen, de volgorde van de stappen wordt aangeduid met de nummers. De zwarte lijnen stellen de wand van de testbuis voor.



Figuur 86: Bidirectionele gereedschapsbaan, gebruikt bij de testen

Er is duidelijk te zien dat beweging in de vijfde stap tot net boven het werkstukoppervlak komt. Deze beweging naar boven is dit nodig om te verzekeren dat de volledige conus de juiste vorm heeft, omdat er terugvering van het materiaal is bij het vervormen. Daarnaast valt het ook op dat er een evenwicht is tussen de trek- en duwbewegingen van het gereedschap.

4.4 Lasermetingen

Om de buitendiameter diameters van de testbuizen nauwkeurig te bepalen, is gebruik gemaakt van een lasermeetmachine. Deze meetmachine is van het merk KoCos en dient eigenlijk om katalysators te meten, het “OMCAT Catalytic Measurement System” is zichtbaar in Figuur 87. Toch is deze machine zeer geschikt om de buitendiameter en rondheid van het nier-vervormde en wel vervormde deel van de buis op verschillende plaatsen te meten.



Figuur 87: Lasermeetmachine voor de diameter en rondheid

De resultaten van de meting werden eerst opgeslagen op een PC, waarna ze in een Excel-werkblad geplaatst werden.

5 Resultaten

5.1 Resultaten testen diameter 85 mm

De volledige resultaten van de testen zijn terug te vinden in bijlage B op de cd-rom in het bestand “Testen_Bespreking_Gegevensblad”. Hierin zijn alle kenmerken samengevat zoals de testdatum, kenmerken van de buis, kenmerken van het productieproces, afmetingen, defecten en opmerkingen bij het proces en bij het eindproduct.

5.1.1 Eerste serie testen diameter 85 mm

Bij de eerste serie testen zijn er tien buizen vervormd met wanddikte 0,8 mm en een diameter van 85 mm. De reden dat er enkel buizen met wanddikte 0,8 mm werden getest is omdat de buizen met een dikkere wand niet gelast konden worden. Het materiaal van wanddikte 1,2 en 1,5 was dus niet beschikbaar toen de eerste testen uitgevoerd werden. Daarnaast waren de klemmen voor de buizen met een grotere diameter ($\varnothing 124$ mm en $\varnothing 156$ mm) nog niet beschikbaar.

De eerste test werd uitgevoerd op een buis waarin een kunststof kern zat die omgeven was door een mat. Deze situatie benadert zeer goed het echte proces, waarbij de katalysator ook omgeven is door dezelfde type mat. Echter bij het klemmen van de buis, vervormde de buis omdat de mat compressibel is. Het resultaat was een driehoekvormige buisdoorsnede en duidelijke indrukkingen van de klemmen. Dit eindproduct is zichtbaar in Figuur 88. De volgende testen werden daarom uitgevoerd zonder mat en met een kern die zeer weinig speling vertoonde of zelfs licht klemmend was. Hierdoor verloopt de klemming van het werkstuk beter.

Een ander fenomeen dat zeer duidelijk waar te nemen is in Figuur 88 is dat het rechte gereduceerde gedeelte van de buis licht conisch is. Dit komt door de terugvering en elasticiteit van het materiaal. Bij het proces wordt er een puntkracht op het materiaal gezet, hierdoor vervormt het materiaal lokaal. Omdat het uiteinde relatief ver uitsteekt uit de klemmen, is hier veel elastische doorbuiging. Wanneer deze puntkracht wordt weggenomen, veert het materiaal dus gewoon terug. Daarom zal er minder plastisch vervormd zijn dan verwacht en ontstaat de conische vorm.



Figuur 88: Eerste testbuis, met duidelijk niet ronde vorm onderaan, afdrukken van de klemmen en aan de bovenkant een licht conisch gereduceerd gedeelte

De volgende negen testen verliepen ook niet zoals verwacht. Er trad bij vier van de negen buizen rimpeling op. Vanaf het moment dat de reductie groter werd dan 25 mm, krekten de buizen. Ook waren er enkele scheurtjes van de lasnaden, dit komt doordat er werd vervormd op het begin van de las. Hier is de lasnaad niet volledig tot op het buisuiteinde en ontstaan er eenvoudig scheurtjes. Dit scheuren van de las is zichtbaar in Figuur 90. In Figuur 91 is een goed eindresultaat zichtbaar met een conushoek van 60°, voedingssnelheden van 2 mm/omwenteling, stapdiepte van 2 mm en reductie van 25 mm.



Figuur 89: Testbuis $\varnothing 85$ mm met wanddikte 0,8 mm met ernstige rimpelvorming over het volledige gereduceerde gedeelte



Figuur 90: Buis met rimpels en kleine scheur aan het begin van de lasnaad



Figuur 91: Goed eindresultaat ($\varnothing 85$ mm, conushoek = 60°)

5.1.2 Tweede serie testen diameter 85 mm

Bij de tweede serie van testen werden 17 buizen van wanddikte 0,8 mm en diameter 85 mm vervormd. De klemmen voor de grotere diameters waren nog steeds niet beschikbaar.

Bij de geteste buizen waren enkele goede resultaten, maar er waren ook veel problemen. Bij deze testen was het de bedoeling om te achterhalen waarom de vorige buizen zo snel krekten. Daarom is er gekozen voor lage stapdieptes, reducties en voedingsnelheden. Toch viel op dat er nog steeds ernstige rimpeling ontstond als de reductie de grens van 25 mm overschreed. Zelfs bij lage reducties zijn lichte rimpels waar te nemen bij het eindproduct.

Hiervoor werd een verklaring gezocht, na grondig herbekijken van de filmpjes die gemaakt werden tijdens de testen, viel het op dat de buis axiaal verschoof in de klemmen. Als oplossing hiervoor werd de klemdruk verhoogd tot de buis niet meer verschoof. De klemdruk op de machine steeg van 12 naar 16 en vervolgens naar 18 bar. Dit gaf echter geen oplossing voor de kreukvorming.



Figuur 92: Testbuis met aan de onderkant duidelijke markeringen van de klemmen

5.1.3 Besluit testen diameter 85 mm

Bij de testen van $\varnothing 85$ mm werden enkel buizen met wanddikte 0,8 mm getest. De klemmen waren nog niet geoptimaliseerd met de geharde uitsteeksels en hierdoor verschoven de buizen soms axiaal tijdens de bewerking en is er geen algemene conclusie te trekken. De eerste deelconclusie is wel dat de klemming niet goed verloopt als de kern omgeven is door een mat. Dit moet dus veranderen naar een kern die goed past in de buis. Daarnaast bevordert een lange uitsteeklengte de vorming van rimpels en zorgt voor een conisch recht gereduceerd gedeelte. De buizen kreuken al vanaf een kleine reductie, dit vermindert waarschijnlijk als de wanddikte toeneemt.

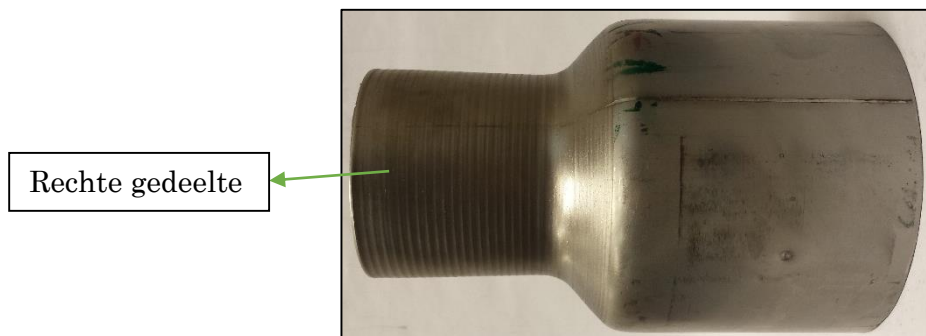
5.2 Resultaten testen diameter 124

Diameter 124 is de middelste diameter waarop de testen gebeuren, een volledige gedetailleerde uitwerking van de testen is terug te vinden in bijlage B. Voor deze testen zijn speciale klemmen gebruikt en aangepast met geharde pennen die 1,2 mm boven het oppervlak van de klemmen uitsteken, de klemdruk bedroeg 28 bar. Als eerste wordt een analyse gemaakt op basis van de *design of experiments* met behulp van de Taguchi-methode. Daarna werd een tweede analyse gemaakt aan de hand van andere opgestelde testen waarbij telkens één parameter verandert werd.

5.2.1 Analyse van de resultaten met behulp van de Taguchi-methode

Tijdens de testen is er geconcludeerd dat er met buizen met een wanddikte van 0,8 mm onvoldoende reductie bereikt kan worden, zonder dat er defecten zoals rimpels optreden. De testen met wanddikte 0,8 mm zijn daarom niet uitgevoerd met als gevolg dat deze geen resultaten geeft in de Taguchi-methode. Hierdoor zijn 9 van de 27 testen niet ingevuld. Waardoor een conclusie trekken uit de resultaten van de Taguchi-analyse minder betrouwbaar wordt. Hierdoor is er een tweede serie van testen ingevoerd waarin slechts 1 parameter werd veranderd. Er is ook een conclusie getrokken met behulp van de bevindingen opgedaan tijdens de spinformingtesten.

Bij de verwerking van de buizen zijn er een aantal afmeting opgemeten zoals de wanddikte van het recht gedeelte, verlenging, hardheid, terugvering en de rondheid. Op *Figuur 93* is te zien wat bedoeld wordt met het recht gedeelte.



Figuur 93: Recht gereduceerd gedeelte

De afmetingen voor de terugvering, verlenging, wanddikte en rondheid worden steeds in %-weergegeven. Zo is de wanddikte (gemeten 10 mm boven het einde van de conus) uitgedrukt ten opzichte van de oorspronkelijke wanddikte, de verlenging ten opzichte van de eindlengte, de terugvering ten opzichte van de gewenste diameter en de rondheid ten opzichte van de gemiddelde diameter.

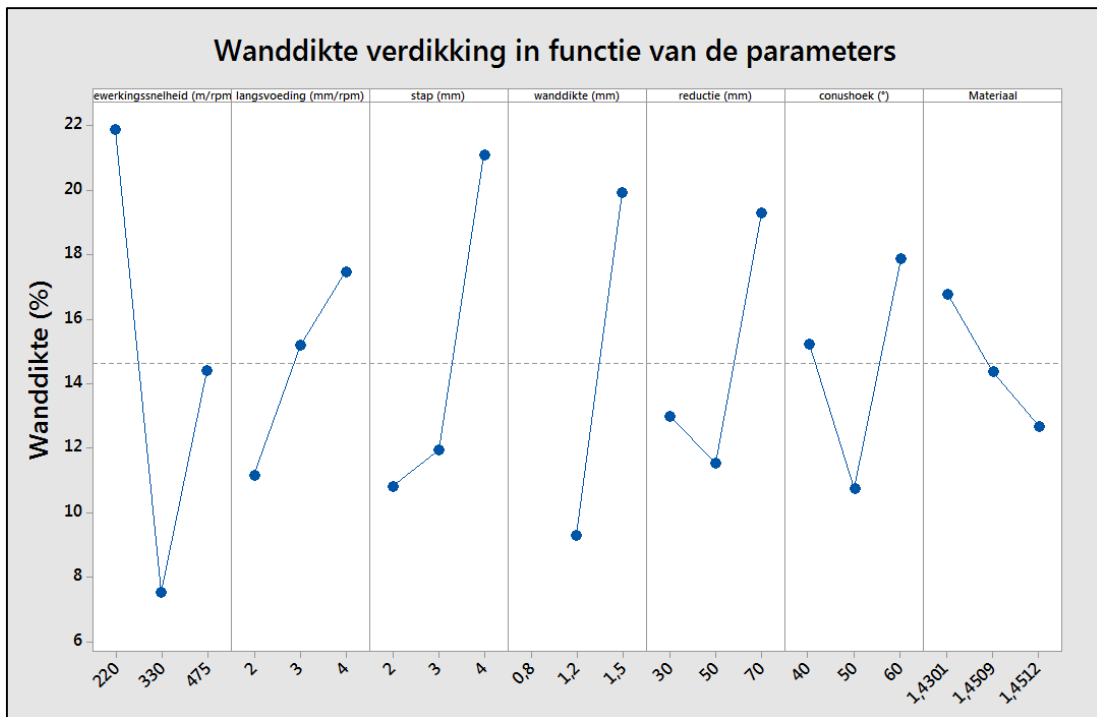
5.2.1.1 Analyse van de wanddikte in functie van de parameters

Tabel 2: Overzicht spinformingparameters van Taguchi-analyse $\varnothing 124$ mm

Toerental	Langsvoeding	Stap	Wanddikte	Reductie	Conushoek	Materiaal	Wanddikte
Rpm	mm/rev	mm	mm	mm	°	EN	%
220	2	2	0,8	30	40	1,4509	*
220	2	2	0,8	50	50	1,4512	*
220	2	2	0,8	70	60	1,4301	*
220	3	3	1,2	30	40	1,4509	8,3
220	3	3	1,2	50	50	1,4512	13
220	3	3	1,2	70	60	1,4301	17
220	4	4	1,5	30	40	1,4509	33
220	4	4	1,5	50	50	1,4512	13
220	4	4	1,5	70	60	1,4301	47
330	2	3	1,5	30	50	1,4301	6,7
330	2	3	1,5	50	60	1,4509	6,7
330	2	3	1,5	70	40	1,4512	20
330	3	4	0,8	30	50	1,4301	*
330	3	4	0,8	50	60	1,4509	*
330	3	4	0,8	70	40	1,4512	*
330	4	2	1,2	30	50	1,4301	1,8
330	4	2	1,2	50	60	1,4509	8,3
330	4	2	1,2	70	40	1,4512	1,8
475	2	4	1,2	30	60	1,4512	8,3
475	2	4	1,2	50	40	1,4301	8,3
475	2	4	1,2	70	50	1,4509	17
475	3	2	1,5	30	60	1,4512	20
475	3	2	1,5	50	40	1,4301	20
475	3	2	1,5	70	50	1,4509	13
475	4	3	0,8	30	60	1,4512	*
475	4	3	0,8	50	40	1,4301	*
475	4	3	0,8	70	50	1,4509	*

In de volgende paragrafen wordt van elke parameter geëvalueerd wat zijn invloed is op de wanddikte van het rechte gedeelte.

Grafische voorstelling wanddikte in functie van de spinformingparameters



Figuur 94: Wanddikte in functie van de spinformingparameters

Conclusie wanddikte in functie van de spinformingparameters

De wanddikteverandering ten opzichte van de begindikte is weergegeven op de y-as. Op de x-as staan de parameters toerental, langsvoeding, stapgrootte, wanddikte, diameterreductie, conushoek en materiaalsoort.

Wanneer de wanddikteverandering in functie van het toerental wordt bestudeerd, kan er afgeleid worden dat bij zeer lage toerentalen (220 /min) er een serieuze verdikking plaatsvindt. Terwijl bij een toerental van 330m/min er slechts een beperkte verdikking plaatsvindt. Bij een hoog toerental 475/min vindt een gemiddelde verdikking plaats. Aan de hand van deze resultaten bestaat er geen verband tussen het toerental en wanddikte vanwege het onregelmatige verloop van de curve.

Uit de grafiek van de langsvoeding wordt er een stijgende trend afgeleid. Er treedt bij een lage voeding (2 mm/omw) minder verdikking op dan bij een hoge voeding 4 (mm/omw). Algemeen is wel te concluderen dat er verdikking plaatsvindt ongeacht de langsvoedingsnelheid.

De grafiek van de stapgrootte vertoont ook een stijgende trend. Bij een kleine stap van 2 mm per pas vindt er slechts weinig verdikking plaats. Terwijl bij een grotere stap van 4 mm, er meer verdikking plaatsvindt. Dit is ook logisch aangezien dat er per pas meer materiaal vervormd wordt. Hierdoor ontstaat er meer materiaalophoping voor de tool, waardoor de wanddikte stijgt.

Over de invloed van de startwanddikte is moeilijk een besluit te trekken aangezien er slechts enkel twee startwanddikten zijn getest, namelijk 1,2 mm en 1,5 mm.

De diameterreductie vertoont een onlogisch verloop. Er werd verwacht dat de wanddikte verdikking stijgt wanneer de diameterreductie stijgt. De grafiek vertoont echter eerst een daling en daarna een stijging in wanddikteverdikking. Op basis van deze curve kan er geen verband afgeleid worden tussen de diameterreductie en de wanddikteverandering.

Aan de hand van de grafiek van de conushoek kan ook moeilijk een conclusie worden getrokken, deze vertoont ook weer een onlogisch verloop. Hier is het verloop moeilijk te voorspellen van wat er gebeurt met de wanddikte als de conushoek stijgt. Op basis van deze meetresultaten kan er dus geen verband gevonden worden tussen de conushoek en de wanddikteverandering.

Met de materiaalgrafiek kan besloten worden dat er voor materiaal 1.4301 meer verdikking optreedt dan voor materiaal 1.4509 en 1.4512. Materiaal 1.4301 is dus meer gevoelig voor verdikking dan materiaal 1.4509 en materiaal 1.4509 is op zijn beurt weer gevoeliger voor verdikking dan materiaal 1.4512.

Met behulp van de Taguchi-analyse kan een ranking gemaakt worden van de invloedparameters. De invloedparameter met ranking 1 heeft het meeste invloed op de wanddikte terwijl de invloedparameter met ranking 6 heeft het minste invloed op de wanddikte. Tabel 3 geeft een overzicht van de ranking van de parameters.

Tabel 3 Ranking parameters wanddikte

Parameter	Ranking
Toerental (rpm)	1
Wanddikte (mm)	2
Stap (mm)	3
Reductie (mm)	4
Conushoek (°)	5
Materiaal	6
Axiale voeding (mm/rev)	7

Samenvattende conclusie wanddikte in functie van spinformingparameters

Ongeacht de spinformingparameters stijgt de wanddikte van het rechte gedeelte na het spinformingproces.

Bij een stijgende voeding treedt er meer verdikking op. Stapdiepte vertoont ook dit gedrag. Wanneer de stapdiepte toeneemt, treedt er ook meer verdikking op. Materiaal 1.4301 vertoont het meeste verdikking, dit is ook een austenitisch roestvrij staal terwijl 1.4509 en 1.4512 ferritische roestvrije staalsoorten zijn. Uit de rest van de grafieken (toerental, diameterreductie en conushoek) is er geen verband af te leiden met behulp van de Taguchi-analyse.

Figuur 95 is een voorbeeld van een buis in de Taguchi-analyse.



Figuur 95: Buis $\varnothing 124$ mm, reductie 70 mm en conushoek 40°

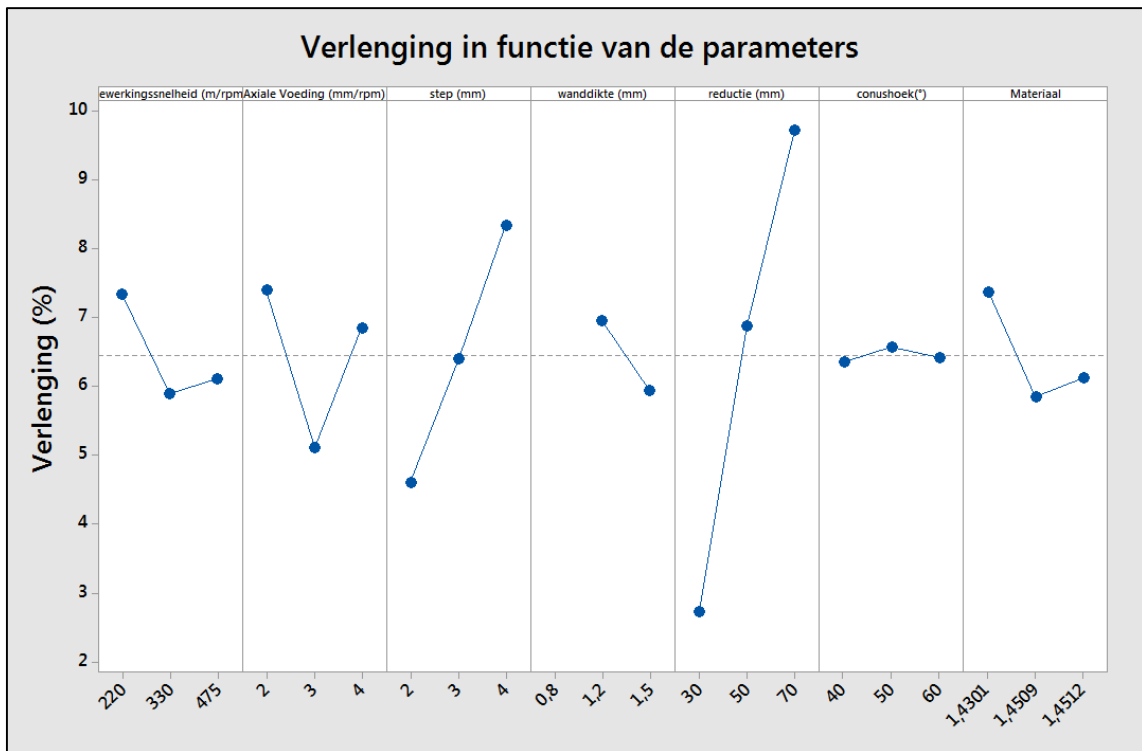
5.2.1.2 Analyse van de verlenging in functie van de spinformingparameters

Tabel 4: Analyse van verlenging in functie van spinformingparameters

Toerental	Axiale voeding	stap	Wand-dikte	reductie	conushoek	Materiaal	Verlenging
Rpm	mm/rev	mm	mm	mm	°	EN	%
220	2	2	0,8	30	40	1,4509	*
220	2	2	0,8	50	50	1,4512	*
220	2	2	0,8	70	60	1,4301	*
220	3	3	1,2	30	40	1,4509	3,06
220	3	3	1,2	50	50	1,4512	7,88
220	3	3	1,2	70	60	1,4301	8,94
220	4	4	1,5	30	40	1,4509	2,84
220	4	4	1,5	50	50	1,4512	7,27
220	4	4	1,5	70	60	1,4301	14,1
330	2	3	1,5	30	50	1,4301	2,61
330	2	3	1,5	50	60	1,4509	6,3
330	2	3	1,5	70	40	1,4512	9,64
330	3	4	0,8	30	50	1,4301	*
330	3	4	0,8	50	60	1,4509	*
330	3	4	0,8	70	40	1,4512	*
330	4	2	1,2	30	50	1,4301	3,86
330	4	2	1,2	50	60	1,4509	5,12
330	4	2	1,2	70	40	1,4512	7,9
475	2	4	1,2	30	60	1,4512	2,17
475	2	4	1,2	50	40	1,4301	8,09
475	2	4	1,2	70	50	1,4509	15,6
475	3	2	1,5	30	60	1,4512	1,92
475	3	2	1,5	50	40	1,4301	6,67
475	3	2	1,5	70	50	1,4509	2,24
475	4	3	0,8	30	60	1,4512	*
475	4	3	0,8	50	40	1,4301	*
475	4	3	0,8	70	50	1,4509	*

In de volgende paragrafen wordt van elke parameter geëvalueerd wat zijn invloed is op de verlenging van het rechte gedeelte.

Grafische voorstelling verlenging in functie van de spinformingparameters



Figuur 96: Verlenging in functie van de spinformingparameters

Conclusie verlenging in functie van de spinformingparameters

De verlenging is weergegeven op de y-as. Op de x-as is toerental, langsvoeding, stapgrootte, wanddikte, diameterreductie, conushoek en materiaalsoort aangegeven.

Er is een verband af te leiden tussen toerental en verlenging. Bij een laag toerental treedt er veel verlenging op. Bij een verhoging van het toerental tot 330 rpm is af te leiden dat er minder verlenging optreedt. Bij een verdere verhoging van het toerental is er weer een verlenging op te merken. De spreiding op de resultaten is echter slechts 1,5%, wat zeer weinig is. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het toerental geen invloed heeft op de verlenging.

Er is moeilijk een verband af te leiden tussen axiale voeding en verlenging. De curve vertoont een onregelmatig verloop. Zo is er bij lage voeding (2 mm/rev) een grote verlenging terwijl bij een gemiddelde voeding (3 mm/rev) een beperkte verlenging optreedt. Bij een verder verhoging van de voeding treedt weer een grotere verlenging op. Op basis van deze resultaten er is dus geen verband te vinden tussen de axiale voeding en de verlenging.

Tussen de stapgrootte en verlenging vertoont de curve een lineair verband. Wanneer de stap vergroot van 2 mm per pas naar 4 mm per pas neemt de verlenging toe. Dit is logisch, want wanneer de stapgrootte stijgt, zal er meer materiaal per pas moeten vervormen. Dit is een verwacht resultaat.

De invloed van de startwanddikte is moeilijk een besluit te trekken aangezien er slechts enkel twee startwanddikten zijn getest, namelijk 1,2 mm en 1,5 mm.

Het verband tussen de diameterreductie en de verlenging vertoont een logisch verloop. Wanneer de diameterreductie stijgt, neemt ook de verlenging toe. Dit is logisch aangezien er meer passen uitgevoerd worden om de reductie te bekomen. Hierdoor zal het materiaal ook meer moeten vervormen wat zorgt voor meer verlenging.

Er is een verband af te leiden tussen de conushoek en de verlenging. De conushoek heeft geen effect op de verlenging aangezien de meetwaarden voor de verlenging bij de drie conushoeken ongeveer gelijk zijn.

Uit de materiaalcurve kan geconcludeerd worden dat materiaal 1.4301 een grote verlenging ondergaat terwijl materiaal 1.4509 en 1.4512 minder onderhevig zijn aan verlenging. 1.4509 ondergaat iets minder verlenging dan 1.4512 deze beide staalsoorten hebben een ferritische microstructuur. Terwijl 1.4301 een austenitisch roestvrij staal is.

Met behulp van de Taguchi-analyse kan een ranking gemaakt worden van de invloedparameters. De invloedparameter met ranking 1 heeft het meeste invloed op de verlenging terwijl de invloedparameter met ranking 6 heeft het minste invloed op de verlenging. Tabel 5 geeft een overzicht van de ranking van de parameters.

Tabel 5 Overzicht ranking parameters verlenging

Parameter	Ranking
Reductie (mm)	1
Stap (mm)	2
Axiale voeding (mm/rev)	3
Materiaal	4
Toerental (rpm)	5
Wanddikte (mm)	6
conushoek (°)	7

Samenvattende conclusie van verlenging in functie van de spinformingparameters

Bij een grotere wordende (2 mm tot 4 mm) stapdiepte treedt er meer verlenging op. Dit is ook het geval wanneer de diameterreductie toeneemt van 20 mm naar 70 mm. Ook vertoont het austenitsche materiaal 1.4301 het meeste verlenging ten opzicht van de ferritsche materialen 1.4509 en 1.4512. De grafiek van conushoek en toerental verloopt zeer constant dit wijst erop dat het toerental geen invloed heeft op de verlenging. Uit de andere grafieken (bewerkingssnelheid, wanddikte, axiale voeding) is moeilijk een verband af te leiden met behulp van de Taguchi-analyse. Figuur 97 is een buis te zien vormgeven met *spin forming* met behulp van de Taguchi analyse.



Figuur 97: Buis $\varnothing 124$ mm met reductie 50 mm en conushoek 50°

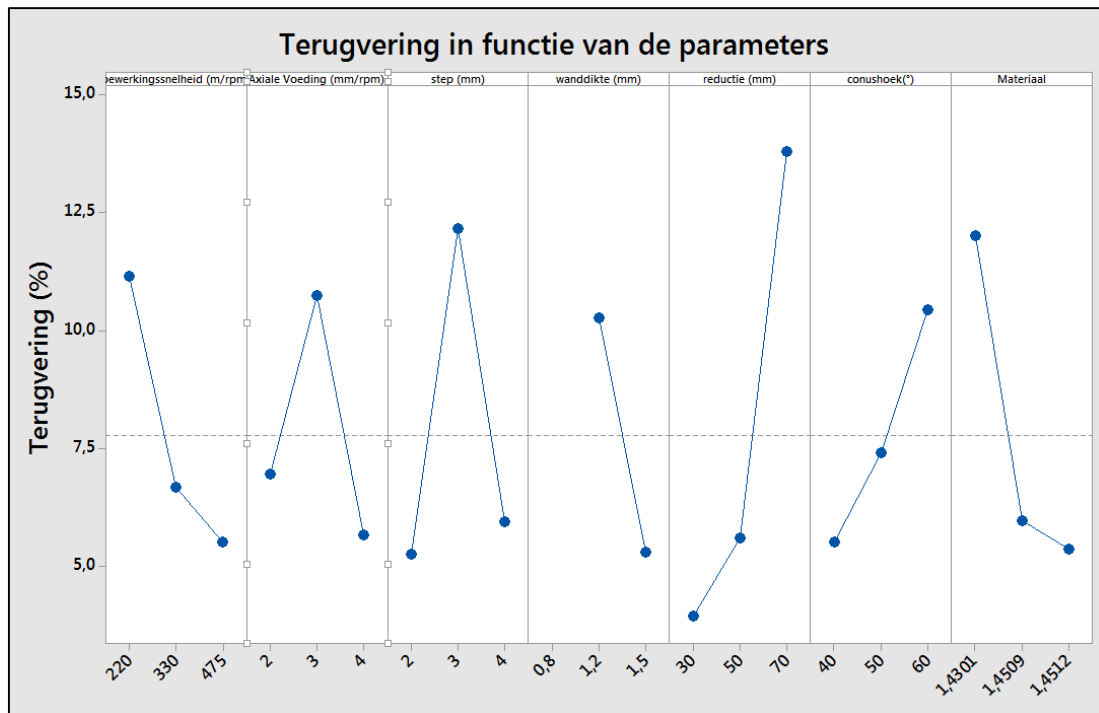
5.2.1.3 Analyse van de terugvering in functie van de spinformingparameters

Tabel 6: Analyse terugvering in functie van de spinformingparameters

Toerental	Axiale Voeding	Stap	Wanddikte	Reductie	Conus-hoek	Materiaal	Terugvering
rpm	mm/rev	mm	mm	mm	°	EN	%
220	2	2	0,8	30	40	1,4509	*
220	2	2	0,8	50	50	1,4512	*
220	2	2	0,8	70	60	1,4301	*
220	3	3	1,2	30	40	1,4509	3,36
220	3	3	1,2	50	50	1,4512	9,63
220	3	3	1,2	70	60	1,4301	39,26
220	4	4	1,5	30	40	1,4509	3,09
220	4	4	1,5	50	50	1,4512	2,71
220	4	4	1,5	70	60	1,4301	8,86
330	2	3	1,5	30	50	1,4301	6,42
330	2	3	1,5	50	60	1,4509	4,81
330	2	3	1,5	70	40	1,4512	9,56
330	3	4	0,8	30	50	1,4301	*
330	3	4	0,8	50	60	1,4509	*
330	3	4	0,8	70	40	1,4512	*
330	4	2	1,2	30	50	1,4301	6,99
330	4	2	1,2	50	60	1,4509	5,84
330	4	2	1,2	70	40	1,4512	6,46
475	2	4	1,2	30	60	1,4512	2,15
475	2	4	1,2	50	40	1,4301	4,96
475	2	4	1,2	70	50	1,4509	13,84
475	3	2	1,5	30	60	1,4512	1,69
475	3	2	1,5	50	40	1,4301	5,64
475	3	2	1,5	70	50	1,4509	4,84
475	4	3	0,8	30	60	1,4512	*
475	4	3	0,8	50	40	1,4301	*
475	4	3	0,8	70	50	1,4509	*

In de volgende paragrafen wordt van elke parameter geëvalueerd wat zijn invloed is op de terugvering van het rechte gedeelte.

Grafische voorstelling terugvering in functie van spinformingparameters



Figuur 98: Terugvering in functie van de spinformingparameters

Conclusie terugvering in functie van de spinformingparameters

Op de y-as is de terugvering weergegeven. Op de x-as zijn de parameters toerental, axiale voeding, stapgrootte, wanddikte, diameterreductie, conushoek en materiaalsoort weergegeven.

Het verband tussen toerental en terugvering is een dalende trend. Bij een lage bewerkingsnelheid (220 rpm) is er veel terugvering aanwezig. Terwijl er bij eens steeds groter wordende bewerkingsnelheid minder terugvering zal zijn. Dit verloop is het verloop wat verwacht werd uit de literatuurstudie.

Er is moeilijk een verband te vinden tussen de axiale voeding en de terugvering, de curve vertoont een onregelmatig verloop. Bij een voeding van 2 mm/rev is er beperkte terugvering. Bij een voeding van 3 mm/rev is er een zeer veel terugvering, terwijl er bij een voeding van 4 mm/rev weer een beperkte terugvering is. Op basis van deze resultaten kan er geen verband afgeleid worden tussen de axiale voeding en de terugvering.

Het is een zeer moeilijk een verband af te leiden tussen de stapgrootte en de terugvering. Deze curve vertoont een onregelmatig verloop. Met deze meetresultaten is er dus geen verband af te leiden tussen terugvering en stapgrootte.

Het verband tussen de wanddikte en terugvering is niet correct af te leiden, aangezien de buizen met wanddikte 0,8 mm niet konden getest worden.

Wanneer de diameterreductie toeneemt, neemt de terugvering ook toe. Dit is volledig wat er verwacht werd. Aangezien bij een stijgende reductie meer vervorming plaatsvindt, is er dus ook meer terugvering. Bij een reductie van 30 mm is er slechts een beperkte terugvering. Bij een reductie van 50 mm is er meer terugvering en bij een reductie van 70 mm is er veel terugvering aanwezig. De terugvering neemt dus lineair toe met de diameterreductie. Een zeer goede benadering van de terugvering is ongeveer 10 procent van de reductie.

De grafiek van de conushoek vertoont een stijgende trend. Bij een conushoek van 40° is er beperkte terugvering, bij een grotere conushoek (50°) is er meer terugvering en bij een conushoek van 60° is er nog meer terugvering aanwezig. Toch is het moeilijk te verklaren waarom de conushoek de terugvering van het rechte gedeelte beïnvloedt.

Het austenitische materiaal 1.4301 vertoont zeer veel terugvering terwijl de ferritische stalen 1.4509 en 1.4512 minder terugvering vertonen. 1.4512 vertoont op zijn beurt nog iets minder terugvering dan 1.4509.

Met behulp van de Taguchi-analyse kan een ranking gemaakt worden van de invloedparameters. De invloedparameter met ranking 1 heeft het meeste invloed op de terugvering terwijl de invloedparameter met ranking 6 heeft het minste invloed op de terugvering. Tabel 7 geeft een overzicht van de ranking.

Tabel 7 parameter ranking terugvering

Parameter	Ranking
Reductie (mm)	1
Stap (mm)	2
Materiaal	3
Toerental (rpm)	4
Axiale voeding (mm/rev)	5
Wanddikte (mm)	6
Conushoek (mm)	7

Samenvattende conclusie terugvering in functie van de spinformingparameters

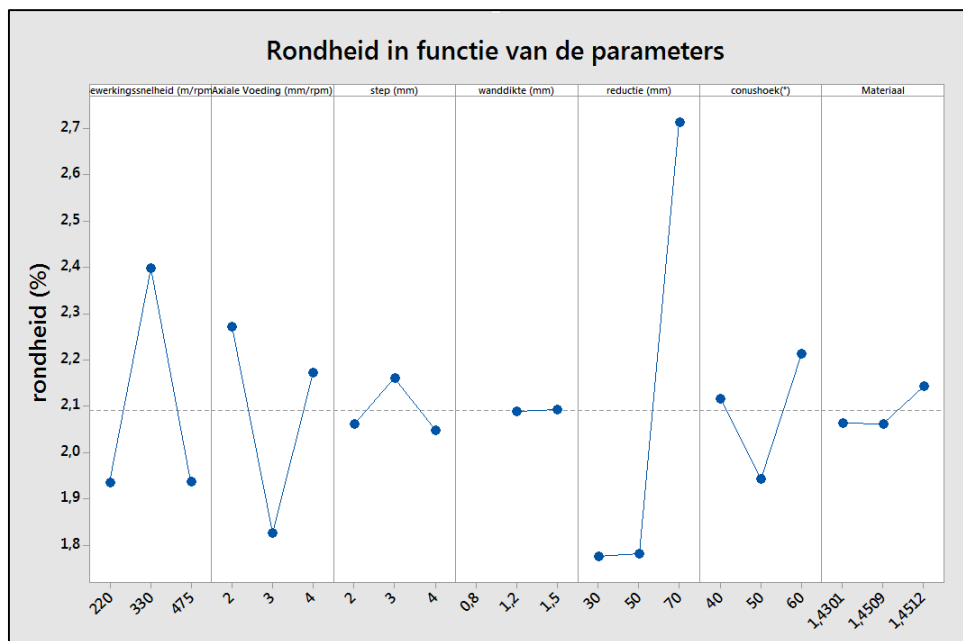
Er kan algemeen besloten worden dat wanneer het toerental toeneemt de terugvering afneemt. Daarnaast wordt besloten dat de terugvering toeneemt wanneer de diameterreductie en conushoek toenemen. Het austenitische roestvrije staal 1.4301 vertoont zeer veel terugvering terwijl de ferritische roestvrije staalsoorten 1.4509 en 1.4512 beperkte terugvering vertonen. Uit de andere grafieken (axiale voeding, stap en wanddikte) is moeilijk een verband af te leiden tussen terugvering en de verschillende spinformingparameters.

5.2.1.4 Analyse van de rondheid in functie van de spinformingparameters

Toerental	Axiale Voeding	stap	wanddikte	reductie	Conus-hoek	Materiaal	Rondheid
rpm	mm/rev	mm	mm	mm	°	EN	%
220	2	2	0,8	30	40	1,4509	*
220	2	2	0,8	50	50	1,4512	*
220	2	2	0,8	70	60	1,4301	*
220	3	3	1,2	30	40	1,4509	1,41
220	3	3	1,2	50	50	1,4512	1,51
220	3	3	1,2	70	60	1,4301	2,65
220	4	4	1,5	30	40	1,4509	1,83
220	4	4	1,5	50	50	1,4512	1,56
220	4	4	1,5	70	60	1,4301	2,66
330	2	3	1,5	30	50	1,4301	2,11
330	2	3	1,5	50	60	1,4509	1,85
330	2	3	1,5	70	40	1,4512	3,44
330	3	4	0,8	30	50	1,4301	*
330	3	4	0,8	50	60	1,4509	*
330	3	4	0,8	70	40	1,4512	*
330	4	2	1,2	30	50	1,4301	1,71
330	4	2	1,2	50	60	1,4509	2,52
330	4	2	1,2	70	40	1,4512	2,76
475	2	4	1,2	30	60	1,4512	2,02
475	2	4	1,2	50	40	1,4301	1,3
475	2	4	1,2	70	50	1,4509	2,92
475	3	2	1,5	30	60	1,4512	1,58
475	3	2	1,5	50	40	1,4301	1,96
475	3	2	1,5	70	50	1,4509	1,85
475	4	3	0,8	30	60	1,4512	*
475	4	3	0,8	50	40	1,4301	*
475	4	3	0,8	70	50	1,4509	*

In de volgende paragrafen wordt van elke parameter geëvalueerd wat zijn invloed is op de rondheid van het rechte gedeelte.

Grafische voorstelling van rondheid in functie van spinformingparameters



Figuur 99: Rondheid in functie van de spinformingparameters

Conclusie rondheid in functie van de spinformingparameters

De rondheid is weergegeven op de y-as. Op de x-as zijn bewerkingsnelheid, axiale voeding, stapgrootte, wanddikte, diameterreductie en wanddikte weergegeven.

Bij deze grafische voorstelling is voor elke parameter zeer moeilijk een verband uit af te leiden. De spreiding op de resultaten is zeer klein, altijd minder dan 1%. Deze kleine spreiding is verwaarloosbaar waardoor elke grafiek een rechte wordt. Het heeft dan ook weinig zin om deze grafiek te analyseren voor elke parameter. Er kan dus geconcludeerd worden dat toerental, axiale voeding, stapgrootte, diameterreductie, conushoek en materiaalsoort geen invloed hebben op de rondheid van het rechte gedeelte.

De buizen zijn ongeacht de spinformingparameters en startrondheid wel rond van vorm.

Met behulp van de Taguchi-analyse kan een ranking gemaakt worden van de invloedparameters. De invloedparameter met ranking 1 heeft het meeste invloed op de rondheid terwijl de invloedparameter met ranking 6 heeft het minste invloed op de rondheid. Tabel 8 geeft een overzicht van de ranking.

Tabel 8 Overzicht ranking parameters rondheid

Parameter	Ranking
Reductie (mm)	1
Toerental (rpm)	2
Axiale voeding (mm/rev)	3
Conushoek (°)	4
Stap (mm)	5
Materiaal	6
Wanddikte (mm)	7

5.2.2 Analyse van handmatige testen

In dit deel worden de handmatige testen besproken. Er werd een test uitgevoerd waarbij de axiale voeding, bewerkingsnelheid, stap, reductie en conushoek stelselmatig verhoogd wordt.

5.2.2.1 Analyse van test waarbij de axiale voeding verhoogd wordt

Bij deze test is de axiale voeding stelselmatig verhoogd van 2 mm/rev tot 5 mm/rev. De andere spinformingparameters worden vast gekozen. Het toerental is 330 rpm, de stapgrootte is 2 mm, de wanddikte is 1,2 mm, de diameterreductie is 70 mm, de conushoek is 40° en de materiaalsoort is 1.4512. De eindproducten zijn zichtbaar in Figuur 100.

Tabel 9: Procesparameters test verhoging van axiale voeding

Buis ID	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Stap (mm)	Wanddikte (mm)	Reductie (mm)	Conus-hoek (°)	Materiaal
29A18	330	2	3	1,2	70	40	1,4512
94B18	330	3	3	1,2	70	40	1,4512
97B18	330	4	3	1,2	70	40	1,4512
92B18	330	5	3	1,2	70	40	1,4512

Tabel 10: Meetresultaten test verhoging axiale voeding

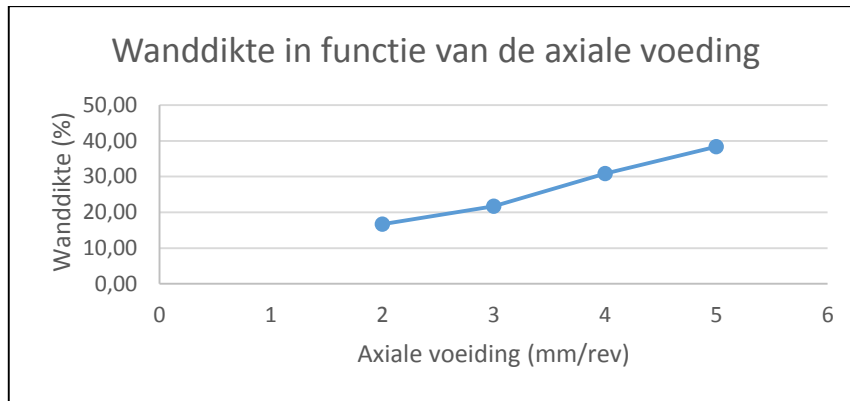
Buis ID	Startlengte (mm)	Verlenging (mm)	Procentuele verlenging (%)	Wanddikte gereduceerd gedeelte (mm)	Procentuele wanddikteverandering (%)	Diameter gemiddeld (mm)	Procentuele rondheid (%)	Diameter gemiddeld (mm)	Rondheid (mm)	Procentuele rondheid (%)	Terugvering (mm)	Procentuele terugvering (%)
29a18	153,5	13,5	8,79	1,4	17	70.761	3,6	124.113	1.155	0,93	16,8	23,7
92b18	153,8	15,1	9,82	1,8	50	60.757	3,1	124.167	1.333	1,07	6,8	11,1
94b18	153,6	16,5	10,7	1,6	33	59.887	2,4	124.157	1.123	0,90	5,9	9,8
97b18	153,6	16	10,4	1,5	25	60.352	2,0	124.140	1.315	1,06	6,4	10,5



Figuur 100: Overzichtsfoto buizen met stijgende axiale voeding

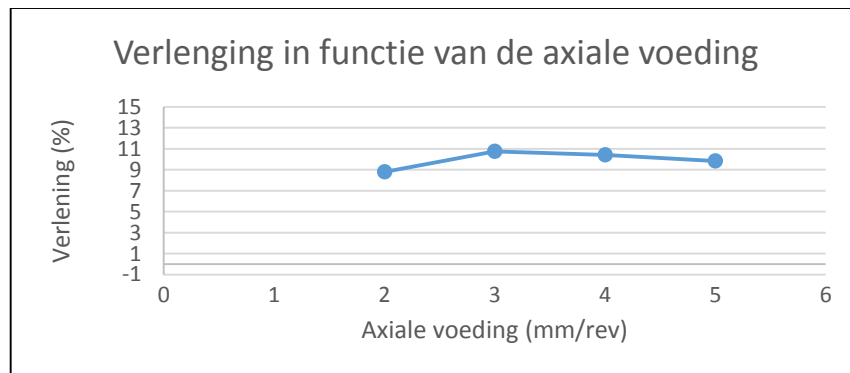
Analyse van de meetresultaten

Uit de grafiek van Figuur 101 kan afgeleid worden dat wanneer de axiale voeding toeneemt van 2 mm/rev tot 5 mm/rev, de wanddikte ook stelselmatig stijgt.



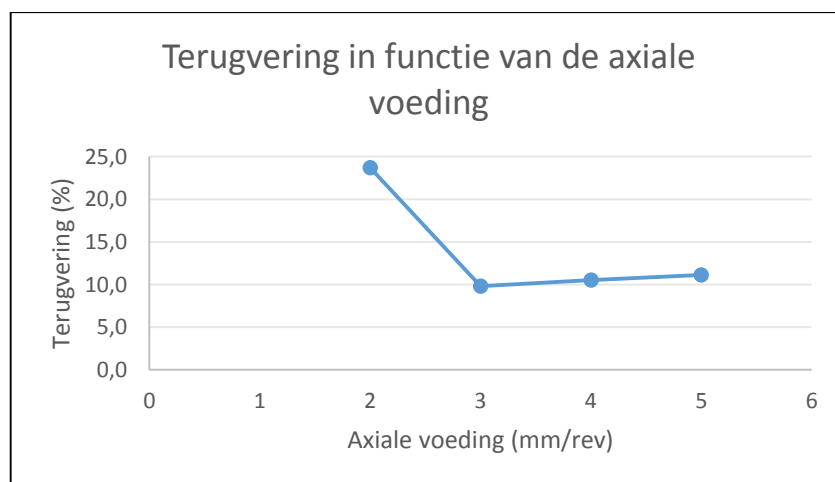
Figuur 101: Wanddikte in functie van axiale voeding

Uit de grafiek van Figuur 102 volgt dat de axiale voeding weinig invloed heeft op de verlenging, omdat het verschil tussen de kleinste en de grootste meetwaarde slechts 2 % bedraagt.



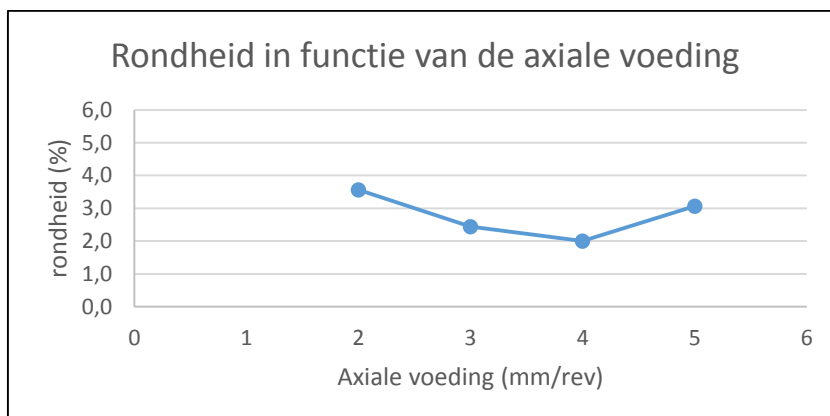
Figuur 102: Verlenging in functie van axiale voeding

Uit de grafiek van Figuur 103 is af te leiden dat er bij een axiale voeding van 2 mm/rev zeer veel terugvering plaats vindt. Terwijl de terugvering bij voeding 3, 4 en 5 mm/rev ongeveer is. Er is wel een licht stijgende trend naar 5 mm/rev. Er is geen verklaring te vinden tussen de terugvering en de axiale voeding.



Figuur 103: Terugvering in functie van axiale voeding

Uit de grafiek van Figuur 104 is af te leiden dat de rondheid het beste is bij een voeding van 3 mm/rev tot 4 mm/rev. Deze resultaten zijn zeer twijfelachtig omdat de rondheid afhankelijk is van vele factoren zoals hierboven besproken. De spreiding op de resultaten is zeer klein waaruit geconcludeerd kan worden dat de axiale voeding weinig invloed heeft op de rondheid.



Figuur 104: Rondheid in functie van axiale voeding

Algemene conclusie bij test met stijgende axiale voeding

Een verhoging van de axiale voeding heeft invloed op de wanddikte. Als de axiale voeding stijgt dan zal de wanddikte ook stijgen. Verder wordt besloten dat de axiale voeding geen invloed heeft op de verlenging en de rondheid. Het verband tussen de terugvering is moeilijk af te leiden uit de grafieken van de meetresultaten en is zo goed als verwaarloosbaar.

5.2.2.2 Analyse van test waarbij het toerental stijgt

Bij deze test werd het toerental stelselmatig verhoogd van 220 rpm tot 550 rpm. De overige parameters bleven constant. De axiale voeding is 2 mm/rev, de stapdiepte is 2 mm, de wanddikte is 1,2 mm, de diameterreductie is 20 mm, de conushoek is 40° en het materiaal is 1.4509.

Tabel 11: Procesparameters van test verhoging van de bewerkingsnelheid

Buis ID	toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Stap (mm)	Wanddikte (mm)	Reductie (mm)	Conus (°)	Materiaal EN
33a4	330	2	2	1,2	20	40	1,4509
87a4	400	2	2	1,2	20	40	1,4509
88a4	550	2	2	1,2	20	40	1,4509
91a4	220	2	2	1,2	20	40	1,4509
89a4	475	2	2	1,2	20	40	1,4509

Tabel 12: Meetresultaten verhoging van de bewerkingssnelheid

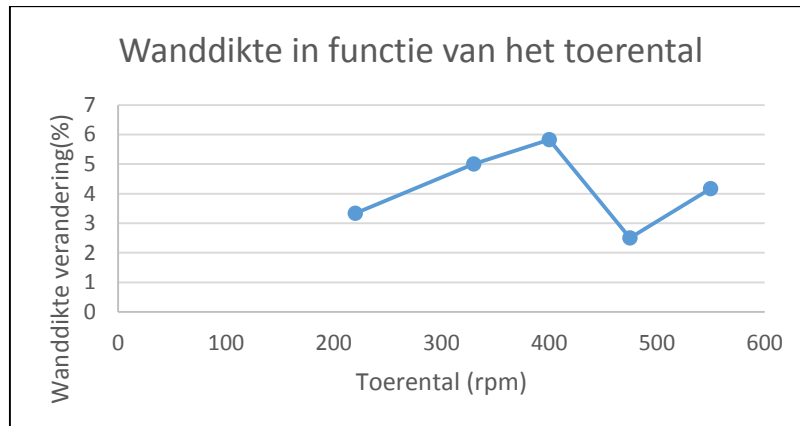
Buis ID	Startlengte (mm)	Verlenging (mm)	Lengte gereduceerd gedeelte (mm)	Procentuele verlenging (%)	Wanddikte gereduceerd gedeelte (mm)	Procentuele wanddikteverandering (%)	Procentuele rondheid (%)	Diameter gemiddeld (mm)	Rondheid (mm)	Procentuele rondheid (%)	Terugvering (mm)	Procentuele terugvering (%)
33a4(2)	146,3	0,5	17	0,34	1,26	5	1,44	124.160	1.379	1,11	3,41	3,18
87a4(2)	146,2	1,5	17	1,03	1,27	5,8	1,54	124.168	1.139	0,92	3,36	3,13
88a4(2)	147,2	2,7	18	1,83	1,25	4,2	1,47	124.197	1.356	1,09	3,53	3,29
91a4(2)	146	1,7	18	1,16	1,24	3,3	1,39	124.129	1.258	1,01	3,34	3,11
89a4(2)	147,5	2,9	19	1,97	1,23	2,5	1,37	124.189	1.490	1,20	3,54	3,29



Figuur 105: Overzichtsfoto verhoging van de bewerkingssnelheid

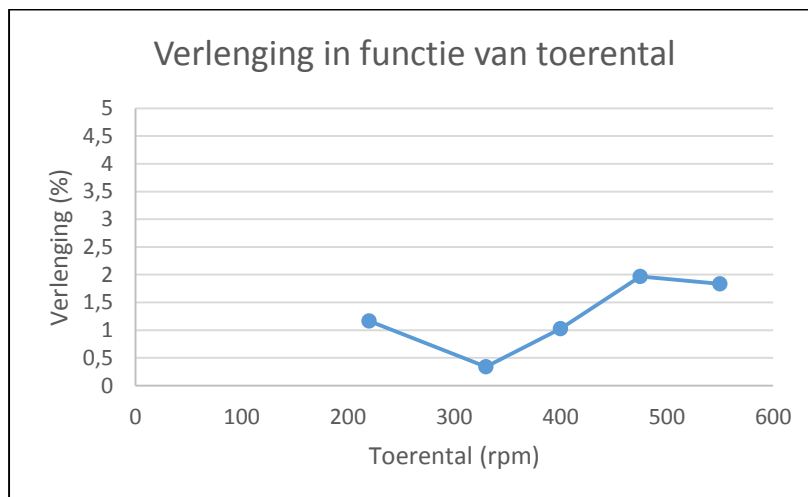
Analyse van de meetresultaten

Uit de grafiek van Figuur 106 wordt een zeer onregelmatig verloop afgeleid. Vanaf een toerental van 220 rpm tot 400 rpm is er een stelselmatige stijging van de wanddikte, daarna een daling bij 475 rpm vervolgens stijgt de grafiek weer bij een toerental van 550 rpm. Er moet opgemerkt worden dat de spreiding op de meetresultaten slechts 2,8% is, dit is zeer weinig. Daarom is het besluit dat het toerental weinig invloed heeft op de wanddikteverandering.



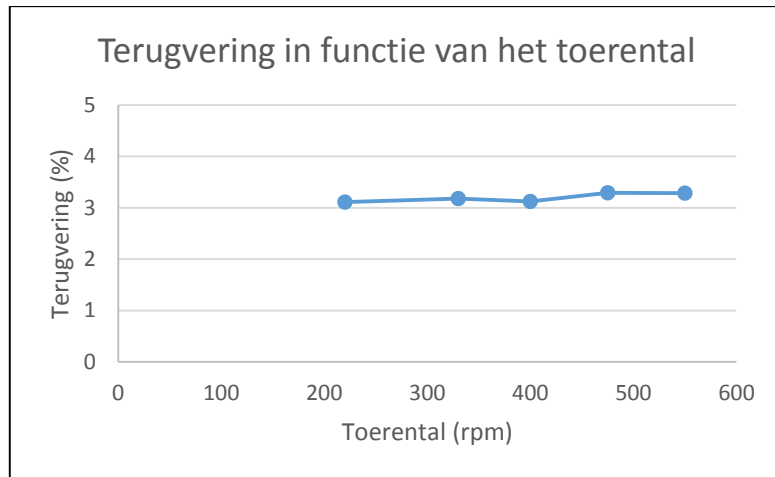
Figuur 106: Wanddikteverandering in functie van toerental

Op de grafiek van Figuur 107 vertoont de verlenging ook een zeer onregelmatig verloop op het eerste zicht. De spreiding tussen de resultaten is echter slechts 1,62% wat zeer weinig is. Er kan dus besloten worden dat het toerental weinig invloed heeft op de verlenging.



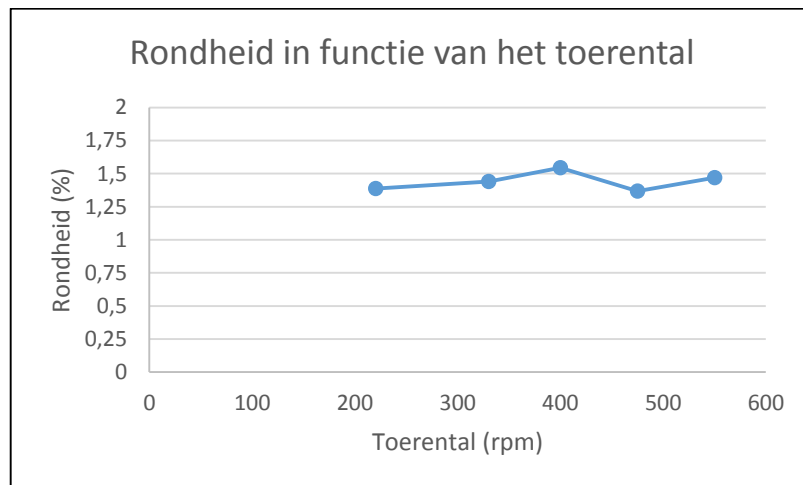
Figuur 107: Verlenging in functie van toerental

De grafiek van Figuur 108 vertoont een regelmatig verloop, de spreiding is zeer klein, minder dan 0,2%. Dit is zeer weinig, daarom kan er dus geconcludeerd worden dat een verhoging van het toerental geen invloed heeft op de terugvering van het rechte gedeelte.



Figuur 108: Terugvering in functie van toerental

De rondheid is een zeer moeilijke factor om te meten. Hierbij wordt de rondheid vergeleken met de gemiddelde diameter van het vervormde deel. Hierop bevinden zich dus een aantal onzekerheden. Er kan echter wel opgemerkt worden dat het verschil in rondheid slechts zeer klein is in ten opzichte van elkaar. De grafiek van Figuur 109 vertoont een vrij constant verloop waaruit afgeleid wordt dat het toerental geen invloed heeft op de rondheid.



Figuur 109 rondheid in functie van het toerental

5.2.2.3 Analyse van een test waarbij breuk optrad

Deze test is uitgevoerd op buizen met een diameter van 124. Hierbij werd het toerental opgevoerd van 330 rpm naar 475 rpm. De andere procesparameters zijn axiale voeding 4 mm/rev, diameterreductie 70 mm, conushoek 60° en stapgrootte 4 mm. De specificaties van de buis zijn: wanddikte 1,2 mm en materiaalsoort 1.4301.

Tabel 13: Procesparameters bij testen waarbij de las brak

Buis ID	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Stap (mm)	Wanddikte (mm)	Reductie (mm)	Conus (°)	Materiaal EN
5C6	330	4	2	1,2	70	60	1,4301
17C6	475	4	2	1,2	70	60	1,4301

Bij deze test zijn er geen meetresultaten beschikbaar omdat bij buis 5C6 de las het begeven heeft en bij buis 17C6 zijn er scheuren ontstaan. Hieruit wordt geconcludeerd dat de diameterreductie 70 mm, stapgrootte 2 mm, axiale voeding 4 mm/rev, conushoek 60° en omwentelingsnelheid 330 rpm en 475 rpm niet gerealiseerd kan worden. Het falen van buis 5C6 is te wijten aan de laskwaliteit. De buis was laser gelast en deze las was van zeer lage kwaliteit. Buis 17C6 was TIG-gelast. Hier is het falen ontstaan door de grote vervorming en conushoek. De scheur is ontstaan bij reductie 61 mm.

Deze twee buizen zijn weergegeven op Figuur 110. Wanneer de buis bij het vervormen op het vrij uiteinde steeds verder open gaat staan heeft het proces een grote kans op falen, hierdoor gaat de las gemakkelijk defect en ontstaan er rimpels en scheuren. De oorzaak van het scheuren is te wijten aan het feit dat het rechte gedeelte te lang was waardoor dit teveel trillingen met zich meebracht waardoor de buis gebroken is enerzijds en anderzijds door het gebruikte materiaal 1.4301 wat zeer moeilijk te vervormen is met behulp van *spin forming*.



Figuur 110: Buizen 5C6 (links) en 17C6 (rechts)

5.2.2.4 Conclusie handmatige testen

De invloed van de stap, diameterreductie en conushoek op wanddikte, verdikking, terugvering, verlenging en rondheid is niet individueel achterhaald kunnen worden. Dit komt enerzijds door het feit dat er te weinig buizen beschikbaar waren en anderzijds door de hoeveelheid buizen die defecten vertonen tijdens het testen. Deze defecten waren enkel defecten te wijten aan de slechte laser gelaste buizen. Het ging om de buizen gemaakt tijdens de eerste oplage van het lassen bij de firma Schnelldorfer. Deze laser was niet optimaal voor het lassen van wanddikte 1,2 en 1,5 mm, het vermogen (900 W) van de laser was te beperkt. Vanaf de eerste bewerkingsstap brak de las al door. Deze conclusies zijn niet alleen voortgekomen uit de meetresultaten maar ook uit de bevindingen opgedaan tijdens de testen.

5.2.3 Algemene conclusie spin forming diameter 124 mm

Een eerste conclusie die getrokken kan worden is dat het spinnen van materiaal met een wanddikte van 0,8 mm niet mogelijk is met deze opstelling en machine. Dit is zowel duidelijk geworden bij diameter 85 mm als bij diameter 124 mm. Vanaf een reductie van 15 mm treden er onvermijdelijk rimpels op. De wanddikte 1,2 mm en 1,5 mm geven geen problemen bij het spinnen mits deze buizen goed gelast zijn. Wanddikte 1,5 mm is beter te spinnen dan wanddikte 1,2 mm. Bij wanddikte 1,5 mm treden er minder snel rimpels op dan wanddikte 1,2 mm. Dit is te wijten dat buizen met een wanddikte van 1,5 mm stabiel/stijver zijn tijdens het vervormingsproces en omdat deze buizen beter bestand zijn tegen de warmte die ontwikkeld wordt tijdens het proces. Een zeer belangrijke parameter is de laskwaliteit.

Het is mogelijk om materialen 1.4301, 1.4512 en 1.4509 te spinnen. Er is echter een belangrijke opmerking bij te maken. TIG-gelaste buizen van materiaal 1.4512 en 1.4509 kunnen vorm gegeven worden door middel van *spin forming*. Voor laser gelaste buizen is een andere conclusie te trekken. Materiaal 1.4301 is niet mogelijk te spinnen wanneer de buis laser gelast is. Elke laserlas van materiaal 1.4301 brak al vanaf de eerste vervormingspas. De laser gelaste materialen 1.4512 en 1.4509 kunnen probleemloos gespind worden.

Het spinnen van materiaal 1.4301 verloopt niet optimaal. Het materiaal is moeilijk te vervormen met *spin forming*, want enkel bij dit materiaal treden er scheuren op bij de overgang van de conus naar het rechte gedeelte.

Wanneer het rechte gedeelte te lang wordt resulteert dit in een defect. Dit is ofwel een falen in de las, ofwel vertonen zich rimpels op de omtrek van de buis. Het vertonen van rimpels komt door twee fenomenen namelijk, het rechte gedeelte wordt te lang waardoor er trillingen ontstaan in de buis. Hierdoor is de opspanning niet meer stabiel en ontstaat kreukelvorming. Een ander fenomeen is het feit dat het rechte gedeelte conisch is naar het vrije uiteinde toe.

Hierdoor ontstaan er grote krachten op de buis wat resulteert in rimpels, breuk van de las op het uiteinde en het scheuren van de buis ter hoogte van de conus.

Het besluit van de diameterreductie is dat een reductie van 80 mm op diameter 124 mm mogelijk is. Dit is wel het absolute maximum want op het einde van het proces vertoont de las scheuren op het vrije uiteinde, omdat de las bij het vervormen steeds smaller wordt. Een belangrijk aandachtspunt bij grote reductie is het feit dat het rechte gedeelte niet te lang wordt. Daarom wordt er geadviseerd om de buis op de juiste lengte te maken en gebruik te maken van de verlenging die optreedt tijdens het proces.

Wanneer de reductie toeneemt, stijgt de terugvering ook. Over het algemeen moet er rekening gehouden worden met een terugvering van 10% van de reductie. Daarnaast stijgt de verlenging als de reductie toeneemt.

In geval van de conushoeken kan er besloten worden dat een conushoek tot 60° mogelijk is. Bij een conushoek van 60° treedt er zodanige verdunning in de wand van de conus dat dit het absolute maximum is. Dit is bekomen vanuit onze eigen bevindingen en vanuit de literatuurstudie. Conushoeken van 40° en 50° geven zeer goede resultaten met betrekking tot wanddikte van de conus. Wanneer de conushoek toeneemt, zal de terugvering ook toenemen.

Een stapdiepte van 4 mm is het maximum. Wanneer een stap van 5 mm gebruikt wordt, zullen er rimpels ontstaan op de omtrek van de buis. Wanneer de stap toeneemt, stijgt zowel de verlenging en de wanddikte van het rechte gedeelte.

De axiale voeding en rotatiefrequentie zijn onderling met elkaar verbonden. We hebben zeer goede resultaten verkregen met een axiale voeding 4 mm/rev en een toerental van 475 rpm. Ook is er een voeding van 5 mm/rev gebruikt deze gaf echter geen goede resultaten omdat de stapgrootte te groot werd. Het vervormen op hogere snelheden (> 650 rpm) is ook mogelijk, bij deze toepassingen is het klemmen van de buis een zeer belangrijke parameter. Wanneer de klemming optimaal is zullen er weinig defecten optreden en kan er op hoge snelheden vervormd worden.

Het is ook van groot belang dat er zo dicht mogelijk tegen de klemmen vervormd wordt. Wanneer het gereedschap op een relatief grote afstand van de klemmen vervormt, resulteert dit in rimpels. Dit komt door de trillingen die ontstaan in de buis omwille van daling van de stijfheid en trillingen in de opspanning.

5.3 Resultaten testen diameter 156 mm

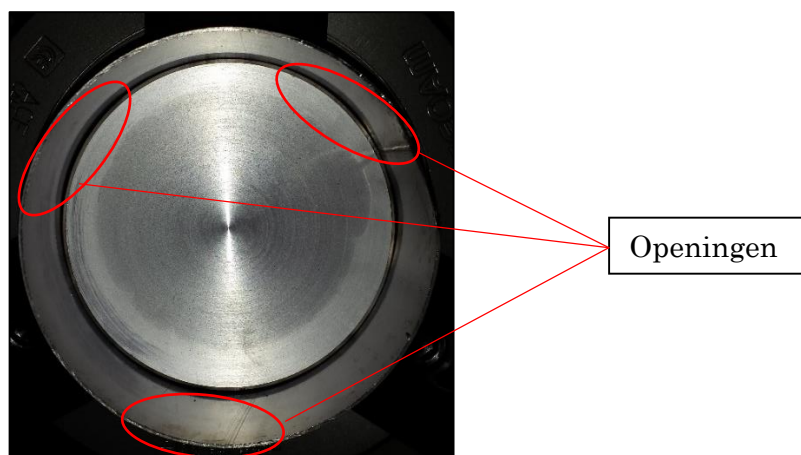
Bij de testen van diameter 156 mm zijn er testen uitgevoerd op drie materialen (1.4301, 1.4509 en 1.4512). Hierbij is er echter gekozen voor één reductie namelijk 80 mm en één conushoek 50°. Bij deze testen is er uitvoerig getest wat de invloed is van de axiale voeding in (mm/rev) en het toerental (rpm). Zo zijn er testen uitgevoerd op wanddikte 1,2 en 1,5 mm. Bij diameter 156 mm zijn er een deel buizen niet gebruikt. Enerzijds omdat deze van wanddikte van 0,8 mm waren en dus steeds krekten. Anderzijds omdat het buizen van de eerste laserlas oplage waren en dus een slechte laskwaliteit hadden. Deze lassen begeven het reeds na de eerste vervormingsstap.

5.3.1 Diameter 156 mm en wanddikte 1,2 mm

Er waren geen buizen van materiaal 1.4301 en wanddikte 1,2 mm. Er waren slechts twee buizen van materiaal 1.4509 en wanddikte 1,2 mm. Dus zijn er enkel besluiten getrokken bij wanddikte 1,2 mm op materiaal 1.4512. Er is enkel een analyse gemaakt door een verhoging van de axiale voeding wegens het beperkt aantal bruikbare buizen.

5.3.2 Test verhoging van de axiale voeding

Bij deze test was er een klemprobleem aangezien voor deze buizen dezelfde klemmen werden gebruikt als bij buizen van diameter 124 mm. Het klemoppervlak was dus kleiner in verhouding tot buizen met diameter 124 mm. Anderzijds werd voor de kern in de buis, een kern gebruikt die korter was dan deze bij buizen van diameter 124. De kern was slechts 70 mm lang terwijl deze bij buizen van diameter 124 mm 80 mm lang was. 80 mm is ook de lengte van de klemmen. Ook was de diameter van de kern niet optimaal waardoor er zich openingen bevinden tussen de kern en de binnenwand van de buis. Dit is te zien op Figuur 111. Wanneer deze openingen ontstaan, verloopt het spinformingproces zeer onregelmatig en vergroot de kans op falen.



Figuur 111: Openingen tussen kern en buis

Wanneer de ruimte tussen de kern en de buis te groot wordt verloopt de eerste spinformingpas zeer onregelmatig. De buis raakt het gereedschap dan slechts op de drie plaatsen die niet binnen de klemmen zitten. Er ontstaan dan drie afdrukken over het buisoppervlak omdat het gereedschap op sommige plaatsen wel en op andere plaatsen niet vervormt. Dit is te zien op Figuur 112 en werkt het vormen van defecten zoals rimpels en breken van de las in de hand.



Figuur 112: Onregelmatige vervorming

Rimpels ontstaan enkel in de beginfase van het vervormen. De beginfase is dus een zeer cruciale fase tijdens vervormen, wanneer deze fase wordt doorstaan dan zal het vervormen veel kans op slagen hebben. Dit geldt zowel voor diameter 85 mm, 124 mm als 156 mm en bij wanddikte 1,2 en 1,5 mm. Vanaf een diameterreductie van 20 mm treden er zelden rimpels op. Dit is te wijten aan feit dat de buis een bepaalde temperatuur bereikt en dus gemakkelijker kan vervormen.

Bij de testen diameter 156 mm en wanddikte 1,2 mm waren er dit soort klemproblemen. Wanneer er werd vervormd op hoge toerentallen (> 500 rpm) vertoont het proces defecten zoals rimpels. Op lage toerentallen (< 500 rpm) lukt het spinformingproces wel nog, omdat de onregelmatige/licht gekreukte structuur er rustig uitgewerkt wordt. Wanneer buizen met rimpels op een lage toerental opnieuw vervormd worden zullen deze rimpels er gelijkmatig uitgewerkt worden.

5.3.2.1 Procesparameters verhoging van de axiale voeding

Tabel 14: Procesparameters verhoging axiale voeding

Buis ID	Buisdiameter (mm)	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Radiale voeding (mm/rev)	Stapdiepte (mm)
27a20	156	1,2	50	1,4512	80	260	4	1	4
28c17	156	1,2	50	1,4512	80	260	2	1	4
27b5	156	1,2	50	1,4512	80	260	3	1	4

5.3.2.2 Meetresultaten verhoging van de axiale voeding

Tabel 15: Meetresultaten verhoging axiale voeding

Buis ID	Startlengte (mm)	Verlenging (mm)	Lengte recht gedeelte (mm)	Procentuele verlenging (%)	Wanddikte recht gedeelte (m)	Diameter gemiddelde (mm)	Rondheid (mm)	Terugvering (mm)	Procentuele terugvering (%)
27a20	144,4	10,3	15	7,13	1,6	84.756	1.973	8,76	10,33
28c17	142,2	6,5	10	4,57	1,8	84.296	2.290	8,30	9,84
27b5	144,2	7,4	10	5,13	1,6	85.125	2.459	9,13	10,72

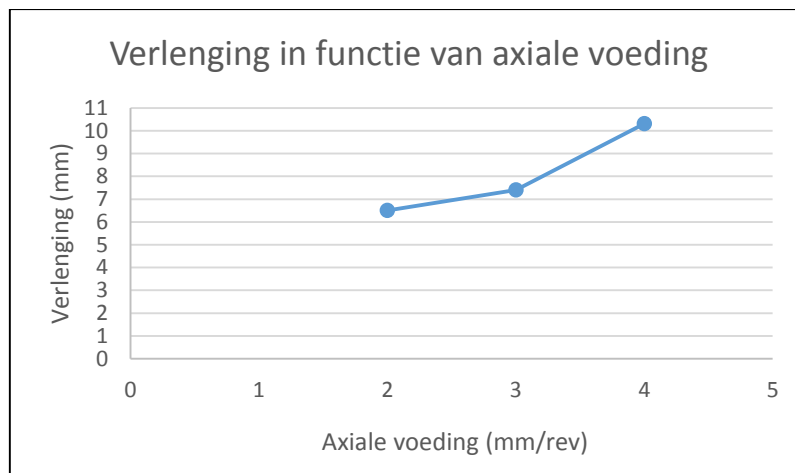
5.3.2.3 Analyse van de meetresultaten

De verlenging, wanddikte, terugvering en rondheid van het recht gedeelte werd onderzocht. Hierbij is de rondheid, wanddikte, terugvering en verlenging uitgedrukt in mm. Tevens worden terugvering en verlenging ook uitgedrukt in procenten zodat deze relatief worden bekeken ten opzichte van de beginsituatie.

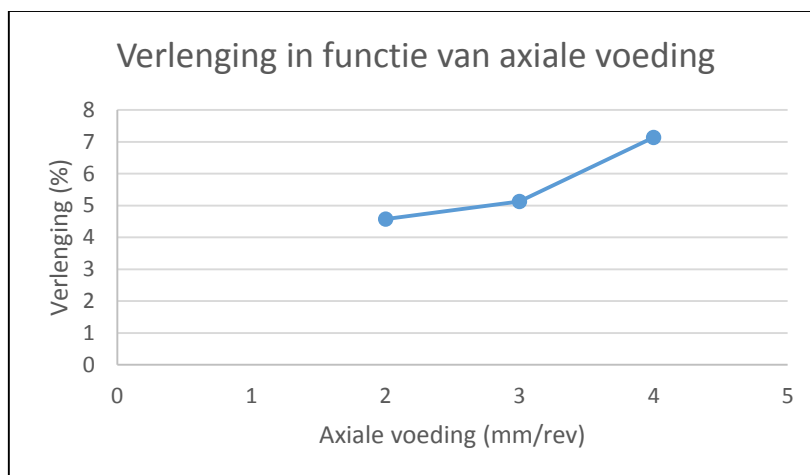
Verlenging

Op de grafieken van Figuur 113 en Figuur 114 kan afgeleid worden dat het rechte gedeelte verlengt bij een stijging van de axiale voeding. Bij een axiale voeding van 2 mm/rev is er een verlenging van 6,5 mm terwijl bij een axiale voeding van 3 mm/rev een verlenging is van 7,4 mm. Bij een voeding van 4 mm/rev is er een verlenging van 10,4 mm. In procent wilt dit zeggen dat er bij een axiale voeding van 2 mm/rev een verlenging van 4,57% optreedt en bij een voeding van 4 mm/rev is de verlenging 7,13 %.

Algemene conclusie: wanneer de axiale voeding stijgt, dan stijgt de lengte van het rechte gedeelte ook. Wanneer het rechte gedeelte te lang is, begeeft de las het begeven of treden er rimpels op. Om deze defecten te vermeiden moet de lengte van het rechte gedeelte beperkt worden.



Figuur 113: Verlenging in functie van axiale voeding

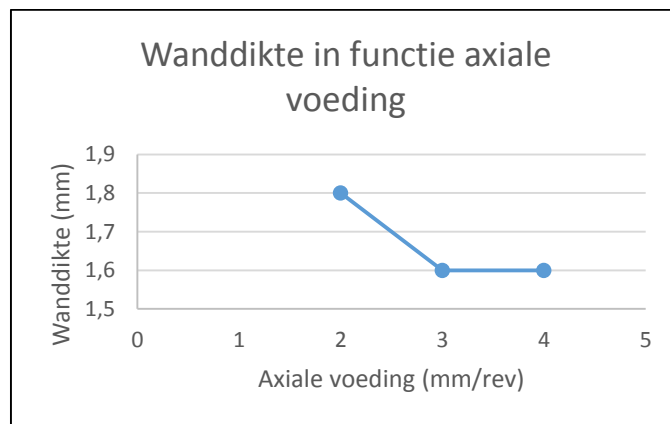


Figuur 114: Procentuele verlenging in functie van axiale voeding

Wanddikte

Op de grafiek van Figuur 115 is de wanddikte uitgezet in functie van de axiale voeding. Hier is het zeer moeilijk om juiste conclusies te trekken, omdat de wanddikte van het rechte gedeelte een zeer lokaal variërende factor is. Er is bijvoorbeeld een dikteverschil van 0,15 mm tussen twee opeenvolgende metingen op 1 mm van elkaar. Door deze variatie kunnen de meetpunten van de verschillende testen niet met elkaar vergeleken worden.

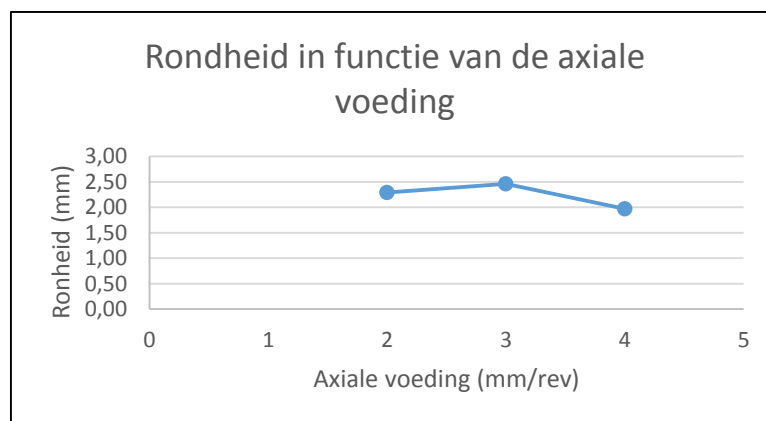
Om de wanddikte nauwkeuriger te bepalen zijn er wanddikteprofielen opgemeten op open gezaagde buizen. Deze wanddikteprofielen worden in paragraaf 5.4 besproken.



Figuur 115: Wanddikte in functie van de axiale voeding

Rondheid

Het zeer moeilijk om conclusies te trekken over de rondheid van het rechte gedeelte. De rondheid is in eerste instantie afhankelijk van de beginrondheid van de buis, van de terugvering van het recht gedeelte en van de klemming. Het valt wel op dat de spreiding op de resultaten uitermate klein is. Er wordt dus geconcludeerd dat de axiale voeding geen invloed heeft op de op de rondheid van het rechte gedeelte. Dit is te zien op de grafiek van Figuur 116.

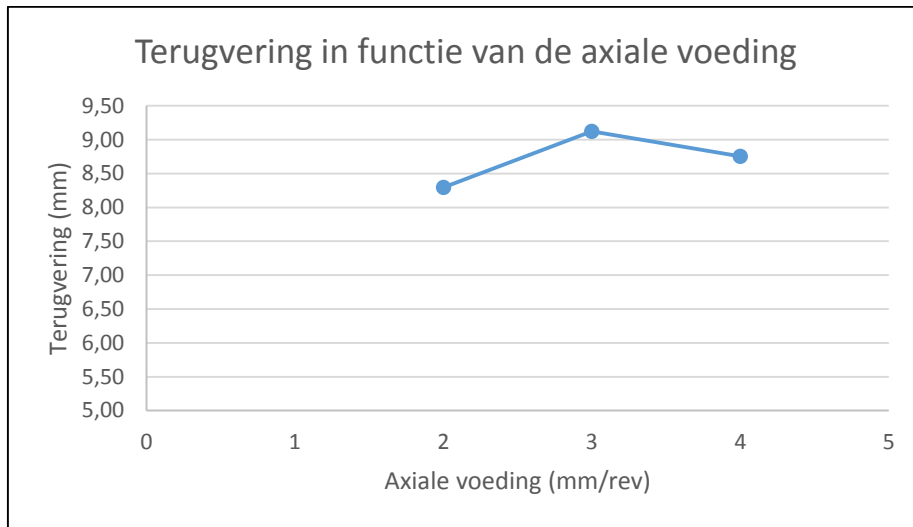


Figuur 116: Rondheid in functie van de axiale voeding

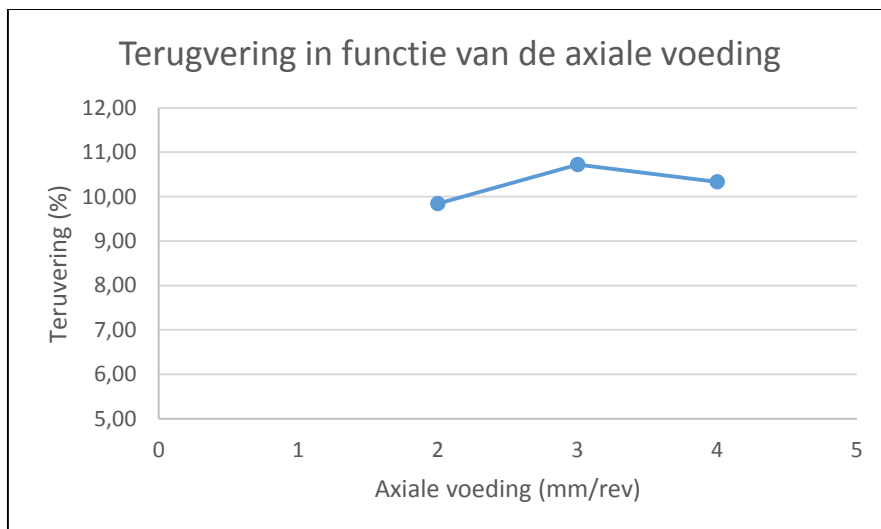
Terugvering

Uit Figuur 117 en Figuur 118 volgt dat de spreiding tussen de resultaten zeer klein is namelijk, voor een voeding van 2 mm/rev bedraagt de terugvering 8,3 mm. Bij een axiale voeding van 3 mm/rev bedraagt de terugvering 9,13 mm en als de axiale voeding 4 mm/rev is, bedraagt de terugvering 8,76 mm. De grafiek vertoont dus een vrij constant verloop. De conclusie is dan ook dat de axiale voeding geen invloed heeft op de terugvering. Hetzelfde wordt geconcludeerd uit de grafiek weergegeven in percentage (Figuur 118).

Algemene conclusie de axiale voeding heeft geen invloed op de terugvering van het rechte gedeelte.



Figuur 117: Terugvering in functie van de axiale voeding



Figuur 118: Procentuele terugvering in functie van de axiale voeding

5.3.3 Diameter 156 en wanddikte 1,5 mm

Van wanddikte 1,5 waren er voldoende buizen aanwezig om voor elk materiaal testen te doen. Van materiaal 1.4512 waren er 12 buizen, materiaal 1.4301 waren er 6 buizen en materiaal 1.4509 waren 3 buizen. Er zijn ook testen waarbij de bewerkingssnelheid constant werd gehouden dus waarbij het toerental werd verhoogd bij het verkleinen van de diameter. Het verhogen van het toerental is gedaan bij een axiale voeding van 3 en 4 mm/rev.

5.3.4 Test verhoging van het toerental materiaal 1.4512

Bij wanddikte 1,5 mm zijn de klemproblemen van wanddikte 1,2 mm niet meer voorgekomen. Dit kwam doordat de kern de gehele binnenwand opvulde, waardoor er zeer gelijkmatig vervormd kon worden.

Bij deze testen zijn er dan ook zeer weinig defecten opgetreden. Ook is hier telkens wanneer de buis ingespannen werd, de kern 10 mm naar voor geschoven voor optimale klemming. Dit resulteerde in zeer veel goede resultaten. Bij deze testen heeft er vooral een stijging van het toerental plaatsgevonden. Ook zijn er testen waarbij de bewerkingssnelheid constant werd gehouden dus waarbij het toerental werd verhoogd bij het verkleinen van de diameter. Het verhogen van het toerental is gedaan bij een axiale voeding van 3 en 4 mm/rev.

De toerentalberekening is uitgevoerd met de volgende formule:

De bewerkingssnelheid v : $v = \frac{\pi * d * n}{1000}$

Hieruit volgt dat het toerental gelijk is aan:

$$n = \frac{v * 1000}{\pi * d}$$

Gedurende deze test is er gebruik van gemaakt van startbewerkingssnelheden van 180 m/min., 220 m/min., 270 m/min. en 320 m/min. Dit komt overeen met toerentallen respectievelijk gelijk aan: 370 rpm, 450 rpm, 550 rpm en 650 rpm. Deze toerentallen werden constant gehouden tijdens het vervormen.

Later zijn er ook testen uitgevoerd waarbij de bewerkingssnelheid constant gehouden werd. Dit bij bewerkingssnelheden van 220 m/min en 260 m/min. Bij deze testen stijgt het toerental bij stijgende vervorming. Hierbij was het begintoerental gelijk aan 450 rpm voor 220 m/min. en 550 rpm voor 270 m/min. Het eindtoerental was respectievelijk 921 rpm en 1089 rpm.

5.3.4.1 Procesparameters verhoging van het toerental

Tabel 16: Procesparameters verhoging toerental

Buis ID	Buisdiameter (mm)	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Radiale voeding (mm/rev)	Stapgrootte (mm)
23c4	156	1,5	50	1,4512	80	370	3	1	4
111b16	156	1,5	50	1,4512	80	450	3	1	4
111a4	156	1,5	50	1,4512	80	550	3	1	4
106b16	156	1,5	50	1,4512	80	650	3	1	4
23b19	156	1,5	50	1,4512	80	370	4	1	4
110b16	156	1,5	50	1,4512	80	450	4	1	4
106c19	156	1,5	50	1,4512	80	550	4	1	4
110c19	156	1,5	50	1,4512	80	650	4	1	4

5.3.4.2 Meetresultaten verhoging van het toerental

Tabel 17: Meetresultaten verhoging van het toerental

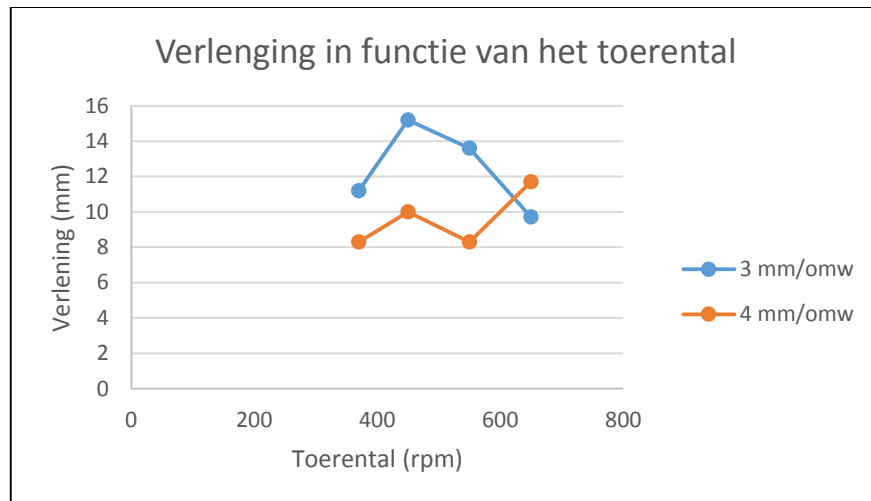
Buisnummer	Startlengte (mm)	Verlenging (mm)	Lengte recht gereduceerd gedeelte (mm)	Procentuele verlenging (%)	wanddikte gereduceerd gedeelte (mm)	Diameter gemiddelde (mm)	Rondheid (mm)	Procentuele rondheid (%)	Terugvering (mm)	procentuele terugvering (%)
23c4	144,3	11,2	20	8	1,6	84.49	1,95	2,3	8,49	10,05
111b16	143	15,2	24	11	1,7	84.07	2,11	2,5	8,07	9,60
111a4	142,8	13,6	23	10	1,5	84.18	2,20	2,61	8,18	9,71
106b16	142,2	9,7	18	7	1,6	84.22	1,74	2,06	8,22	9,76
23b19	141,8	8,3	18	6	1,7	84.27	2,64	4,28	8,265	9,81
110b16	144,2	10	18	7	1,7	84.68	2,52	2,97	8,68	10,25
106c19	144	8,3	18	6	1,6	84.9	2,33	2,74	8,90	10,48
110c19	144,6	11,7	20	8	1,6	84.73	1,85	2,19	8,73	10,31

5.3.4.3 Analyse van de meetresultaten

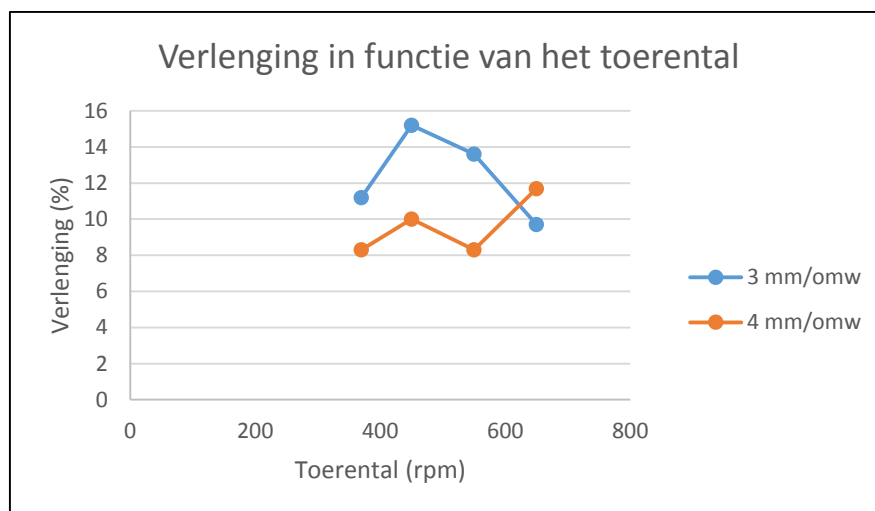
De verlenging, wanddikte, terugvering en rondheid van het recht gedeelte werd geanalyseerd bij deze testen. Hierbij is de rondheid, wanddikte, terugvering en rondheid uitgedrukt in mm. Tevens worden terugvering en verlenging ook uitgedrukt in procenten zodat deze relatief worden bekeken ten opzichte van de beginsituatie.

Verlenging

Uit de grafieken van Figuur 119 en Figuur 120 is zeer moeilijk een verband af te leiden, de grafiek van 3 mm/rev vertoont een heel ander verloop dan de grafiek van 4 mm/rev. De grafiek van 3 mm/rev ligt gedurende het hele toerentalbereik boven de grafiek van 4 mm/rev behalve bij een toerental van 650 rpm. Vanwege het verschillende verloop van beide grafieken en het onregelmatige verloop van iedere curve op zich, kan er geen verband afgeleid worden tussen het toerental en de verlenging.



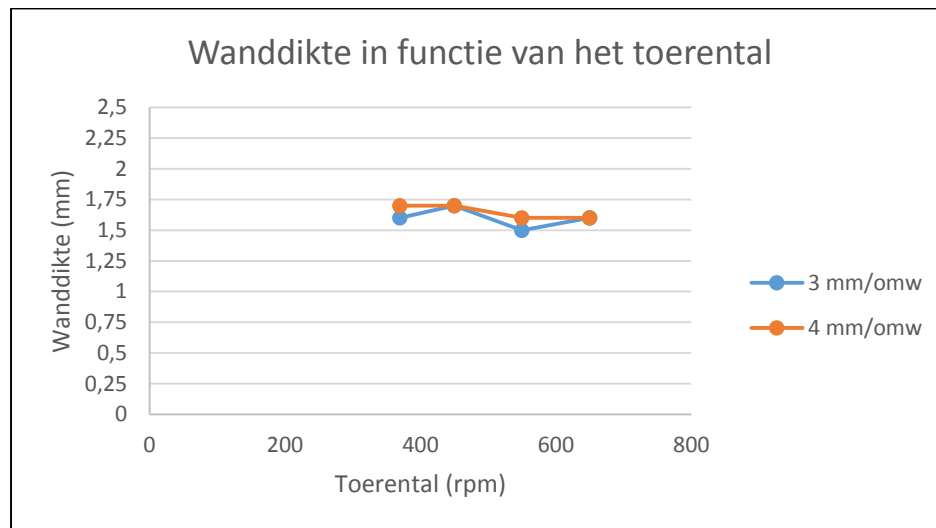
Figuur 119: Verlenging in functie van het toerental



Figuur 120: Procentuele verlenging in functie van het toerental

Wanddikte

Uit de grafieken van Figuur 121 volgt het volgende. De grafiek van 4 mm/omw vertoont een licht dalend verloop, de spreiding op de resultaten is echter zeer klein en bedraagt 0,1 mm. De grafiek van 3 mm/rev bevindt zich gedurende het hele toerental bereikt onder de grafiek van 4 mm/rev. Bij de grafiek van 3 mm/rev bedraagt de spreiding op de resultaten 0,2 mm, wat ook zeer weinig is. De grafieken vertonen dus beide een constant verloop. De conclusie is dus dat het toerental geen invloed heeft op de wanddikte. Net zoals in de vorige paragraaf ook werd besproken is de wanddikte een zeer moeilijke parameter om te meten. Wanneer de micrometer er 1 mm over het rechte gedeelte wordt verschoven, dan verandert het de wanddikte met 0,15 mm. Daarom is er gekozen om het wanddikteverloop te bepalen op open gezaagde buizen. Deze metingen zorgen voor een correct resultaat.

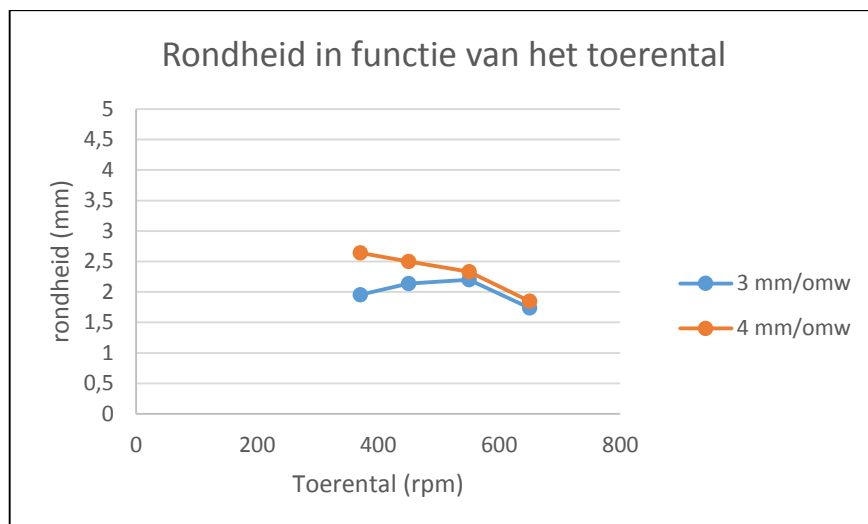


Figuur 121: Wanddikte in functie van het toerental

Rondheid

In de grafieken van Figuur 122 wordt afgelezen dat de grafiek van 4 mm/rev gedurende het hele toerentalbereik boven de grafiek van 3 mm/rev ligt. De spreiding tussen de resultaten van 3 mm/rev bedraagt slechts 0,46 mm. De grafiek van 4 mm/rev vertoont een dalende trend. De spreiding op de resultaten bedraagt slechts 0,89 mm wat weinig is. Dus de spreiding op beide resultaten is relatief klein. Hieruit wordt geconcludeerd dat een verhoging van het toerental geen invloed heeft op de rondheid.

Conclusie een verhoging van het toerental heeft geen invloed op de rondheid van het rechte gedeelte.

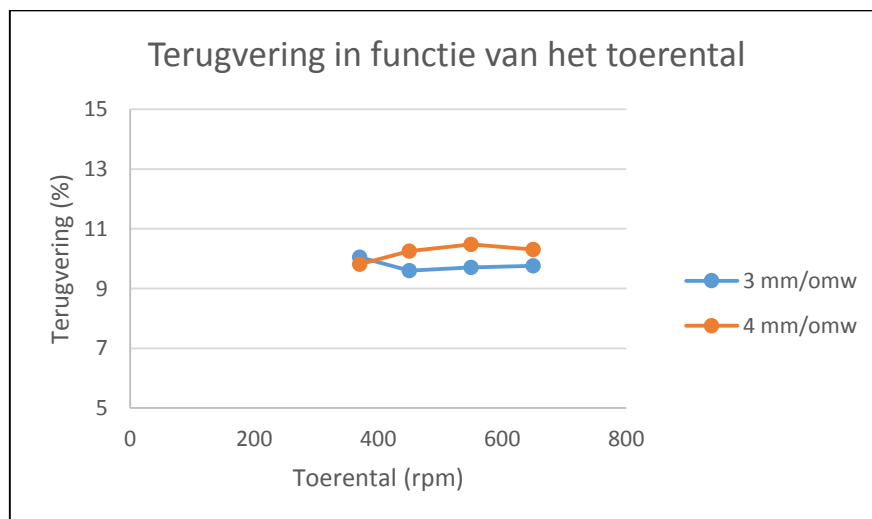


Figuur 122: Rondheid in functie van het toerental

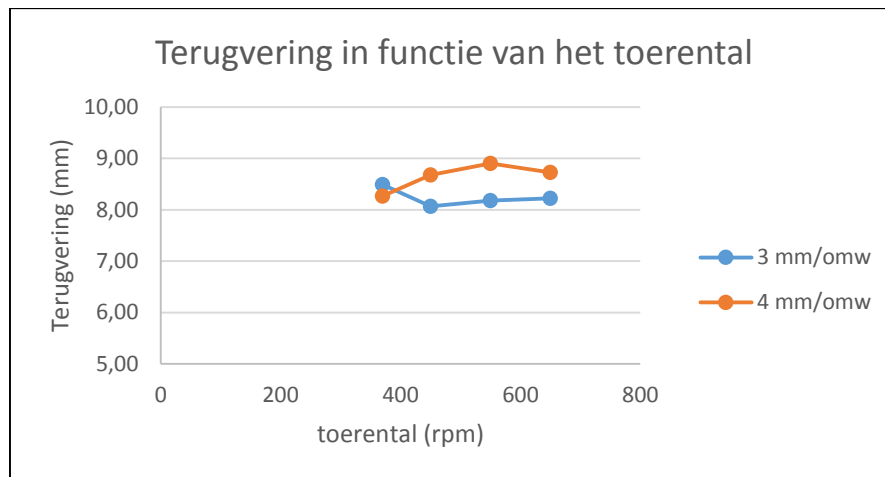
Terugvering

De grafieken van Figuur 123 en Figuur 124 vertonen een zeer constant verloop. Hieruit wordt opgemaakt dat het toerental geen invloed heeft op de terugvering. De spreiding op de resultaten is ook uitermate klein. Wel kan opgemerkt worden dat de terugvering bij een voeding van 4 mm/rev iets meer bedraagt dan bij een voeding van 3 mm/rev.

Conclusie: het toerental heeft geen invloed op de terugvering bij een verhoging van de axiale voeding zien we dat de terugvering van het rechte gedeelte iets groter is.



Figuur 123: Procentuele terugvering in functie van het toerental



Figuur 124: Terugvering in functie van het toerental

5.3.5 Testen materiaal 1.4301

Bij de testen op materiaal 1.4301 zijn er meerdere defecten opgetreden. Er zijn twee lassen open gescheurd en bij twee buizen is er scheurvorming op de overgang van de conus naar het rechte gedeelte. Materiaal 1.4301 is een austenitisch roestvrijstaal. Wegens het beperkte aantal bruikbare buizen van dit materiaal, zijn er in totaal slechts vijf buizen getest. Hiervan vertoonden er vier buizen defecten na het vervormingsproces.

5.3.5.1 Procesparameters

Tabel 18: Procesparameters 1.4301 wanddikte 1,5 mm

Buis ID	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Radiale voeding (mm/rev)	Stapdiepte (mm)	Lastype	Startlengte (mm)
105A7	1,5	50	1,4301	80	260	4	1	4	Laser	141,7
101b10	1,5	50	1,4301	80	260	4	1	4	Laser	143,3
20a10	1,5	50	1,4301	80	260	4	1	4	TIG	141,9
20c22	1,5	50	1,4301	80	370	4	1	4	TIG	144,4
20b7	1,5	50	1,4301	80	260	3	1	4	TIG	145,3

5.3.5.2 Meetresultaten

Tabel 19: Meetresultaten 1.4301 en wanddikte 1,5 mm

Buis ID	Startlengte (mm)	Rimpels	Scheuren	Las defect	Eindlengte (mm)	Verlenging (mm)	Lengte recht gedeelte (mm)	Procentuele verlenging (%)	wanddikte recht gedeelte (mm)	Procentuele rondheid (%)	Terugvering (mm)	Procentuele terugvering (%)
105A7	141,7	N	N	Y	*	*	25	*	*	*	*	*
101b10	143,3	N	N	Y	*	*	30	*	*	*	*	*
20a10	141,9	N	N	N	164,6	22,7	20	16	1,9	2,38	9,04	10,63
20c22	144,4	N	Y	N	*	*	19	*	*	*	*	*
20b7	145,3	N	Y	N	*	*	21	*	*	*	*	*

5.3.5.3 Analyse van de meetresultaten

Er zijn twee buizen die defecten vertonen aan de las. Deze waren allebei laser gelast dit was buis 105A7 en 101B10. Er waren ook twee buizen die scheurden ter hoogte van de overgang van de conus naar het rechte gedeelte. Dit waren buizen 20C22 en 20B7. Enkel buis 20A10 is gelukt om te vervormen. Dit werd gedaan met een axiale voeding van 4 mm/rev en een toerental van 260 rpm. Dit is waarschijnlijk een toevalstreffer. Aangezien buis 20B7 met een axiale voeding vervormd van 3 mm/rev vervormd is en deze buis scheurde.

Het is nog niet mogelijk om betrouwbare resultaten te bekomen bij het vervormen van materiaal 1.4301. De problemen die optreden zijn ofwel de las die scheurt wanneer de buis laser gelast is, ofwel scheurt de buis ter hoogte van de overgang van de conus naar het rechte gedeelte, omdat op die plaats de wand zeer dun wordt. Dit is te zien in Figuur 125 en bij de grafieken van het dikteprofiel in paragraaf 5.4.



Figuur 125 Defecten bij de buizen 1.4301 wanddikte 1,5 mm

5.3.6 Testen materiaal 1.4509 verhoging van het toerental

Op materiaal 1.4509 zijn er slechts drie testen uitgevoerd wegens de beperkte hoeveelheid buizen. Bij deze testen is het toerental verhoogd van 370 rpm, naar 450 rpm tot 550 rpm. Bij deze testen zijn er geen defecten opgetreden.

5.3.6.1 Procesparameters materiaal 1.4509 verhoging van het toerental

Tabel 20: Procesparameters materiaal 1.4509 verhoging van het toerental

Buis ID	Buisdiameter (mm)	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (rpm)	Axiale voeding (mm/rev)	Radiale voeding (mm/rev)	Stapgrootte (mm)
24c25	156	1,5	50	1,4509	80	370	4	1	4
24a1	156	1,5	50	1,4509	80	450	4	1	4
24b13	156	1,5	50	1,4509	80	550	4	1	4

5.3.6.2 Meetresultaten materiaal 1.4509 verhoging van het toerental

Tabel 21: Meetresultaten materiaal 1.4509 verhoging van het toerental

Buis ID	Eindlengte (mm)	Verlenging (mm)	Lengte recht gedeelte (mm)	Procentuele verlenging (%)	wanddikte recht gedeelte (mm)	Rondheid (mm)	Procentuele rondheid (%)	Terugvering (mm)	Procentuele terugvering (%)
24c25	160,1	14,9	20	10,3	1,9	1.595	1,89	8,56	10,13
24a1	163	17,4	21	12	1,85	2.525	2,94	9,83	11,46
24b13	153,1	12,7	19	9,02	1,9	1.759	2,04	10,39	12,03

5.3.6.3 Analyse van de meetresultaten

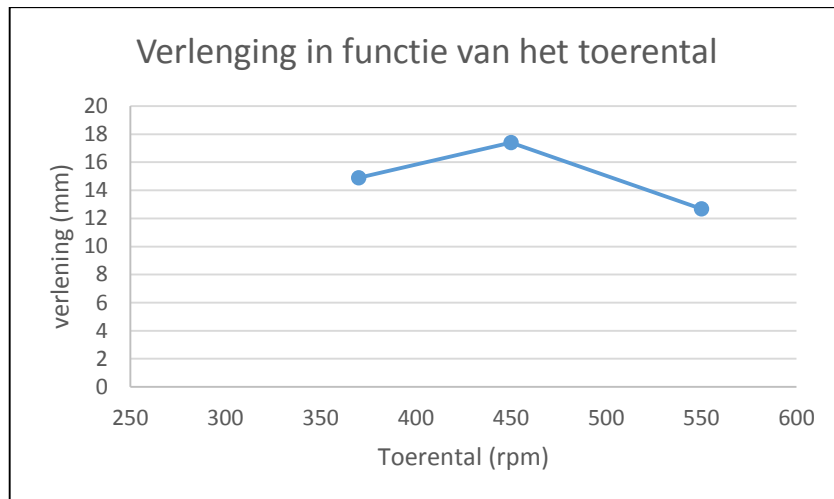
De verlenging, wanddikte, terugvering en rondheid van het recht gedeelte werd geanalyseerd. Hierbij is de rondheid, wanddikte, terugvering en rondheid

uitgedrukt in mm. Tevens worden terugvering en verlening ook uitgedrukt in procenten zodat deze relatief worden bekeken ten opzichte van de beginsituatie.

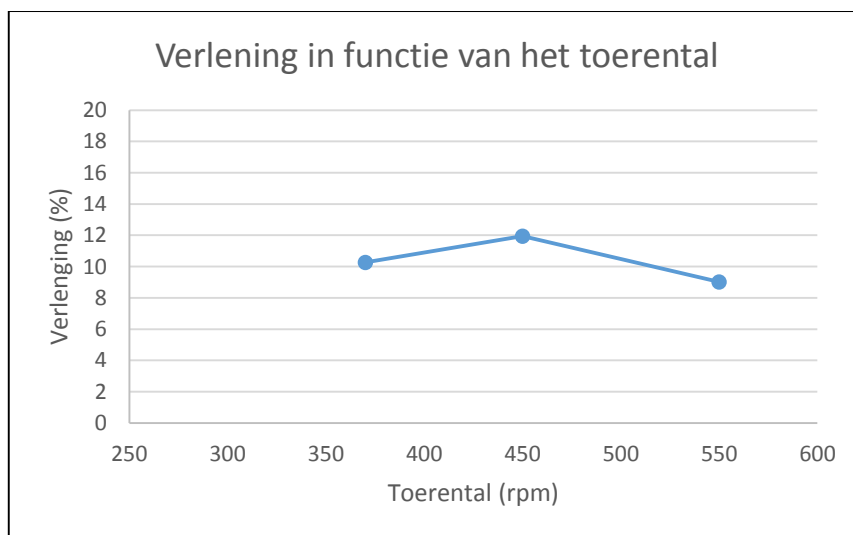
Verlenging

Op de grafieken van Figuur 126 en Figuur 127 wordt afgeleid dat de grafiek een constant verloop vertoont. De spreiding van de resultaten bij Figuur 127 bedraagt 3%, dit is zeer weinig.

Conclusie het toerental heeft geen invloed op de verlening bij materiaal 1.4509.



Figuur 126: Verlenging in functie van het toerental

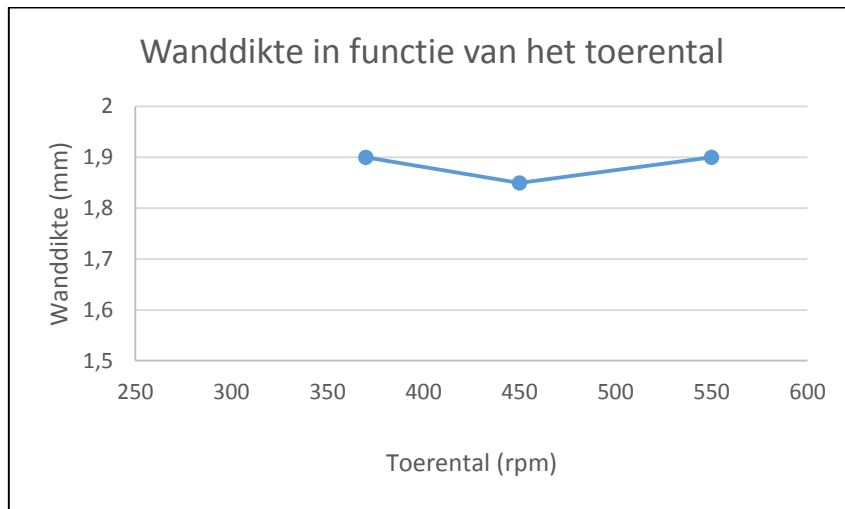


Figuur 127: Procentuele verlenging in functie van het toerental

Wanddikte

Op Figuur 128 is de wanddikte van het rechte gedeelte in functie van het toerental af te lezen. Er wordt opgemerkt dat de spreiding op de resultaten zeer

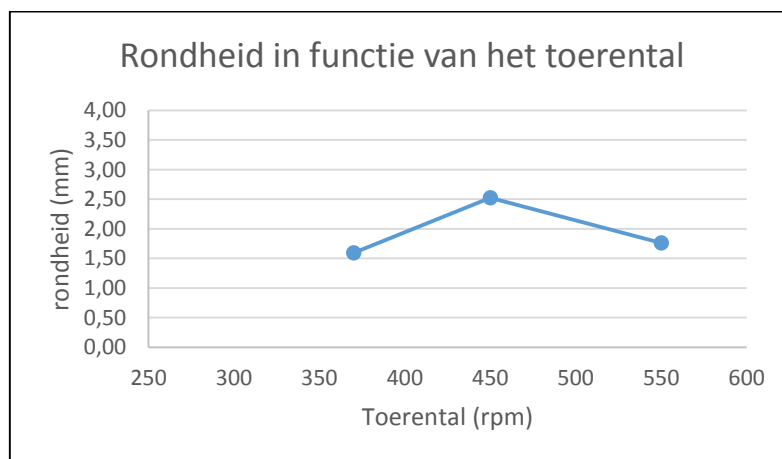
klein is namelijk 0,05 mm. Net zoals in de vorige paragraaf ook werd besproken is de wanddikte een zeer moeilijke parameter om te meten. Wanneer de micrometer er 1 mm over het rechte gedeelte wordt verschoven, dan verandert het de wanddikte met 0,15 mm. Daarom is er gekozen om het wanddikteverloop te bepalen op open gezaagde buizen. Deze metingen zorgen voor een correct resultaat.



Figuur 128: Wanddikte in functie van het toerental

Rondheid

In Figuur 129 is de rondheid in functie van het toerental te af te lezen. Uit deze grafiek is het moeilijk een logisch verloop uit af te leiden. De spreiding op de resultaten is slechts 1 mm. Daarom wordt geconcludeerd dat het toerental de rondheid niet beïnvloedt.

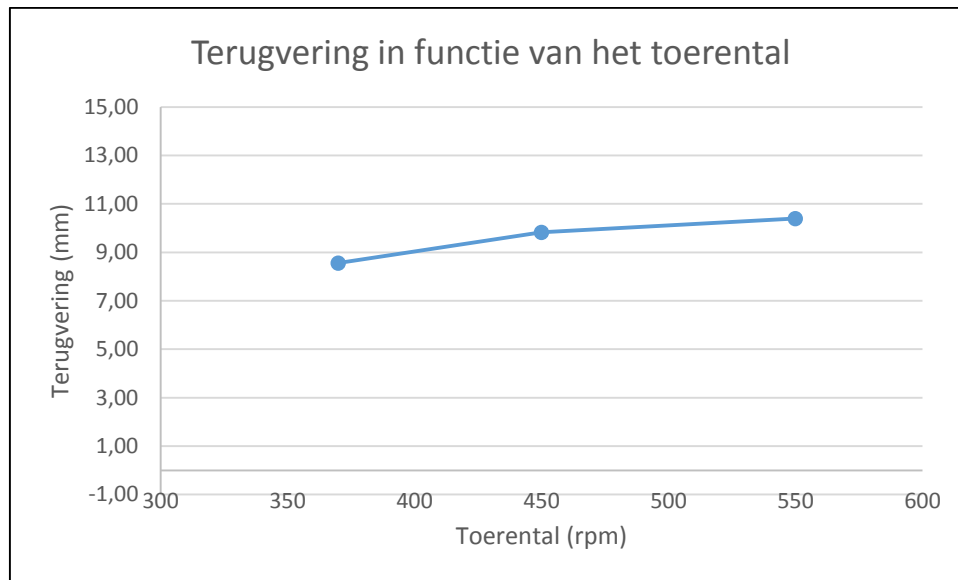


Figuur 129: Rondheid in functie van het toerental

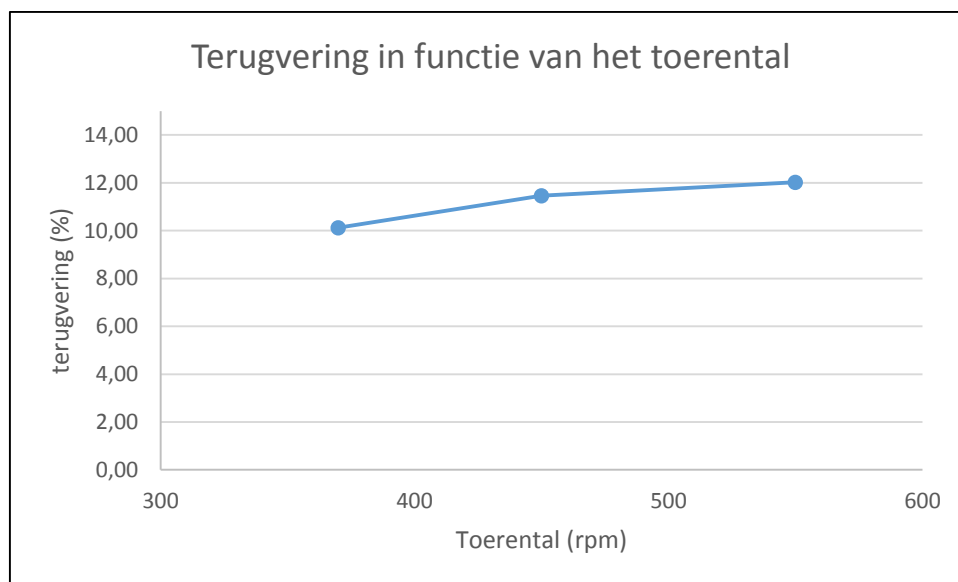
Terugvering

Op Figuur 130 en Figuur 131 is de terugvering in functie van het toerental te zien. Op deze grafieken is heel duidelijk te zien dat de spreiding op de resultaten zeer klein is. De grafiek heeft een heel constant verloop.

Conclusie: het toerental heeft geen invloed op de terugvering bij materiaal 1.4512.



Figuur 130: Terugvering in functie van het toerental



Figuur 131: Terugvering in functie van het toerental

5.3.7 Conclusie testen diameter 156 mm

Een zeer belangrijk aandachtspunt bij *spin forming* is de inklemming. Wanneer de inklemming onvoldoende is ontstaan er defecten. Daarnaast moet de ruimte tussen de kern en de binnenwand van de buis moet tot een minimum herleid worden. Wanneer hiervoor gezorgd wordt heeft het spinformingproces veel kans op slagen bij de materialen 1.4509 en 1.4512.

Buizen met een wanddikte van 0,8 mm kunnen niet vervormd worden, omdat er al bij een reductie van 20 mm rimpels optreden. Dit geldt voor al de geteste materialen.

Materiaal 1.4301 is een materiaal dat zeer moeilijk vervormt met behulp van *spin forming* omdat er bij dit materiaal er zeer veel defecten ontstaan. Deze defecten zijn scheuren op de overgang van de conus naar het rechte gedeelte en het begeven van de las. Het begeven van de las doet zich altijd voor wanneer het materiaal laser gelast wordt. Scheuren ontstaan bij TIG-gelaste buizen omdat het materiaal te dun wordt bij de overgang van de conus.

Het spinformingproces kan uitgevoerd worden op zeer hoge toerentallen, toerentallen van 370, 550 en 650 rpm zijn mogelijk. Ook een variabel toerental is mogelijk, dit wordt gedaan met commando G96 in de ISO-code. Bij een variabel toerental wordt een constante bewerkingssnelheid gerealiseerd, dit wil zeggen dat wanneer de diameter van de buis afneemt stijgt het toerental. Er werd een maximale bewerkingssnelheid gerealiseerd van 270 m/min., dit kwam overeen met een eindtoerental van 1089 rpm bij een diameter van 76 mm. Nog hogere toerentallen was in onze toepassing niet mogelijk, hiervoor was de klemming onvoldoende stabiel.

Er is geen verband tussen het toerental en de verlenging. Daarnaast heeft het toerental geen invloed op de terugvering en de rondheid. Een belangrijke conclusie is dus dat een bewerkingssnelheid tot 265 m/min. mogelijk is in onze toepassing en op onze machine. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze hoge snelheden enkel mogelijk waren bij materialen 1.4512 en 1.4509. Dit zijn de ferritische roestvaste stalen.

Er werden zeer goede resultaten verkregen met een axiale voeding van 4 mm/rev. Een voeding van 5 mm/rev leverde geen goede resultaten op. Daarnaast heeft de axiale voeding een invloed op de verlenging van de buis. Bij een grote axiale voeding zal de lengte van het rechte gedeelte langer zijn. De axiale voeding heeft echter geen invloed op de rondheid en de terugvering.

De diameterreductie van 80 mm werd probleemloos gehaald. Een diameterreductie van 100 mm behoort de mogelijkheden van het proces. Er moet echter wel rekening gehouden worden met een terugvering van 10% van de reductie.

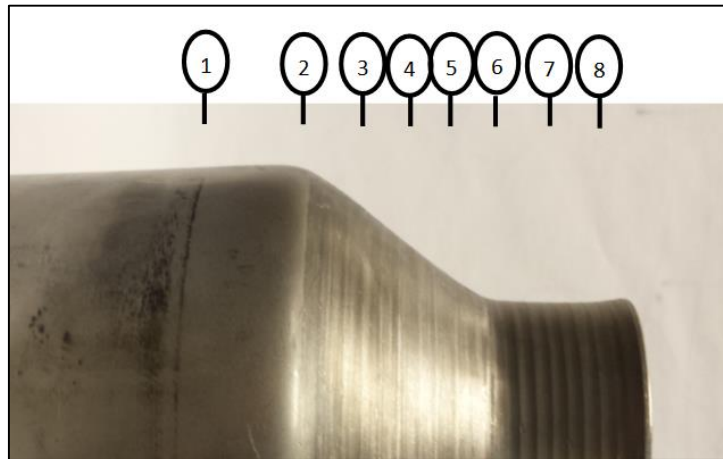
Een stapgrootte van 4 mm is geen probleem. Een grotere stapdiepte zorgt voor een te grote vervorming per pas waardoor er rimpels ontstaan in de het materiaal.

De lengte van het rechte gedeelte heeft ook een grote invloed op het slagen van het proces. Wanneer het rechte gedeelte te lang wordt, scheurt de las. Dit komt doordat het rechte gedeelte te sterk gaan 'open' staan wanneer het rechte gedeelte te lang wordt. Hierdoor is de feitelijke stapgrootte groter dan 4 mm en scheurt de las of ontstaan er rimpels.

Laser gelaste buizen geven een beduidende slechter resultaat dan TIG-gelaste buizen. In sommige testen (vooral met een grote reductie en conushoek) begeeft de laserlas, terwijl de TIG-gelaste buis heel blijft. TIG- gelaste buizen lassen is dus beduidend beter om te gebruiken bij het spinformingproces.

5.4 Resultaten wanddikteverloop na *spin forming*

De spinformingparameters van iedere buis zijn terug te vinden in de datasheet, zie bijlage B. De vervormde buizen werden doorzaagd zodat de wanddikte op en langs de conus goed kon opgemeten worden m.b.v. een micrometer. De dikte is op acht punten gemeten. Meetpunt nummer 1 ligt op 20 mm van de conus, hier wordt de begindikte van de buis gemeten. Meetpunt 2 ligt net voor het gebied waar er vervormd wordt. Punt 3, 4 en 5 zijn verdeeld over de conus. Punt 6 is op de overgang van conisch naar recht. Punt 7 ligt 10 mm verder in de richting van het vrije uiteinde en punt 8 ligt nog 10 mm verder.



Figuur 132: Meetpunten voor wanddikteprofiel

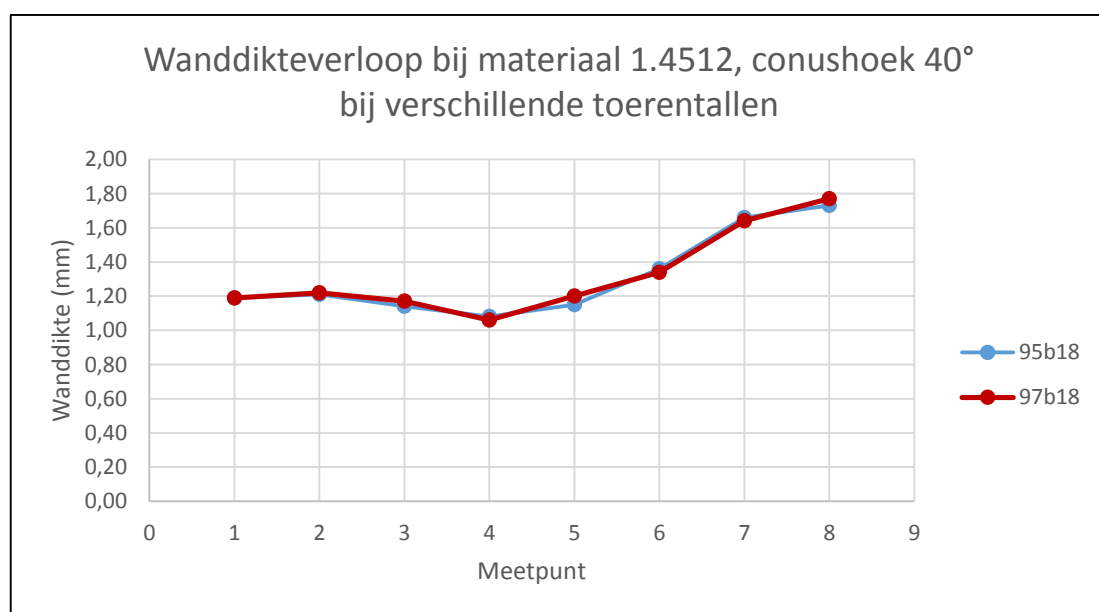
5.4.1 Dikteprofiel bij wanddikte 1,2 mm

Eerst wordt de wanddikte geïnspecteerd met het blote oog. Er is een open gezaagde buis zichtbaar in Figuur 133. Hierop is te zien dat de wanddikte dun is op de conus en zeer dik wordt op het recht gereduceerde gedeelte. De volgende grafieken bespreken de invloeden van de procesparameters op de wanddikteverdeling.



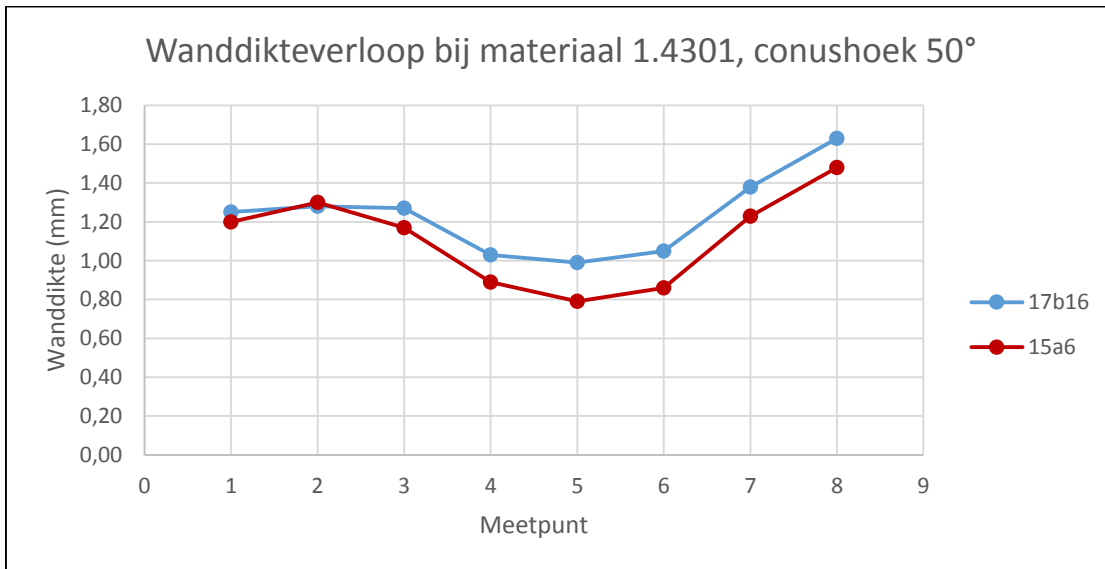
Figuur 133: Open gezaagde buis voor bepaling wanddikteverloop

In Figuur 134 is het wanddikteprofiel van twee buizen opgesteld. De wanddikte verdikt licht net voordat de conus begint. Op de conus is er verdunning. De wand is het dunste op het einde van de conus. Vervolgens stijgt de wanddikte sterk in de richting van het vrije uiteinde. Buis 95b18 is vervormd met toerental 475 rpm en buis 97b18 is vervormd met toerental 330 rpm. In Figuur 134 is er geen verschil in wanddikteverloop op te merken bij verschillend toerental.



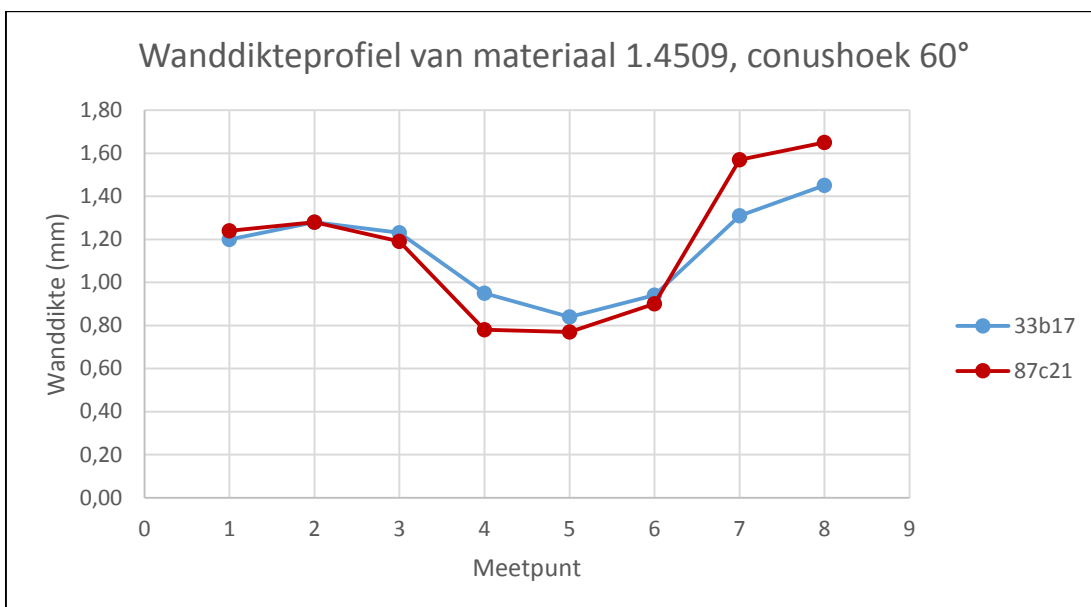
Figuur 134: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 40° bij verschillende toerentallen

Uit Figuur 135 is af te leiden dat het materiaal 1.4301 sterke wanddikteverdunding vertoont op de conus. De minimaal gemeten wanddikte ligt tussen 0,8 mm en 1,0 mm. Verder in de richting van het vrije uiteinde, stijgt de wanddikte snel.



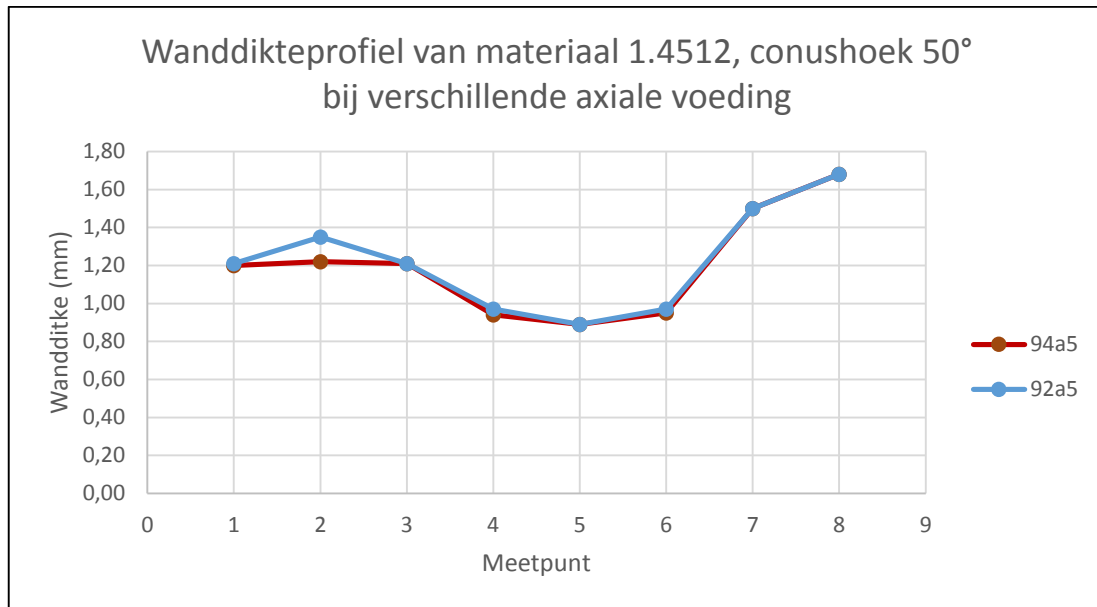
Figuur 135: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4301, conushoek 50°.

Figuur 136 geeft weer dat er ook bij materiaal 1.4509 als de conushoek stijgt tot 60°, sterke verdunning optreedt op de conus. De minimale wanddikte bij deze testen ligt tussen 0,8 mm en 0,9 mm.



Figuur 136: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4509, conushoek 60°.

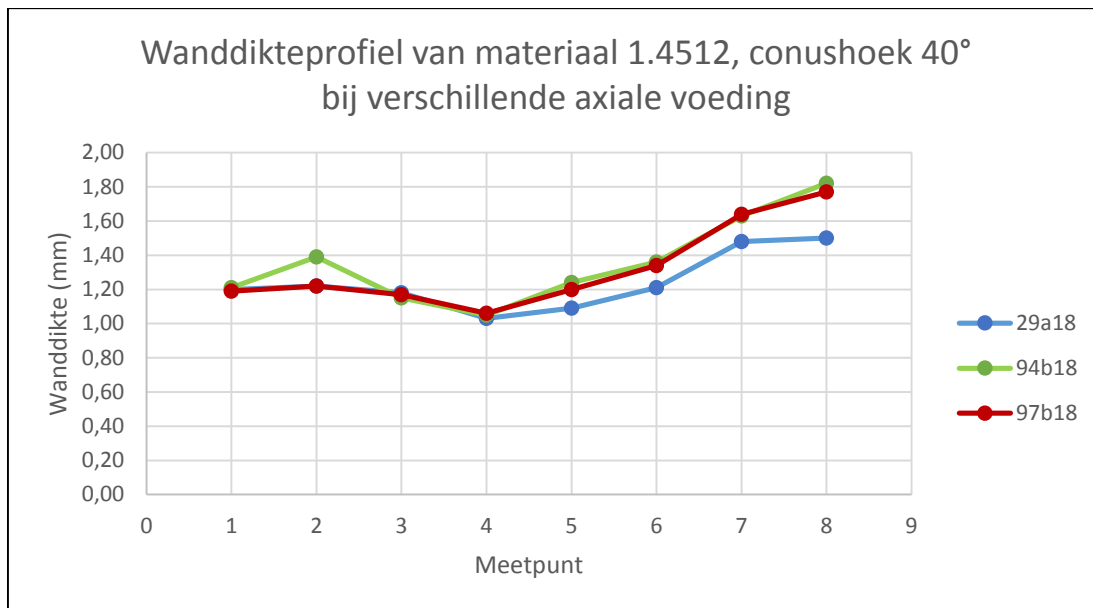
Buis 94a5 heeft een axiale voeding van 2 mm/rev. en buis 92a5 heeft een axiale voeding van 3 mm/rev. Uit Figuur 137 is er weinig verschil in wanddikteverloop waar te nemen bij veranderende axiale voeding. Enkel bij het tweede meetpunt is er een verschil. Dit kan te verklaren zijn door een lokale vervorming, maar dit wanddikteverschil is niet kritisch.



Figuur 137: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 50° bij verschillende axiale voeding

Uit Figuur 138 is te zien dat er weinig wanddiktevermindering is bij lage conushoeken vergeleken met de situatie in Figuur 137. De minimale wanddikte bij de testen in Figuur 138 ligt rond 1,0 mm.

Buis 29a18 is vervormd met axiale voeding 2 mm/rev., buis 94b18 met axiale voeding 3 mm/rev. en buis 97b18 met axiale voeding 4 mm/rev. Het valt op dat de axiale voeding van 2 mm/rev. een dunnere wanddikte veroorzaakt t.o.v. de hogere axiale voedingen vanaf de conus. De dunste wanddikte is echter overal ongeveer gelijk en komt voor op het einde van de conus.

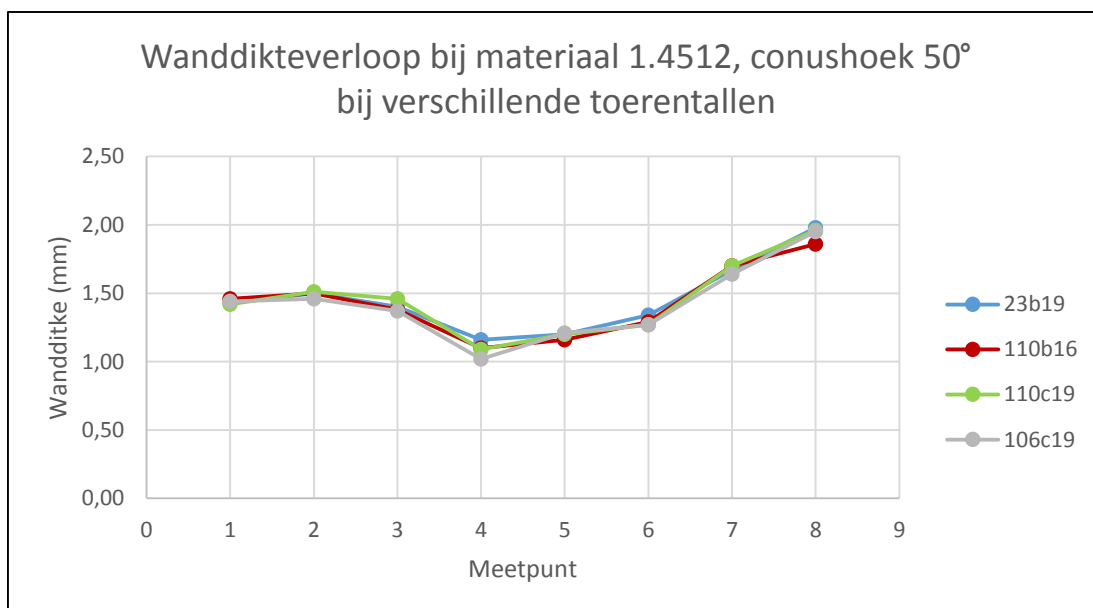


Figuur 138: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 40° bij verschillende axiale voeding

5.4.2 Dikteprofiel bij wanddikte 1,5 mm

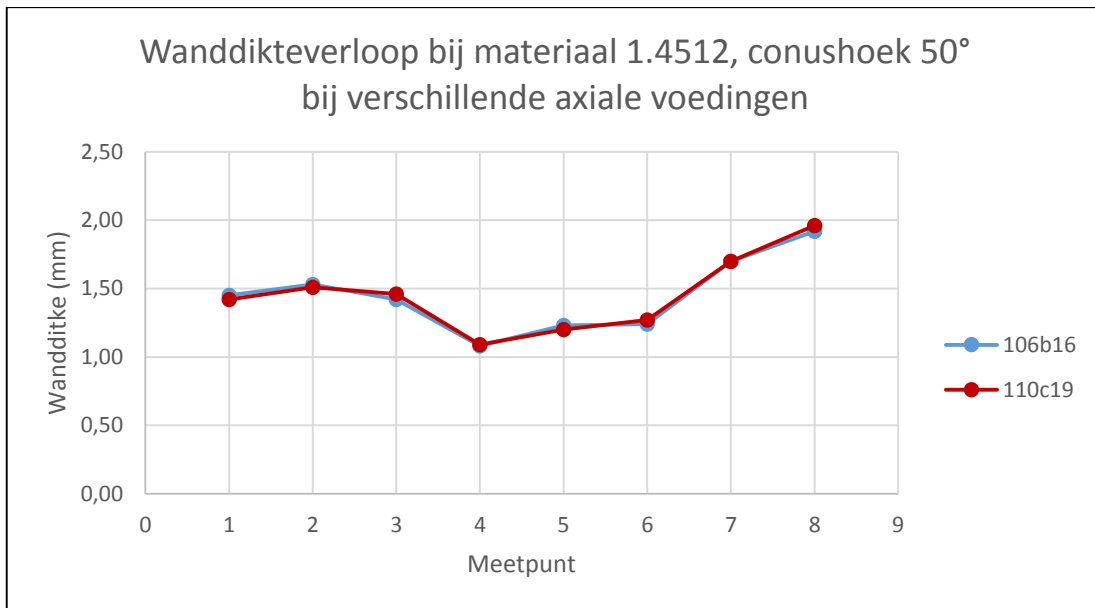
Uit Figuur 139 is af te leiden dat de wanddikte sterk daalt. Het dikteverloop is gelijkaardig aan dit bij de buizen met startdikte 1,2 mm. Er treedt namelijk wanddikteverduunning op de conus. Ook stijgt de wanddikte geleidelijk op het recht gereduceerd gedeelte.

Bij de testen in Figuur 139 is het toerental verhoogd van 330 rpm tot 650 rpm. dit heeft een verwaarloosbare invloed op de wanddikteverdeling. Deze conclusie komt overeen met de conclusie van de testen bij wanddikte 1,2 mm.



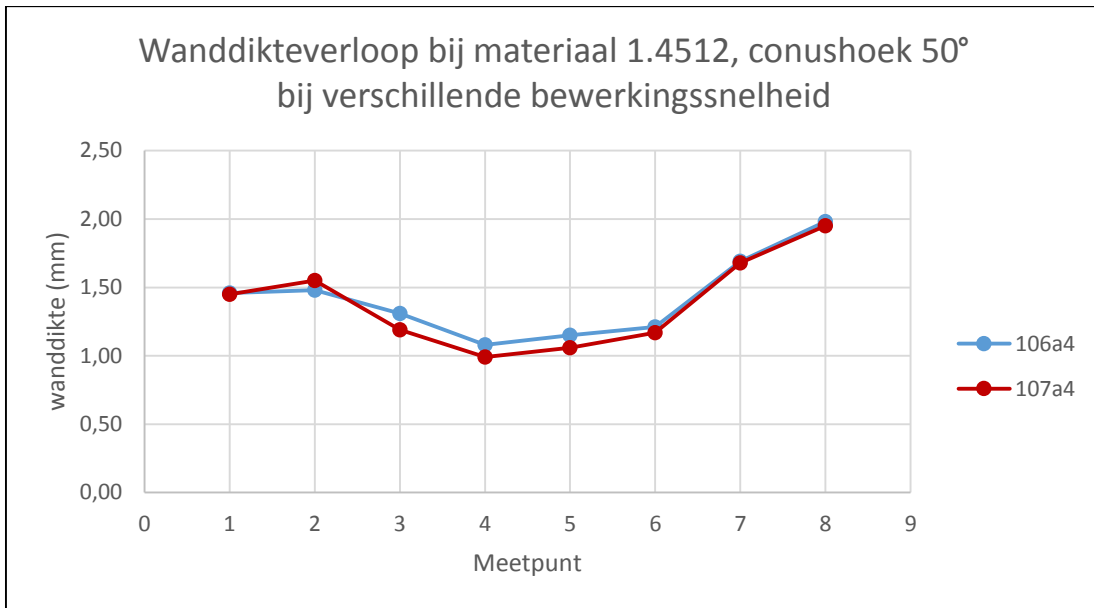
Figuur 139: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4301, conushoek 50° bij verschillende toerentallen

Ook in Figuur 140 is dezelfde conclusie te trekken als bij wanddikte 1,2 mm, namelijk dat de axiale voeding geen invloed heeft op de wanddikteverdeling.



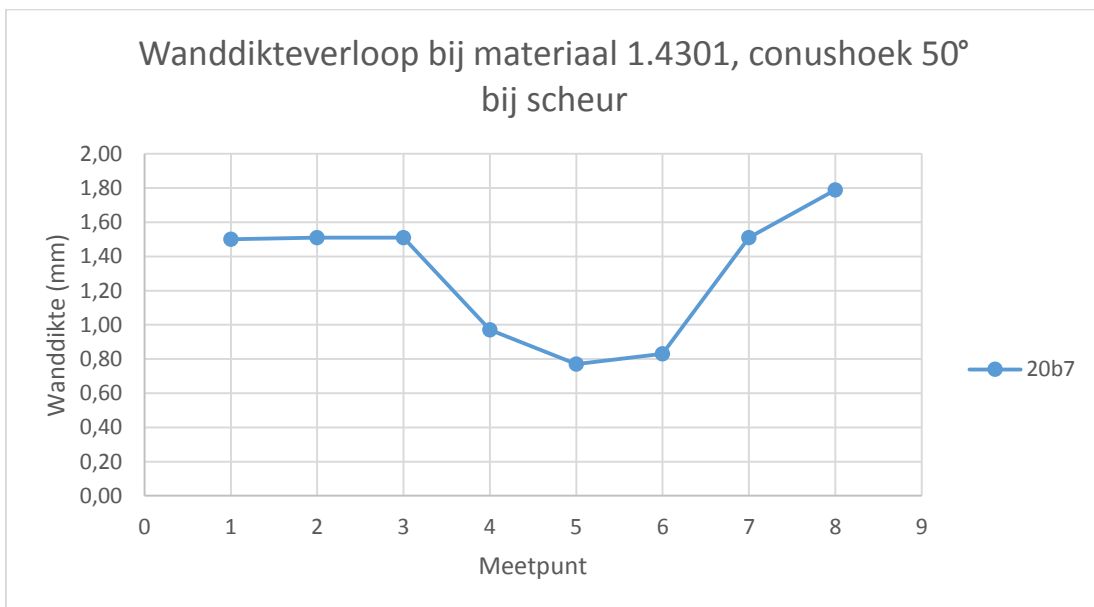
Figuur 140: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 50° bij verschillende axiale voedingen

In Figuur 141 is het wanddikteverloop weergegeven bij twee buizen waarbij de bewerkingssnelheid werd verhoogd, van 220 m/min. tot 260 m/min. De rode lijn geeft het snelle proces weer. Hierbij zijn de wanddikteveranderingen iets meer uitgesproken als bij het tragere proces. Er is enerzijds meer wanddiktetoeename aan het begin van de conus. Anderzijds is er meer wanddikteverdunding op de conus. Dit fenomeen kan te verklaren zijn doordat het proces veel sneller wordt uitgevoerd. Hierdoor vloeit het materiaal in de gemakkelijkste richting, dit is in de axiale richting. Daardoor is er meer wanddiktetoeename en –afname.



Figuur 141: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4512, conushoek 50° bij verschillende bewerkingsnelheid

Figuur 142 geeft de wanddikteverdeling weer bij een buis die gescheurd is op de overgang van de conus naar het rechte gedeelte. Deze scheur in de buis is zichtbaar in Figuur 143. Het blijkt dat scheuren ontstaan als de wanddikte de grens van 0,8 mm bereikt.



Figuur 142: Wanddikteverloop bij materiaal 1.4301, conushoek 50° bij scheur



Figuur 143: Scheur op overgang van conus naar recht gedeelte bij materiaal 1.4301

5.4.3 Algemene conclusie wanddikteprofiel

In alle gevallen is dezelfde wanddikteverdeling zichtbaar. Bij een stijgende conushoek daalt de minimale wanddikte sterk. Daarnaast zorgt een stijgende axiale voeding voor minder variatie in het wanddikteprofiel. Het toerental heeft geen invloed op de wanddikteverdeling. De stapdiepte heeft ook invloed op de wanddikteverdeling maar is niet onderzocht in deze testen, omdat er geen buizen beschikbaar waren die vervormd waren met dezelfde parameters en een andere stapdiepte.

5.5 Resultaten hardheidsmetingen

De hardheid van de buis werd getest zowel voor als na het spinformingproces. Het meten van de hardheid verliep als volgt. Eerst werd er een stukje van 5 x 5 mm uit de buis geslepen. Vervolgens werd dit stukje ingebed in een thermohardende kunststof, zoals zichtbaar in Figuur 144. Dit inbedden zorgt ervoor dat er geen invloed is van doorbuiging ten gevolge van de ronde vorm van het teststukje. Vervolgens hebben we gecontroleerd of een rockwell B hardheidsmeting zou lukken. Het bleek dat de wanddikte van de buis te laag was voor een correcte rockwell B meting op uit te voeren. Daarom zijn de metingen gebeurd met een vickers hardheidsmeting.



Figuur 144: Testblokje ingebed in thermohardende kunststof

De meest geschikte manier om de hardheid te bepalen van de teststukjes met een vickershardheidsmeting is een HV1 test. Hierbij wordt het piramidevormige indrukkingslichaam in het materiaal gedrukt met een kracht van 1 kg, dit is een relatief lage kracht in vergelijking met de rockwell B meting. Deze test is dus ideaal om de hardheid van dunwandige materialen te bepalen.

Het gebruikte hardheidsmeettoestel is van het merk Zwick Roell en is een semi-automatische micro-vickershardheidsmeettoestel. Dit toestel is te zien in Figuur 145



Figuur 145: Zwick Roell micro-vickershardheidsmeettoestel

5.5.1 Kalibratiemetingen

Vooraleer de metingen uit te voeren werd de machine gekalibreerd m.b.v. een kalibratieblokje. Deze metingen zijn te vinden in Tabel 22.

Tabel 22: Kalibratiemetingen van het vickershardheidsmeettoestel

Meting nummer	Hardheid (HV)
1	410
2	402
3	400

De hardheid van het kalibratieblokje is 406 HV met een afwijking van ± 8 HV. De meetwaarden die in Tabel 22 staan vallen binnen deze tolerantie. We besluiten dus dat het meettoestel correct werkt.

Eerst hebben we in CES EduPack 2014 en in enkele datasheets de verschillende hardheden opgezocht van de materialen [27, 28]. Deze resultaten zijn zichtbaar in Tabel 23.

Tabel 23: Overzicht van de theoretische hardheden van de geteste materialen

Materiaalsoort	Hardheid (HV)
1,4509	208 - 250
1,4512	140 - 185
1,4301	170 - 210

5.5.2 Metingen op niet vervormde teststukjes

Vervolgens werd de hardheid van de ingebedde teststukjes gemeten. De resultaten van deze metingen zijn te vinden in Tabel 24.

Tabel 24: Hardheidsmetingen op de nog niet-vervormde teststukjes

Materiaalsoort	Hardheid (HV)
1,4509	169
1,4509	171
1,4509	173
1,4509	175
1,4509	173
Gemiddelde 1,4509	172
1,4512	156
1,4512	144
1,4512	141
1,4512	146
1,4512	138
Gemiddelde 1,4512	145

1,4301	198
1,4301	191
1,4301	190
1,4301	190
1,4301	185
Gemiddelde 1,4301	191

Bij ieder materiaal werden er 5 metingen uitgevoerd, vervolgens werd het gemiddelde berekend. De afwijking op de hardheidsmeetresultaten zijn te verklaren door veranderingen in het materiaal zelf, maar ook door verandering van materiaaleigenschappen ten gevolge van het slijpen van de kleine teststukjes. Dit slijpen is gebeurd zonder koeling, hierdoor is de temperatuur aan de slijpkanten vrij hoog opgelopen.

Uit de metingen is af te leiden dat de theoretische waarden overeenkomen met de testresultaten bij de materialen 1.4512 en 1.4301. Echter bij materiaal 1.4509 is er een groot verschil tussen de gemeten resultaten en de theoretische waarden. Een verklaring hiervoor is dat de theoretische waarden niet uit CES EduPack konden afgeleid worden, maar dat deze waarden uit datasheets op internet moesten gehaald worden. Deze datasheets bevatten misschien minder betrouwbare informatie als CES EduPack. Ook kan het materiaal foutief gelabeld zijn geweest, dus dat wij niet het verwachte materiaal getest hebben.

5.5.3 Metingen op vervormde testblokjes

Bij deze testen werd de hardheid van de vervormde stukjes gemeten. Eerst werd de hardheid op zowel de conus als het rechte gedeelte bepaald. Vervolgens bleek dat het hardheidsverschil tussen deze twee verschillende metingen op hetzelfde materiaal een vergelijkbaar resultaat opleverden. De rest van de metingen zijn dan enkel uitgevoerd op het rechte gedeelte.

Tabel 25: Hardheidsmeetresultaten van buis 29b19

Plaats van staalname	Hardheid (HV)
Conus	251
	228
	241
Gemiddelde	240
Recht	201
	207
	228
Gemiddelde	212

Tabel 26: Hardheidsmeetresultaten van buis 87c21

Plaats	Hardheid (HV)
Conus	237
	221
	219
Gemiddelde	225,7
Recht	220
	237
	238
Gemiddelde	231,7

Tabel 27: Hardheidsmeetresultaten van buis 97b18

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	243
	262
	249
Gemiddelde	251,3

Tabel 28: Hardheidsmeetresultaten van buis 95b18

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	225
	212
	206
Gemiddelde	214,3

Tabel 29: Hardheidsmeetresultaten van buis 92a5

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	201
	227
	229
Gemiddelde	219,0

Tabel 30: Hardheidsmeetresultaten van buis 16a6

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	306
	308
	276
	368
Gemiddelde	314,5

Tabel 31: Hardheidsmeetresultaten van buis 94a5

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	213
	187
	219
Gemiddelde	206,3

Tabel 32: Hardheidsmeetresultaten van buis 67a11

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	264
	274
	245
Gemiddelde	261,0

Tabel 33: Hardheidsmeetresultaten van buis 33b17

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	198
	235
	229
	230
Gemiddelde	223,0

Tabel 34: Hardheidsmeetresultaten van buis 94b13

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	225
	205
	201
	182
Gemiddelde	203,3

Tabel 35: Hardheidsmeetresultaten van buis 17b14

Plaats	Hardheid (HV)
Recht	268
	291
	313
	278
Gemiddelde	287,5

In de vergelijkingstabellen staan de kenmerken van meerdere buizen langs elkaar. De kenmerken die verschillen tussen de twee of meerdere buizen worden in grijs aangeduid.

Tabel 36: Vergelijkingstabel van hardheden met conushoek 60°

Buis ID	67a11	33b17	87c21
Conushoek	60°	60°	60°
Materiaal	1.4509	1.4509	1.4512
Reductie	50 mm	50 mm	70 mm
Toerental	330 rpm	330 rpm	330 rpm
Axiale voeding	2 mm/rev	4 mm/rev	3 mm/rev
Radiale voeding	1 mm/rev	1 mm/rev	1 mm/rev
Stapdiepte	3 mm	2 mm	3 mm
Gemiddelde hardheid	261,0 HV	223,0 HV	231,7 HV

Tabel 37: Vergelijkingstabel van hardheden van materiaalsoort 1.4512 en reductie 70 mm

Buis ID	29a18	94b18	97b18	95b18
Conushoek	40°	40°	40°	40°
Materiaal	1.4512	1.4512	1.4512	1.4512
Reductie	70 mm	70 mm	70 mm	70 mm
Toerental	330 rpm	330 rpm	330 rpm	475 rpm
Axiale voeding	2 mm/rev	3 mm/rev	4 mm/rev	4 mm/rev
Radiale voeding	1 mm/rev	1 mm/rev	1 mm/rev	1 mm/rev
Stapdiepte	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Gemiddelde hardheid	212,0 HV	203,3 HV	251,3 HV	214,3 HV

Tabel 38: Vergelijkingstabel van hardheden van materiaalsoort 1.4512 en reductie 50 mm

Buis ID	92a5	94a5
Conushoek	50°	50°
Materiaal	1.4512	1.4512
Reductie	50 mm	50 mm
Toerental	330 rpm	330 rpm
Axiale voeding	3 mm/rev	2 mm/rev
Radiale voeding	1 mm/rev	1 mm/rev
Stapdiepte	2 mm	2 mm
Gemiddelde hardheid	219,0 HV	206,3 HV

Tabel 39: Vergelijkingstabel van hardheden van materiaalsoort 1.4301

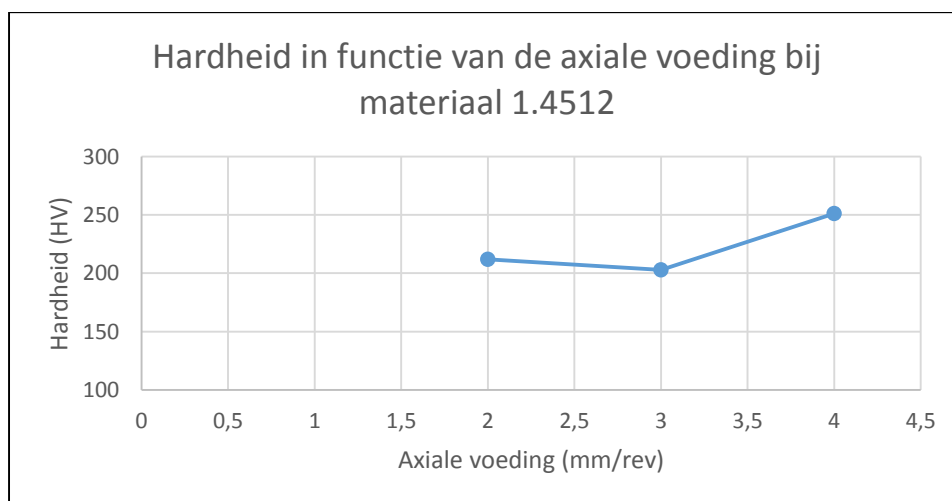
Buis ID	15a6	17b16
Conushoek	50°	40°
Materiaal	1.4301	1.4301
Reductie	50 mm	50 mm
Toerental	220 rpm	475 rpm
Axiale voeding	3 mm/rev	2 mm/rev
Radiale voeding	1 mm/rev	1 mm/rev
Stapdiepte	3 mm	4 mm
Gemiddelde hardheid	314,5 HV	287,5 HV

5.5.4 Bespreking van hardheidsmeetresultaten

Uit Tabel 36 is af te leiden dat de gemiddelde hardheid daalt als de axiale voeding stijgt en tegelijk de stap daalt. De vervormingsparameters van buis 87c21 zijn sterk verschillend van de andere twee. Daarom is er moeilijk een algemene conclusie te trekken over deze drie testen. Daarnaast is het hardheidsverschil tussen buis 33b17 en buis 87c21 niet significant omdat het verschil tussen beide meetwaarden is kleiner dan de nauwkeurigheid (+8 HV).

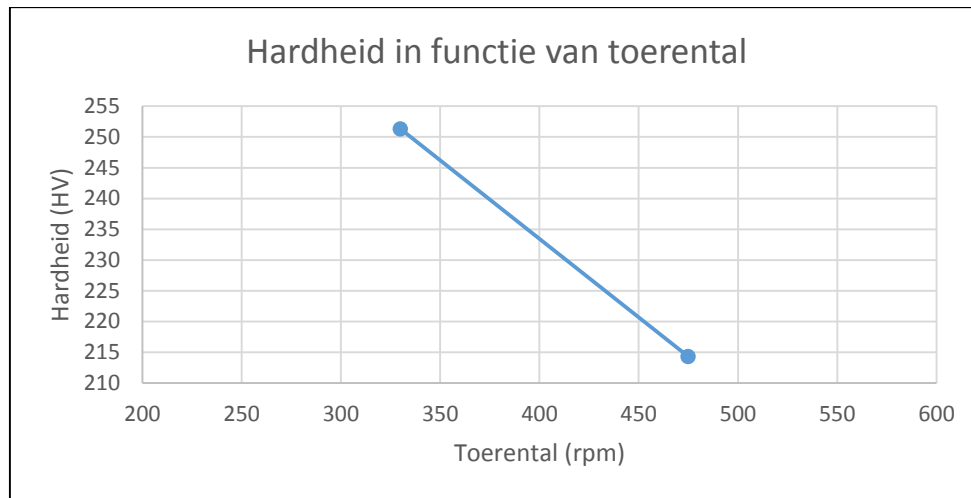
Ten opzichte van de beginsituatie is er wel significante verharding opgetreden in alle gevallen. De hardheid steeg van 172 HV tot ongeveer gemiddeld 235 HV

Tabel 37 en Tabel 38 bespreken het materiaal 1.4512. Figuur 146 geeft de hardheid weer in functie van de axiale voeding. Uit de figuur is af te leiden dat de hardheid stijgt als de axiale voeding stijgt. In alle gevallen is er een hardheidsstijging ten opzichte van het beginmateriaal. Het beginmateriaal had een hardheid van 145 HV, daarentegen was de minimale hardheid van het eindmateriaal 203 HV



Figuur 146: Hardheid in functie van de axiale voeding bij materiaal 1.4512

Uit Figuur 147 is af te lezen dat de hardheid daalt als het toerental stijgt van 330 tot 475 rpm.



Figuur 147: Hardheid in functie van toerental bij materiaal 1.4512

Uit Tabel 38 is dezelfde conclusie te trekken als uit Tabel 37. Namelijk dat de hardheid licht stijgt als de axiale voeding stijgt.

In Tabel 39 verschillen onderling veel parameters, dus is het moeilijk te zeggen wat de verharding beïnvloedt. Toch valt op dat de verharding bij dit materiaal (1.4301) veel groter is als bij de andere geteste staalsoorten (1.4509 en 1.4512). Dit is te verklaren doordat materiaal 1.4301 een austenitische staalsoort is en de materialen 1.4509 en 1.4512 ferritische staalsoorten zijn. De vervormingsversteving is groter bij de austenitische stalen, door de grotere vervormingsversteving ontstaat er ook een grotere hardheid.

5.5.5 Algemene conclusie hardheidsmetingen

Een eerste conclusie die getrokken kan worden is dat er tijdens het vervormen een hardheidstoename plaatsheeft. Verder valt op dat het austenitische staal 1.4301 een grotere hardheidsstijging ondergaat dan de ferritische staalsoorten 1.4509 en 1.4301.

Toch moeten de resultaten van de hardheidsmetingen met de nodige zorg bekeken worden, want er werd slechts van één staal per buis de hardheid bepaald. Om een volledig beeld van de hardheid te krijgen zouden er meerdere stalen over de omtrek moeten genomen worden om lokale verschillen te kunnen filteren. Een nog correcter resultaat kan behaald worden door stalen van meerdere buizen te gebruiken en te vergelijken. Een ander aandachtspunt is de relatief grote onnauwkeurigheid op de hardheidsmetingen. Deze onnauwkeurigheid bedraagt ± 8 HV.

6 Conclusie

Het doel van dit onderzoek is een analyse te maken van de mogelijkheden van rotatiesymmetrisch spinnen van buisvormig materiaal. Hierbij zijn de limieten van het spinformingproces bepaald op het gebied van reductie, conushoek, wanddikte, materiaal, axiale voeding, stapdiepte en bewerkingsnelheid.

Een eerste conclusie is dat de inklemming van de buis zeer belangrijk is bij *spin forming*. Wanneer de inklemming de buis niet voldoende omsluit slaagt het proces niet en treden er defecten zoals rimpels op. Het is ook zeer belangrijk dat de buis niet kan bewegen volgens axiale richting. Dit kan door de klemmen te voorzien van 'grippunten'. Daarnaast wordt aangeraden om de buis te klemmen over de gehele mantel van de buis.

Een tweede conclusie is dat buizen met een wanddikte van 0,8 mm niet vervormd kunnen worden met behulp van *spin forming*. Vanaf een reductie groter dan 15 mm treden er rimpels op. Dit is onafhankelijk van de diameter van de buis. Wanddikte van 1,2 en 1,5 mm kunnen wel vormgegeven worden met behulp van *spin forming*.

Verder is het duidelijk geworden dat bij TIG-gelaste buizen veel minder lasdefecten optreden dan bij laser gelaste buizen. Slechts 6% van de TIG-gelaste buizen vertoonde een lasdefect, terwijl dit 40% bedroeg bij de laser gelaste buizen.

Vervolgens kan voor het toerental zowel een variabel als een constant toerental worden gebruikt. Bij een variabel toerental wordt gekozen voor een constante bewerkingsnelheid van maximaal 270 m/min. Voor de berekening van het toerental kan gebruik worden gemaakt van de formule voor de omwentelingsnelheid. Bij deze hoge bewerkingsnelheden is de klemming van heel grote invloed.

Met betrekking tot axiale voeding wordt geadviseerd gebruik te maken van een voeding van 4 mm/omwenteling. Wanneer de axiale voeding groter wordt genomen veroorzaakt dit een golvend oppervlak. Verder heeft de axiale voeding invloed op de verlenging. Bij een grote axiale voeding wordt het rechte gedeelte langer.

Er werden goede resultaten verkregen tot een stapgrootte van 4 mm. Daarnaast volgde uit de analyse dat de stapgrootte invloed heeft op de verlenging van het rechte gedeelte. Een stapgrootte van meer dan 4 mm had voor gevolg dat er rimpels optraden op de omtrek van de buizen.

De reductie heeft invloed op de verlenging en terugvering van het rechte gedeelte. Het is mogelijk om de startdiameter met de helft te reduceren. De terugvering op de diameter is ongeveer gelijk aan 10% van de reductiediameter.

Conushoeken van 40°, 50° en 60° kunnen gehaald worden met materialen 1.4512 en 1.4509. Bij materiaal 1.4301 treedt bij een conushoek van 60° te veel verdunning op ter hoogte van de conus waardoor de buis daar scheurt. De conushoek heeft een invloed op het wanddikteverloop.

Uit het wanddikteprofiel volgt dat er op het rechte gedeelte voor de conus een verdikking optreedt, op de conus een verdunning optreedt en op het rechte gedeelte treedt terug een verdikking optreedt. Dit is onafhankelijk van de reductie, conushoek, stapgrootte, axiale voeding, toerental en materiaal. Bij stijgende conushoek daalt de minimale wanddikte.

Ten slotte volgt uit de analyse van de materialen dat de ferritische stalen 1.4509 en 1.4512 zeer goed vervormd kunnen worden met *spin forming*. Met deze metalen kunnen alle vooropgestelde parameters gehaald worden en is vervormen tegen zeer hoge snelheid mogelijk. Het austenitisch staal kan minder goed vorm gegeven worden met behulp van *spin forming*, omdat het scheuren vertoont bij een grote reductie en conushoek. Daarom wordt het spinnen van materiaal 1.4301 afgeraden.

De hardheid van de buis neemt toe tijdens het spinformingproces met ongeveer 50 HV. Materiaal 1.4301 is het hardste materiaal zowel voor als na het spinformingproces.

Een eerste interessant onderwerp voor verder onderzoek is het spinnen van dunwandig materiaal te onderzoeken. Hierbij kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van een steunrol zodat het materiaal toch plastisch gaat vervormen in plaats van elastisch. Ten tweede is het interessant om het gebruik van koelvloeistoffen te onderzoeken tijdens *spin forming*. Ten derde kan het gebruik van een spinformingmachine met meerdere gereedschappen onderzocht worden. Ten slotte kan ook de invloed van de geometrie van het gereedschap onderzocht worden.

7 Literatuurlijst

- [1] C. Wong, T. Dean en J. Lin, „A review of spinning, shear forming and flow forming processes,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, nr. June, pp. 1419-1435, 2003.
- [2] custompart.net, „sheet metal forming,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>.
- [3] Q. Xia, G. Xiao, H. Long, X. Cheng en X. Sheng, „A review of process advancement of novel metal spinning,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 85, nr. 381, pp. 100-121, 2014.
- [4] Y. Takahashi, S. Kihara en T. Nagamachi, „Effects of forming conditions on wrinkling in Necking of tube end,” *Materials Transactions*, vol. 52, nr. 1, pp. 31-36, 2011.
- [5] l. o. manufacturing. [Online]. Available: <http://thelibraryofmanufacturing.com/spinning.html>.
- [6] Bosal. [Online]. Available: www.bosal.com.
- [7] Bosal. [Online]. Available: www.bosal.nl.
- [8] Bosal, „Bosal corporate brochure”.
- [9] Honda. [Online]. Available: www.all4honda.com.
- [10] Q. X. Xia, S. W. Xie, Y. L. Huo en F. Ruan, „Finite element simulation and experimental investigation on the forming forces of 3D non-axisymmetrical tubes spinning,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, pp. 500-508, 2008.
- [11] Dazz, „denfordata,” 11 12 2011. [Online]. Available: <http://www.denfordata.com/bb/viewtopic.php?f=14&t=3540>.
- [12] Y. Jianguo en M. Makoto, „An experimental study on paraxial spinning of one tube end,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, nr. July, pp. 324-329, 2002.
- [13] Y. Jianguo en M. Makoto, „An experimental study on spinning of taper shape on tube end,” *Journal of materials processing technology*, nr. 166, pp. 405-410, 2005.

- [14] wikibooks, „mechanica van materialen,” [Online]. Available: http://nl.wikibooks.org/wiki/Mechanica_van_materialen#Elastische_en_plastische_vervorming.
- [15] K. Bundinski en M. Budinski, *Materiaalkunde*, Amsterdam: Pearson Benelux, 2014.
- [16] wikipedia, „versteviging,” [Online]. Available: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Versteviging>.
- [17] wikipedia, „spanning-rek diagram,” [Online]. Available: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Spanning-rekdiagram> .
- [18] Q. Xia, S. Xie, Y. Huo en F. Ruan, „Numerical simulation and experimental research on the multi-pass,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, pp. 500-508, 2008.
- [19] T. Iguchi, A. Yoshitake, T. Irie en A. Morikawa, „Numerical simulation and development of tube spinning process for exhaust system components of motor vehicles,” *Materials processing and design: modeling simulation and applications*, pp. 1077-1082, 2004.
- [20] „Finite element analysis and experimental investigation on deformation mechanism of non-axisymmetric tube spinning”.
- [21] L. Kwiatkowski, a. E. Tekkaya en M. Kleiner, „Fundamentals for controlling thickness and surface quality during dieless necking-in of tubes by spinning,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 62, nr. 1, pp. 299-302, 2013.
- [22] C.-C. Huang, J.-C. Hung en C. Hung, „Finite element analysis on neck-spinning process of tube at elevated temperature,” *Int J Manuf Technol*, nr. 56, pp. 1039-1048, 2011.
- [23] „Proc. of the Japanese spring conference for the technology of plasticity”.
- [24] Y. Jianguo en M. Makoto, „Effects of indented feed of roller tool on parallel spinning of circular aluminium tube,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, pp. 274-279, 2002.
- [25] „Laserlassen vs. conventionele lastechnieken,” *Tech-info-blad*.
- [26] C. Nederveen en P. v. Lent, „Lassen, lijmen en plaatbewerken.”.

- [27] L. S. Steel, „1.4509 Steel Physical Properties,” [Online]. Available: <http://www.steelgr.com/steel-grades/Special-Steel/Special-Steel-1-4509.pdf>. [Geopend 15 04 2015].
- [28] D. Breslavsky, „Stainless steel X2CrTiNb18 (1.4509),” European Steel and Alloy Grades, 2011. [Online]. Available: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=77. [Geopend 15 04 2015].

8 **Bijlagen**

Bijlage A: Voorbeeld datasheet.xlsx

Bijlage B: Testen_Bespreking_Gegevensblad.xlsx

Tube 124: Test 27 LASER**BUIS ID****Material properties**

<i>Material</i>	1,4509	
<i>Reduction</i>	70	<i>mm</i>
<i>Taper angle</i>	50	<i>°</i>
<i>Wall thickness</i>	0,8	<i>mm</i>
<i>Length</i>	181	<i>mm</i>
<i>Ø_{start}</i>	124	<i>mm</i>
<i>Ø_{end}</i>	54	<i>mm</i>

Machine properties

<i>Axial feed</i>	4	<i>mm/omw</i>
<i>Radial feed</i>	4	<i>mm</i>
<i>Rotational speed</i>	475	<i>/min</i>
<i>Axial speed</i>	3800	<i>mm/min</i>
<i>Deforming speed</i>	185	<i>m/min</i>

Measurements**Control measurement before spinning**

<i>Wall thickness</i>		<i>mm</i>
<i>Ø_{start}</i>		<i>mm</i>

Spinning Direction**Measurement during spinning**

<i>Tool forces</i>		<i>N</i>
<i>Temperature</i>		<i>°C</i>

Measurement after spinning

<i>Wall thickness straight part</i>		<i>mm</i>
<i>Wall thickness taper</i>		<i>mm</i>
<i>Inner diameter straight part</i>		<i>mm</i>
<i>Hardness</i>		<i>Vickers</i>
<i>Surface roughness</i>		<i>µm</i>
<i>Outer diameter straight part</i>		<i>mm</i>
<i>Roundness taper</i>		<i>µm</i>
<i>Roundness straight part</i>		<i>µm</i>

Testdatum	Buisnummer	object nummer (gereduceerd deel)	object nummer (onder)	Buisdiameter (mm)	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (tr./min.)	Axiale voeding (mm/omw.)	Radiale voeding (mm/omw.)	Stapdiepte (mm)	Lastype	Startlengte (mm)	Las ok?	Klemdruk (bar)	Kreuken (Y = yes; ± = little N = no)	Scheuren	Las defect	Eindlengte (mm)	Verlenging (mm)	lengte recht gereduceerd gedeelte (mm)	procentuele verlenging	wanddikte gereduceerd gedeelte	procentuele wanddikteverandering	Diameter Mono Ave	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Terugvering	procentuele terugvering (%)
22/04/2015	51a1	577	587	85	0,8	40	1,4509	10	220	2	2	2	TIG	190	OK	8	N	N	N	194,8	4,8	107	2,53	*	*	77.594	2.162	2,79	7.381	9,14	2,59	3,34
22/04/2015	47b17	580	586	85	0,8	60	1,4512	25	320	6	2	2	TIG	190	OK	8	Y, einde	N	±	195,2	5,2	104	2,74	*	*	68.864	4.142	6,01	10.558	13,53	8,86	12,87
22/04/2015	48b17	582	592	85	0,8	60	1,4512	25	320	4	2	2	Laser	190	OK	8	±, conus	N	N	195,8	5,8	40	3,05	*	*	*	*	*	2.160	2,56	*	*
22/04/2015	52a14	579	588	85	0,8	60	1,4509	25	320	3	2	2	TIG	190	OK	8	N	N	N	196,2	6,2	50	3,26	*	*	68.070	1.504	2,21	1.489	1,75	8,07	11,86
22/04/2015	51b14	573	591	85	0,8	60	1,4509	25	320	2	2	2	TIG	190	OK	8	N	N	N	201,5	11,5	58	6,05	*	*	66.853	1.143	1,71	1.495	1,77	6,85	10,25
22/04/2015	48a4	574	590	85	0,8	40	1,4512	10	220	3	2	2	Laser	190	OK	8	N	N	N	191,5	1,5	48	0,79	*	*	76.987	1.134	1,47	2.003	2,37	1,99	2,58
22/04/2015	47c4	575	585	85	0,8	40	1,4512	10	220	3	2	2	TIG	190	OK	8	N	N	N	190,3	0,3	47	0,16	*	*	77.076	1.731	2,25	1.329	1,58	2,08	2,69
22/04/2015	51c27	578	583	85	0,8	50	1,4509	30	475	4	4	4	TIG	190	OK	8	Y	N	±	*	*	50	*	*	*	*	*	*	1.521	1,80	*	*
22/04/2015	48c21	581	584	85	0,8	50	1,4512	40	475	2	2	4	Laser	190	OK	12	Y, einde	N	N	*	*	50	*	*	*	*	*	*	1.589	1,88	*	*
22/04/2015	47a21	576	589	85	0,8	50	1,4512	40	320	2	2	2	TIG		OK	16	Y, einde	N	N	*	*	50	*	*	*	*	*	*	1.094	1,30	*	*
29/04/2015	52b1	*	*	85	0,8	40	1,4509	10	220	2	1	2	TIG	*	OK	12	N	N	N	*	*	35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	46c1	*	*	85	0,8	40	1,4509	10	220	2	1	2	TIG	*	OK	12	N	N	N	*	*	20	*	0,8	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	49a4	*	*	85	0,8	40	1,4512	10	220	3	3	3	Laser	*	OK	12	Y	N	N	*	*	38	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	50a4	*	*	85	0,8	40	1,4512	10	220	3	3	3	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	40	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	65b7	*	*	85	0,8	40	1,4301	10	220	4	4	4	Laser	*	OK	12	N	N	N	*	*	35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	66B7	*	*	85	0,8	40	1,4301	10	220	4	4	4	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	32	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	65c11	*	*	85	0,8	60	1,4301	25	320	2	2	3	Laser	*	OK	12	Y	N	Y	*	*	20	*	0,8	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	66c11	*	*	85	0,8	60	1,4301	25	320	2	2	3	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	25	*	0,8	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	46b14	*	*	85	0,8	60	1,4509	25	320	3	3	4	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	49b17	*	*	85	0,8	60	1,4512	25	320	4	4	2	Laser	*	OK	12	Y	N	N	*	*	28	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	50b17	*	*	85	0,8	60	1,4512	25	220	4	4	2	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	25	*	0,8	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	49c21	*	*	85	0,8	50	1,4512	40	475	2	2	4	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	30	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	50c21	*	*	85	0,8	50	1,4512	40	220	2	2	4	Laser	*	OK	12	Y	N	N	*	*	30	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	65a24	*	*	85	0,8	50	1,4301	40	220	2	1	2	Laser	*	OK	12	Y	N	Y	*	*	28	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	66a24	*	*	85	0,8	50	1,4301	40	475	3	1	2	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	28	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	46a27	*	*	85	0,8	60	1,4509	15	220	2	1	2	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	30	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
29/04/2015	52c27	*	*	85	0,8	60	1,4509	15	320	2	1	2	TIG	*	OK	12	Y	N	N	*	*	28	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4/05/2015	33a4(1)	*	*	124	1,2	40	1,4509	20	330	2	1	2	TIG	*	OK	16	N	N	N	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4/05/2015	87a4(1)	*	*	124	1,2	40	1,4509	20	330	3	1	2	Laser	*	OK	26	Y	N	N	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4/05/2015	88a4(1)	*	*	124	1,2	40	1,4509	20	330	3	1	2	TIG	*	OK	28	Y	N	N	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Testdatum	Buisnummer	object nummer (gereduceerd deel)	object nummer (onder)	Buisdiameter (mm)	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (tr./min.)	Axiale voeding (mm/omw.)	Radiale voeding (mm/omw.)	Stapdiepte (mm)	Lastype	Startlengte (mm)	Las ok?	Klemdruk (bar)	Kreuken (Y = yes; ± = lite N = no)	Scheuren	Las defect	Eindlengte (mm)	Verlenging (mm)	lengte recht gereduceerd gedeelte (mm)	procentuele verlenging	wanddikte gereduceerd gedeelte (mm)	procentuele wanddikteverandering (%)	Diameter Mono Ave	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Terugvering	procentuele terugvering (%)	
11/05/2015	95C19	*	*	124	1,2	50	1,4512	80	475	2	1	3	Laser	159,1	OK	28	N	N	N	175,8	16,7	24,9	10,5	2	68	47,6	*	*	*	*	*	*	
11/05/2015	89c21	637	649	124	1,2	60	1,4509	70	330	3	1	3	Laser	134,3	OK	28	N	N	Y	141,5	7,2	17	5,36	1,4	17	58.864	1.468	2,49	1.282	1,03	4,86	8,26	
11/05/2015	88c21	638	650	124	1,2	60	1,4509	70	475	2	1	4	Laser	139,9	OK	28	N	N	Y	147,6	7,7	29,4	5,5	*	*	79.221	1.395	1,76	2.101	1,69	*	*	
11/05/2015	33c21	636	648	124	1,2	60	1,4509	70	330	2	1	2	TIG	139,3	OK	28	N	N	N	149,5	10,2	25,8	7,32	1,4	17	59.769	1.308	2,19	1.048	0,84	5,77	9,65	
11/05/2015	87c21	635	647	124	1,2	60	1,4509	70	330	3	1	3	Laser	144,9	OK	28	N	N	Y	157,3	12,4	34,2	8,56	1,6	33	62.498	1.218	1,95	1.507	1,21	8,50	13,60	
11/05/2015	22a14	642	646	124	0,8	60	1,4509	50	330	4	1	4	Laser	*	OK	28	Y	N	N	*	*	31	*	0,8	0	*	*	*	*	*	*	*	
11/05/2015	91c21	*	*	124	1,2	60	1,4509	70	330	2	1	5	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
11/05/2015	42b14	*	*	124	0,8	60	1,4509	50	330	4	1	3	TIG	*	OK	28	Y	N	N	*	*	53	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
11/05/2015	88b17	640	644	124	1,2	60	1,4509	30	330	4	1	3	Laser	138,8	OK	28	Y	N	N	140,1	1,29	18,5	0,93	1,3	8,3	98.601	2.024	2,05	1.900	1,53	4,60	4,67	
11/05/2015	87b17	639	643	124	1,2	60	1,4509	30	330	3	1	2	Laser	138,4	OK	28	N	N	N	141,1	2,7	17,9	1,95	1,3	8,3	97.732	1.581	1,62	1.095	0,88	3,73	3,82	
11/05/2015	91b17	641	645	124	1,2	60	1,4509	30	330	3	1	4	Laser	139,2	OK	28	N	N	N	141,5	2,3	22,2	1,65	1,3	8,3	96.312	1.688	1,75	1.087	0,87	2,31	2,40	
11/05/2015	89b17	*	*	124	1,2	60	1,4509	30	330	3	1	5	Laser	*	OK	28	Y	N	N	*	*	17,7	*	1,3	8,3	*	*	**	*	*	*	*	
12/05/2015	8a4	*	*	124	1,2	40	1,4509	30	220	3	1	3	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12/05/2015	97a4	663	678	124	1,2	40	1,4512	30	220	3	1	3	TIG	132,5	OK	28	N	N	N	136,6	4,06	20,3	3,06	1,3	8,3	97.269	1.373	1,41	967	0,78	3,27	3,36	
12/05/2015	12a5	*	*	124	1,2	50	1,4512	50	220	3	1	3	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12/05/2015	15a6	657	679	124	1,2	50	1,4301	50	220	3	1	3	TIG	133,2	OK	28	N	N	N	143,7	10,5	22,1	7,88	1,3	4,2	81.889	1.233	1,51	1.428	1,15	7,89	9,63	
12/05/2015	4a6	660	677	124	1,2	60	1,4301	70	220	3	1	3	Laser	134,3	OK	28	N	N	Y	146,3	12	31	8,94	1,4	17	88.910	3.069	3,45	2.216	1,79	34,91	39,26	
12/05/2015	5b16	*	*	124	1,2	60	1,4301	70	220	3	1	3	Laser	123,8	OK	28	N	N	Y	130,5	6,75	16,1	5,45	1,4	17	*	*	*	*	*	*	*	
12/05/2015	15b16	661	675	124	1,2	50	1,4301	30	330	4	1	2	TIG	139,9	OK	28	N	N	N	145,3	5,4	23,7	3,86	1,2	0	101.069	1.725	1,71	1.683	1,36	7,07	6,99	
12/05/2015	33b17	658	676	124	1,2	60	1,4509	50	330	4	1	2	TIG	138,6	OK	28	N	N	N	145,7	7,1	22,6	5,12	1,3	8,3	78.590	1.978	2,52	1.393	1,12	4,59	5,84	
12/05/2015	96c19	*	668	124	1,2	40	1,4512	70	330	4	1	2	Laser	134,8	OK	28	N	N	N	142,7	7,9	5	5,86	1,8	50	*	*	*	1.210	0,97	*	*	
12/05/2015	29c19	662	672	124	1,2	60	1,4512	30	475	2	1	4	TIG	128,8	OK	28	N	N	N	131,6	2,8	12,8	2,17	1,3	8,3	96.061	1.936	2,02	1.760	1,42	2,06	2,15	
12/05/2015	17b16	653	671	124	1,2	40	1,4301	50	475	2	1	4	TIG	144,6	OK	28	N	N	N	156,3	11,7	18,8	8,09	1,3	8,3	77.862	1.014	1,30	1.321	1,06	3,86	4,96	
12/05/2015	8c21	*	*	124	1,2	50	1,4509	70	475	2	1	4	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12/05/2015	15c20	654	674	124	1,2	50	1,4301	70	475	2	1	4	TIG	148,1	OK	28	N	N	Y	171,2	23,1	35	15,6	1,4	17	62.673	1.832	2,92	1.312	1,06	8,67	13,84	
12/05/2015	70b10	666	673	124	1,5	50	1,4301	30	330	2	1	3	Laser	137,7	OK	28	N	N	N	141,3	3,6	17	2,61	1,6	6,7	100.452	2.122	2,11	1.809	1,46	6,45	6,42	
12/05/2015	67a11	659	670	124	1,5	60	1,4509	50	330	2	1	3	Laser	139,3	OK	28	N	N	N	147,7	8,4	22	6,03	1,6	6,7	77.736	1.439	1,85	1.919	1,54	3,74	4,81	
12/05/2015	69b12	667	669	124	1,5	40	1,4512	70	330	2	1	3	Laser	140	OK	28	N	N	N	153,5	13,5	17	9,64	1,8	20	59.710	2.054	3,44	1.858	1,50	5,71	9,56	
13/05/2015	68b7	*	*	124	1,5	50	1,4509	70	475	3	1	2	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	37	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Testdatum	Buisnummer	object nummer (gereduceerd deel)	object nummer (onder)	Buisdiameter (mm)	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (tr./min.)	Axiale voeding (mm/omw.)	Radiale voeding (mm/omw.)	Stapdiepte (mm)	Lastype	Startlengte (mm)	Las ok?	Klemdruk (bar)	Kreuken (Y = yes; ± = lite N = no)	Scheuren	Las defect	Eindlengte (mm)	Verlenging (mm)	lengte recht gereduceerd gedeelte (mm)	procentuele verlenging	wanddikte gereduceerd gedeelte (mm)	procentuele wanddikteverandering (%)	Diameter Mono Ave	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Terugvering	procentuele terugvering (%)
13/05/2015	67b7	688	696	124	1,5	40	1,4509	30	220	4	1	4	Laser	140,7	OK	28	N	N	N	144,7	4	18	2,84	2	33	97.001	1.771	1,83	1.667	1,34	3,00	3,09
13/05/2015	17a20	*	*	124	1,5	50	1,4301	60	VAR	4	3	4	TIG	*	OK	28	Y	N	N	*	*	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	71b9	*	*	124	1,5	50	1,4301	60	VAR	4	3	4	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	76b12	*	*	124	1,5	50	1,4512	60	VAR	4	3	4	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	72b12	*	*	124	1,5	50	1,4512	60	VAR	4	3	4	Laser	*	NOK	28	N	N	Y	*	*	11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	76a	687	699	124	1,5	50	1,4512	60	VAR	4	3	4	Laser	*	OK	28	N	N	N	*	*	11	*	*	*	69,5	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	70a9	*	*	124	1,5	60	1,4301	70	220	4	1	4	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	36	*	1,5	*	*	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	69c22	692	695	124	1,5	60	1,4512	30	475	3	1	2	Laser	135,1	OK	28	N	N	N	137,7	2,6	19	1,92	1,8	20	95.620	1.507	1,58	1.733	1,40	1,62	1,69
13/05/2015	72a8	*	*	124	1,5	50	1,4512	70	475	3	1	2	Laser	138,1	OK	28	N	N	N	141,2	3,1	4	2,24	1,7	13	58,5	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	69a8	689	700	124	1,5	50	1,4512	50	220	4	1	4	Laser	144,4	OK	28	N	N	N	154,9	10,5	24	7,27	1,7	13	76.064	1.185	1,56	1.693	1,36	2,06	2,71
13/05/2015	71c10	*	*	124	1,5	40	1,4301	50	475	3	1	2	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	38	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	71a23	*	*	124	1,5	40	1,4301	50	475	3	1	2	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	31	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13/05/2015	68a24	682	701	124	1,5	40	1,4509	50	475	3	1	2	Laser	155,3	OK	28	N	N	N	165,8	10,5	28	6,73	1,8	20	78.425	1.535	1,96	1.669	1,35	4,43	5,64
13/05/2015	72c22	691	697	124	1,5	60	1,4512	70	220	4	1	4	Laser	140,7	OK	28	N	N	N	160,6	19,9	36	14,1	2,2	47	59.252	1.576	2,66	2.030	1,64	5,25	8,86
19/05/2015	28b20	777	*	156	1,2	50	1,4512	80	260	4	2	4	TIG	115,3	OK	28	Y	N	N	*	*	15	*	1,2	0	83.511	2.083	2,49	*	*	7,51	8,99
19/05/2015	28c17	783	*	156	1,2	50	1,4512	80	260	2	1	4	TIG	142,2	OK	28	Y	N	N	148,7	6,5	10	4,57	1,8	50	84.296	2.290	2,72	*	*	8,30	9,84
19/05/2015	27b5	778	*	156	1,2	50	1,4512	80	260	3	3	4	TIG	144,2	OK	28	Y	N	N	151,6	7,4	10	5,13	1,6	33	85.125	2.459	2,89	*	*	9,13	10,72
19/05/2015	27c5	*	*	156	1,2	50	1,4512	80	260	4	2	4	TIG	*	OK	28	Y	N	N	*	*	8	*	1,8	50	*	*	*	*	*	*	*
19/05/2015	27a20	782	*	156	1,2	50	1,4512	80	260	4	1	4	TIG	144,4	OK	28	N	N	N	154,7	10,3	15	7,13	1,6	33	84.756	1.973	2,33	*	*	8,76	10,33
19/05/2015	28a17	779	*	156	1,2	50	1,4512	80	370	4	1	4	TIG	144,1	OK	28	Y	N	N	150,5	6,4	10	4,44	1,6	33	84.815	2.733	3,22	*	*	8,82	10,39
19/05/2015	23a16	775	*	156	1,5	50	1,4512	80	370	3	1	4	TIG	144,3	OK	28	N	N	N	160,5	16,2	37	11,2	*	*	84.174	2.136	2,54	*	*	8,17	9,71
19/05/2015	23c4	774	*	156	1,5	50	1,4512	80	370	3	1	4	TIG	144,3	OK	28	N	N	N	155,5	11,2	20	7,76	1,6	6,7	84.492	1.954	2,31	*	*	8,49	10,05
19/05/2015	111b16	773	*	156	1,5	50	1,4512	80	450	3	1	4	TIG	143	OK	28	N	N	N	158,2	15,2	24	10,6	1,7	13	84.070	2.138	2,54	*	*	8,07	9,60
19/05/2015	111a4	767	*	156	1,5	50	1,4512	80	550	3	1	4	TIG	142,8	OK	28	N	N	N	156,4	13,6	23	9,52	1,5	0	84.177	2.195	2,61	*	*	8,18	9,71
19/05/2015	106b16	769	*	156	1,5	50	1,4512	80	650	3	1	4	Laser	142,2	OK	28	N	N	N	151,9	9,7	18	6,82	1,6	6,7	84.219	1.736	2,06	*	*	8,22	9,76
19/05/2015	107b16	768	*	156	1,5	50	1,4512	80	260	4	1	4	TIG	141,9	OK	28	N	N	N	152,7	10,8	20	7,61	1,6	6,7	84.707	2.237	2,64	*	*	8,71	10,28
19/05/2015	23b19	780	*	156	1,5	50	1,4512	80	370	4	1	4	TIG	141,8	OK	28	N	N	N	150,1	8,3	18	5,85	1,7	13	84.265	3.610	4,28	*	*	8,27	9,81
19/05/2015	110b16	771	*	156	1,5	50	1,4512	80	450	4	1	4	Laser	144,2	OK	28	N	N	N	154,2	10	18	6,93	1,7	13	84.683	2.518	2,97	*	*	8,68	10,25
19/05/2015	106c19	765	*	156	1,5	50	1,4512	80	550	4	1	4	Laser	144	OK	28	N	N	N	152,3	8,3	18	5,76	1,6	6,7	84.901	2.328	2,74	*	*	8,90	10,48

Testdatum	Buisnummer	object nummer (gereduceerd deel)	object nummer (onder)	Buisdiameter (mm)	Wanddikte (mm)	Conushoek (°)	Materiaal	Diameterreductie (mm)	Toerental (tr./min.)	Axiale voeding (mm/omw.)	Radiale voeding (mm/omw.)	Stapdiepte (mm)	Lastype	Startlengte (mm)	Las ok?	Klemdruk (bar)	Kreuken (Y = yes; ± = little N = no)	Scheuren	Las defect	Eindlengte (mm)	Verlenging (mm)	lengte recht gereduceerd gedeelte (mm)	procentuele verlenging	wanddikte gereduceerd gedeelte	procentuele wanddikteverandering (%)	Diameter Mono Ave	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Roundness Mono	Procentuele rondheid (%)	Terugvering	procentuele terugvering (%)
19/05/2015	110c19	772	*	156	1,5	50	1,4512	80	650	4	1	4	Laser	144,6	OK	28	N	N	N	156,3	11,7	20	8,09	1,6	6,7	84.733	1.853	2,19	*	*	8,73	10,31
19/05/2015	106a4	770	*	156	1,5	50	1,4512	80	220VAR	4	1	4	Laser	144,9	OK	28	N	N	N	155,9	11	20	7,59	1,6	6,7	84.785	1.950	2,30	*	*	8,79	10,36
19/05/2015	107a4	766	*	156	1,5	50	1,4512	80	260VAR	4	1	4	Laser	145,4	OK	28	N	N	N	160,1	14,7	20	10,1	1,7	13	84.983	2.183	2,57	*	*	8,98	10,57
19/05/2015	107c19	*	*	156	1,5	50	1,4512	80	370VAR	4	2	4	Laser	*	OK	28	N	N	Y	*	*	20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
19/05/2015	35b14	*	*	156	1,2	50	1,4509	0	260	4	1	4	TIG	*	OK	28	Y	N	N	*	*	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20/05/2015	105A7	*	*	156	1,5	50	1,4301	80	260	4	1	4	Laser	141,7	OK	28	N	N	Y		-142	25	-100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20/05/2015	101b10	*	*	156	1,5	50	1,4301	80	260	4	1	4	Laser	143,3	OK	28	N	N	Y		-143	30	-100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20/05/2015	20a10	788	*	156	1,5	50	1,4301	80	260	4	1	4	TIG	141,9	OK	28	N	N	N	164,6	22,7	20	16	1,9	27	85.042	2.028	2,38	*	*	9,04	10,63
20/05/2015	20c22	*	*	156	1,5	50	1,4301	80	370	4	1	4	TIG	144,4	OK	28	N	Y	N	*	*	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20/05/2015	20b7	*	*	156	1,5	50	1,4301	80	260	3	1	4	TIG	145,3	OK	28	N	Y	N	*	*	21	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20/05/2015	39c14	791	*	156	1,2	50	1,4509	80	175	3	1	4	TIG	144	OK	28	N	N	N	160,3	16,3	20	11,3	1,4	17	85.413	2.034	2,38	*	*	9,41	*
20/05/2015	24c25	790	*	156	1,5	50	1,4509	80	370	4	1	4	TIG	145,2	OK	28	N	N	N	160,1	14,9	20	10,3	1,9	27	84.563	1.595	1,89	*	*	8,56	*
20/05/2015	24a1	789	*	156	1,5	50	1,4509	80	450	4	1	4	TIG	145,6	OK	28	N	N	N	163	17,4	21	12	1,9	23	85.833	2.525	2,94	*	*	9,83	*
20/05/2015	24b13	793	*	156	1,5	50	1,4509	80	550	4	1	4	TIG	140,5	OK	28	N	N	N	153,1	12,7	19	9,02	1,9	27	86.391	1.759	2,04	*	*	*	*

Buisnummer		Opmerkingen tijdens proces	Opmerkingen resultaat
51a1	Uitgevoerd met mat --> probleem: driehoekige vorm van de buis door indrukking.		Lang gereduceerd gedeelte --> diameter vergroot richting uiteinde
47b17	*		Scheurtje van 0,8 mm eindpunt --> Reden: begin van las, niet gelast
48b17	*		Zeer licht begin van kreukvorming op conus
52a14	Rimpeling op uiteinde--> pauze --> programma opnieuw gestart --> rimpels weg		Goed
51b14	*		*
48a4	Buis was licht geblutst bij start --> blutsen gingen weg		*
47c4	*		*
51c27	Axiale verschuiving		Kreuken over volledig gereduceerd gedeelte
48c21	Zelfs na drukverhoging --> axiale verschuiving		Kreuken op einde
47a21	*		Kreuken op einde
52b1	*		*
46c1	*		*
49a4	*		Begin van kreukvorming
50a4	*		Kreuken over hele lengte
65b7	*		*
66B7	*		*
65c11	*		*
66c11	*		*
46b14	*		*
49b17	Programma gestopt op stap x = 67 mm, door kreuken		*
50b17	Programma gestopt op stap x = 61 mm, door kreuken		*
49c21	Programma gestopt op stap x = 65 mm, door kreuken		*
50c21	*		*
65a24	Programma gestopt halverwege (door trillend geluid) en opnieuw begonnen		*
66a24	*		*
46a27	*		*
52c27	*		*
33a4(1)	*		*
87a4(1)	Buis verschuift axiaal bij beweging weg van conus		*
88a4(1)	klemmen volledig uitgedraaid nu, nog steeds axiaal verschoven, max klemdruk ingesteld		*

Buisnummer		Opmerkingen tijdens proces	Opmerkingen resultaat
91a4(1)	Unidirectioneel pad richting conus --> enkel drukkrachten		Las gesprongen na 2--3de stap
89a4(1)	Unidirectioneel pad richting conus --> enkel drukkrachten		*
15a6(1)	Buis verschuift axiaal bij beweging weg van conus		*
33a4(2)	Vervormde deel van vorige test afgestoken en zelfde test uitgevoerd		Goed resultaat betere klemming, door pennen in klemmen
87a4(2)	Vervormde deel van vorige test afgestoken en zelfde test uitgevoerd		Goed resultaat betere klemming, door pennen in klemmen
88a4(2)	Vervormde deel van vorige test afgestoken en zelfde test uitgevoerd		Goed resultaat betere klemming, door pennen in klemmen
91a4(2)	Vervormde deel van vorige test afgestoken en zelfde test uitgevoerd		Goed resultaat betere klemming, door pennen in klemmen
89a4(2)	Vervormde deel van vorige test afgestoken en zelfde test uitgevoerd		Goed resultaat betere klemming, door pennen in klemmen
15a6(2)	Niet uitgevoerd omdat startdiameter te klein was voor kern (echte buitendiam = 120 mm)		*
29a18	Fout in machine, roller tool is verschoven in klemgedeelte		*
32c18	Trillend geluid bij lasnaad		Op conus bevat lasnaad gaten, de las is er uit gedrukt/gebroken
92b18	*		Lasnaad begint net te scheuren
94b18	*		*
95b18	*		*
97b18	*		*
29b5	*		*
92a5	*		*
94a5	*		*
95a5	*		*
96a5	*		*
5c6	Las breekt open aan uiteinde, tijdens vervormen		*
17c6	Scheur ontstaat op overgang conisch--recht, gestopt op pas 63mm=61reductie		*
32b19	Rol loopt op einde niet helemaal uit werkstuk door verlenging		las gescheurd over 25 mm
92c19	op laatste stap ontstaat scheur		scheur in las op buiseinde
97c19	*		*
94c19	*		scheur in las op buiseinde
96b19	*		*

Buisnummer		Opmerkingen tijdens proces	Opmerkingen resultaat
95C19	*		Begin van scheurvorming
89c21	*		scheur in las op buiseinde
88c21	Toen las brak, gestopt op x=76 mm		scheur in las op buiseinde
33c21	*		*
87c21	Toen las brak, gestopt op x=64 mm		scheur in las op buiseinde
22a14	*		Kreuken over volledig gereduceerd gedeelte
91c21	*		Las gesprongen
42b14	*		Kreuken over volledig gereduceerd gedeelte
88b17	*		kreuken op conus
87b17	*		*
91b17	*		*
89b17	*		kreuken over volledig gereduceerd gedeelte
8a4	proces gestopt na 1 pas		las gesprongen
97a4	*		*
12a5	proces gestopt na 1 pas		las gesprongen
15a6	*		*
4a6	Las breekt na 67 mm		las gebroken op uiteinde
5b16	Las breekt na 97 mm		las gebroken over volledig recht gereduceerd gedeelte
15b16	*		*
33b17	*		*
96c19	*		Te kort recht gedeelte
29c19	*		*
17b16	*		*
8c21	Las breekt na 1 stap		las gesprongen
15c20	Las breekt bij laatste stap		las gesprongen
70b10	*		*
67a11	*		*
69b12	*		*
68b7	Las scheurde -> gestopt		las gebroken op uiteinde

Buisnummer		Opmerkingen tijdens proces	Opmerkingen resultaat
67b7	*		*
17a20	Variabele rotatiesnelheid (G96) van 420 tot 1000 rpm, proces gestopt door kreuken		Sterke kreuken in eindproduct
71b9	Las scheurde -> gestopt		Las gescheurd over conus en recht gedeelte
76b12	Las scheurde -> gestopt		Las gescheurd over conus en recht gedeelte
72b12	Las scheurde -> gestopt		las gebroken op uiteinde
76a	*		*
70a9	Las scheurde -> gestopt		las gebroken op uiteinde
69c22	*		*
72a8	*		Te kort recht gedeelte
69a8	*		*
71c10	Las scheurde -> gestopt		las gebroken op uiteinde
71a23	Las scheurde -> gestopt -> volgende test uitgevoerd met austeniet		las gebroken op uiteinde
68a24	*		*
72c22	*		*
28b20	Eerste toerental variabel s245-->kreuken --> toerental vast		Lichte kreuken op begin conus, de rest goed
28c17	*		Lichte kreuken op begin conus
27b5	gestopt toen kreuken ontstonden--> opnieuw gestart en trage voeding --> kreuken weg		Lichte kreuken op begin conus
27c5	*		Kreuken over conus, golvend profiel op uiteinde recht gedeelte
27a20	*		*
28a17	*		*
23a16	*		*
23c4	*		*
111b16	*		*
111a4	*		*
106b16	*		*
107b16	*		*
23b19	*		*
110b16	*		*
106c19	*		*

Buisnummer		Opmerkingen tijdens proces	Opmerkingen resultaat
110c19	*		*
106a4	*		*
107a4	*		*
107c19	Las gesprongen na eerste pas --> gestopt		*
35b14	In begin ontstonden kleine kreuken --> doorgedaan tot ernstige kreuken		Mogelijke oplossing--> dikkere kern
105A7	Na +-4de pas las gescheurd		Las gescheurd
101b10	Na +-4de pas las gescheurd, lichte rookontwikkeling, zeer warme buis		Las gescheurd
20a10	Verbrande geur--> zeer warme buis		*
20c22	Scheur ontstaat op overgang conisch--recht		Scheur op overgang conisch--recht
20b7	Scheur ontstaat op overgang conisch--recht		Scheur op overgang conisch--recht
39c14	*		*
24c25	*		*
24a1	Bij 3de pas trillingen maar gingen over na 5de pas		*
24b13	*		*

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Analyse van de mogelijkheden van rotatiesymmetrisch spinnen van buisvormig materiaal

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**

Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Didden, Michael

Heleven, Michiel

Datum: **29/05/2015**