

FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN

Vakgroep Mechanische Constructie & Productie Voorzitter: Prof. dr. ir. Joris Degrieck

ONTWIKKELING VAN IMPACT-DYNAMISCHE DRUKPROEVEN

door Jan Peirs

Promotor: Prof. dr. ir. Patricia Verleysen Begeleider: ir. Joost Van Slycken

Scriptie voorgedragen tot het behalen van de academische graad van burgerlijk werktuigkundig-elektrotechnisch ingenieur

Academiejaar 2006–2007

Dankwoord

Deze thesis gaf me de mogelijkheid om in contact te komen met diverse aspecten van de ingenieurswetenschappen. De afwisseling tussen enerzijds het experimentele onderzoek op een unieke proefopstelling en anderzijds de theorie en computersimulaties zorgde ervoor dat het werk altijd boeiend bleef. Deze leerrijke ervaring was echter enkel mogelijk dankzij de steun van een groot aantal personen.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor Prof. Patricia Verleysen bedanken voor het vertrouwen dat ze in mij gesteld heeft. Haar bereidheid om problemen te bespreken, hielp me telkens een grote stap vooruit. Haar gedrevenheid werkte voor mij sterk motiverend.

Een bijzonder woord van dank gaat uit naar mijn begeleider ir. Joost Van Slycken. Hij stond altijd klaar om problemen aan te pakken. Zijn raad en daad bij de experimenten en de verwerking ervan, waren van onschatbare waarde.

Het maken van de proefstukken was enkel mogelijk dankzij het vakmanschap van Luc Van den Broecke. Ook bij andere praktische aspecten van de opstelling was zijn hulp onmisbaar. Eveneens ben ik Michel De Waele erg dankbaar voor de hulp bij het vervaardigen van de proefstukken.

Ik wens Chris Bonne te bedanken voor het oplossen van allerlei elektronicaproblemen. Johan De Clercq verdient een woord van dank voor zijn praktische raad, alsook Ebrahim Lamkanfi voor de hulp bij de verwerking van de simulatieresultaten.

Zeker niet te onderschatten is de steun van mijn medestudenten, waarvoor mijn oprechte dank.

Bovendien wil ik mijn ouders Lode en Martine bedanken voor de mogelijkheid die ze mij hebben gegeven om deze studie te volgen en voor hun steun tijdens de voorbije vijf jaar. Tenslotte dank ik mijn lieve vriendin Jaíme voor haar ononderbroken steun en vrolijkheid gedurende dit drukke jaar.

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van de resultaten uit deze scriptie.

Gent, 24 mei 2007

Jan Peirs

Overzicht

Ontwikkeling van impact-dynamische drukproeven

 door

Jan Peirs

Promotor:	Prof. dr. ir. Patricia Verleysen
Begeleider:	ir. Joost Van Slycken
Vakgroep:	Mechanische Constructie en Productie
	Faculteit Ingenieurswetenschappen
	Universiteit Gent
Academiejaar:	2006-2007

Samenvatting

Recent metallurgisch onderzoek heeft geleid tot de ontwikkeling van nieuwe, geavanceerde staalsoorten, waaronder TRansformation Induced Plasticity (TRIP) staal. In veel toepassingen (autocrash, snelle omvormprocessen, bepantsering,...) waar dit materiaal wordt aangewend, zijn de optredende vervormingssnelheden hoog. Het is bekend dat de mechanische eigenschappen van materialen bij dynamische vervormingen sterk kunnen verschillen van die bij statische belasting. Over het dynamisch materiaalgedrag van TRIP-staal is echter nog lang niet alles gekend.

Een veel gebruikte methode om de dynamische materiaaleigenschappen te bepalen is de Hopkinson techniek. Hiermee is het mogelijk om trek-, druk-, torsie-, en buigproeven uit te voeren, gebaseerd op hetzelfde principe. In het eerste hoofdstuk wordt de werking van de Hopkinson drukproeven besproken en het hoofdstuk wordt beëindigd met een korte beschrijving van TRIP-staal.

De vakgroep Mechanische Constructie en Productie aan de Universiteit Gent beschikt over een Hopkinson opstelling. Deze werd reeds met succes aangewend voor het uitvoeren van dynamische trekproeven. Dit afstudeerwerk concentreert zich nu op het uitvoeren van dynamische drukproeven met deze opstelling. Het tweede hoofdstuk begint met een beschrijving van de opstelling. Vervolgens worden enkele aanpassingen die nodig waren voor het uitvoeren van drukproeven verduidelijkt. In hoofdstuk 3 wordt de sturing van de opstelling geautomatiseerd m.b.v. een LabVIEW programma. De aanpassingen aan het pneumatisch circuit die hiervoor noodzakelijk waren, worden eveneens in dit hoofdstuk beschreven.

In hoofdstuk 4 worden de afmetingen van de proefstukken voor drukproeven bepaald op basis van een literatuurstudie. Het doelmateriaal voor deze proefstukken is plaatstaal. Er wordt onderzocht hoe proefstukken voor drukproeven kunnen gemaakt worden uit plaatstaal.

De staven van de Hopkinson opstelling bestaan uit aluminium. Dit brengt problemen met zich mee voor het beproeven van hardere materialen zoals TRIP-staal: het proefstuk laat een indrukking na in de staven. In het vijfde hoofdstuk wordt onderzocht hoe deze indrukking beperkt kan worden, zonder van aluminium staven af te stappen.

In verschillende onderdelen van deze thesis wordt gebruik gemaakt van eindige elementen simulaties. Hoofdstuk 6 concentreert zich op de simulaties en de resultaten ervan. De simulaties worden o.a. gebruikt om de spanningsverdeling in het proefstuk tijdens een proef te analyseren. De invloed van de wrijving in de contactvlakken van het proefstuk met de staven en de invloed van de proefstuklengte worden onderzocht. Hieruit volgen dan conclusies voor de proefstukgeometrie.

In het achtste hoofdstuk worden de uitgevoerde experimenten besproken. Twee proefmaterialen worden hier onderzocht: een staal met weinig rekversteviging en TRIP-staal. De proefresultaten worden vergeleken met de computersimulaties.

In hoofdstuk tien worden de belangrijkste vaststellingen en conclusies uit dit onderzoek gebundeld en worden een aantal aanwijzingen gegeven voor verder onderzoek.

Trefwoorden

Hopkinson (SHPB), Dynamische drukproef, plaatstaal, TRIP-staal, proefstukgeometrie, eindige elementen (ABAQUS)

Impact-dynamic compression experiments on sheet steels

Jan Peirs

Supervisor(s): P. Verleysen, J. Van Slycken

Abstract—Designing applications used under dynamic conditions requires the understanding of the mechanical properties of the materials, especially under high speed loads. In this project, the use of a split Hopkinson pressure bar (SHPB) set-up for testing high strength sheet steels is investigated. Buckling of the specimen under compressive loads was tackled by the use of sandwich specimen. Several experiments are carried out on two different types of steel. An additional full scale finite element model was created to gain insight into the process of dynamic compression and to examine the stress distribution in the test specimen.

Keywords— Hopkinson, SHPB, Dynamic compression, FEM, TRIP-steel

I. INTRODUCTION

RECENT metalurgical developments have led to new advanced steels such as TRansformation Induced Plasticity (TRIP) steels. Due to their fine-grained multiphase microstructure, these steels exhibit exceptional mechanical properties: they combine high strength values with an excellent ductility [1]. This makes them suitable for applications where a great amount of plastic deformation energy has to be absorbed, e.g. crash resistant structures and fast metal-forming techniques. In those applications material deformation rates can be very high. A thorough understanding of the dynamic behaviour is thus required for the extensive use of these steels.

A lot of research has already been conducted on characterising dynamic material behaviour. One of the most commonly used set-ups is the split Hopkinson bar, where materials can be tested at chosen high speed deformation rates, ranging from 500 to $2000 \, s^{-1}$ [2] [3]. The department of Mechanical Construction and Production of Ghent University has the disposal of a Hopkinson bar set-up. Successful tensile tests have been performed on this apparatus.

Figure 1 shows the principle of a Hopkinson pressure bar set-up. It mainly consists of two bars: an input bar and an output bar between which a small specimen of the test material is placed. The incident pressure wave is produced by an impactor that is pneumatically accelerated towards the anvil of the input bar. The incident wave ϵ_i interacts with the specimen, and is partly reflected back into the input bar (ϵ_r) and transmitted to the output bar (ϵ_t). Under certain conditions it is possible to retrieve the stress and strain state of the specimen from the elastic waves ϵ_r and ϵ_t in the bars. The data collected during these tests can be used to validate material models which at their turn can be applied to finite element simulations.

II. NEED

In many applications components are loaded under compressive forces. Compressive material properties are not



Fig. 1. Principle of the Hopkinson pressure bar set-up.

exactly the same as the properties in tension. For that reason dynamic compression experiments are necessary.

TRIP-steels are in general used in the shape of thin sheets and direct compressive testing of sheet steels causes buckling. Methods to avoid buckling have to be examined.

III. TASK

First of all an appropriate specimen geometry had to be chosen to minimize effects of inertia and frictional constraints at the specimen-pressure bar interfaces. Moreover, buckling had to be prevented. Furthermore, it should be possible to make these specimens in a reproducible way.

Finite element simulations had to be used for optimizing specimen geometry and to gain insight in the process of dynamic compression.

Several improvements to the SHPB set-up where desirable in order to carry out compressive experiments.

Experiments had to be performed to investigate the performance of sandwich specimen in compressive tests.

IV. FINDINGS

A. Adjustments to the test set-up

A.1 Incident wave generation

Theoretically, a cylindrical impactor produces a bloc wave. However, during experiments a deformed input wave was observed. Examination of the accelerator through pressure monitoring and high speed photography, led to the conclusion that radial expansion of the impactor caused gripping of the impactor in the accelerator tube. The problem was solved by attaching an exterior slide to the accelerator.

A.2 Indentation of the bar ends

For the apparatus to function as designed, the yield stress of the specimen must be considerably smaller than the yield stress of the bars. The ends of the bars then remain flat as the sample deforms. Furthermore, the tensile pulse which reflects on the specimen into the incident bar is essentially a measure of the velocity of the end of the incident bar relative to the end of the transmission bar.

When on the other hand hard materials are being tested such as TRIP-steels, the hard sample indents the bar ends, which has several disadvantageous consequences. Besides damaging the Hopkinson bars, the indentation causes

Department of Mechanical Construction and Production, Ghent University (UGent), Gent, Belgium. E-mail: Jan.Peirs@UGent.be.

stress concentrations in the specimen. In addition the average relative velocity of the ends of the incident and transmission bars due to indentation, introduces a significant error in the results. So the reflected wave in the incident bar is no longer an accurate measure of the strain rate in the specimen, although the transmitted pulse is still a good indication of the stress in the specimen [4].

To avoid these problems several solutions where investigated using finite element simulations. Eventually, protection of the aluminium bar ends with CP1000-steel plates (Complex Phase) and hardened Al7075-T6 stumps was selected.

A.3 Test automation

A LabVIEW program was built to automate the operation of the test set-up. Therefore the pneumatic circuit had to be rearranged to reduce the complexity of the program.

B. Specimen geometry and production

Currently, there is no standard design for SHPB specimens. Several researchers propose an optimal specimen geometry to minimize effects of inertia and frictional constraints [5] [6]. Based on a literature review, cylindrical specimens with equal length and diameter of 5 mm where chosen. Through experiments and simulations this was adjusted to a length of 4 mm and diameter of 5 mm.

As mentioned before, cylindrical specimens had to be made out of sheet steels. Four thin sheets glued together could be shaped into cylindrical specimens by the use of conventional production techniques alone.

C. Finite element modelling

Several models were built in the FE program Abaqus and used for different purposes. In the first place a full scale model was applied to gain insight in the dynamic compression process. The calculated stress-strain state from the reflected and transmitted wave was compared with the actual stress-strain state of the specimen. The calculated stress seems to be slightly higher than the actual stress. The one-dimensionality and stress distribution in the specimen have an influence on this.

Therefore, it is important to have an idea of the stress distribution, stress uni-axiality and distribution of the stress uni-axiality in the specimen. With the model it was possible to visualize these parameters. Figure 2 shows the uni-axiality through a specimen. It is calculated by $\frac{\sigma_v}{\sigma_{kk}}$, with σ_v the von Mises stress and σ_{kk} the trace of the stress tensor. This ratio has the value of zero for a hydrostatic stress state and one for a one-dimensional stress state.

In addition, stresses in the glue layers could be determined by simulations. Frictional constraints and high specimen length are disadvantageous.

D. Impact-dynamic experiments

Two different steels (a commercial high strength steel and TRIP800-steel) where tested through 26 experiments. Each experiment was filmed with a high speed camera. The experimental results are compared with simulations. Figure 3 shows stress-strain curves of two dynamic compression tests and one tensile test [1]. Compressive and



Fig. 2. Uni-axiality in a specimen

tensile curves do not match exactly due to specimen buckling, indentation of the bar ends and roughness of the contact faces.



Fig. 3. Compressive and tensile [1] stress-strain curves

V. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

Finite element simulations were very useful in order to complement the experimental testing. Although a "perfect" test was not achieved, dynamic compression of sheet steels is possible by the use of a sandwich specimen. However, further research is necessary to obtain better suited glues. On the other hand alternative specimen geometries can lead to lower stresses working on the glued faces. The use of an other material for the Hopkinson bars can improve the signal processing by preventing indentation of the bar ends.

REFERENCES

- Van Slycken J., Verleysen P., Degrieck J., Samek L., and De Cooman B.C., "High-strain-rate behavior of low-alloy multiphase aluminiumand silicon-based transformation-induced plasticity steels," *OLUME*, vol. 37A, pp. 1527–1539, 2006.
- [2] Verleysen P., Experimentele studie en numerieke modellering van het dynamisch gedrag in trek van een al dan niet vezelversterkt quasibros materiaal, Ph.D. thesis, Universiteit Gent, 1999.
- [3] Lee O.S. and Kim M.S., "Dynamic material property characterization by using split hopkinson pressure bar (shpb) technique," *Nuclear Eng. And Design*, 2003.
- [4] Isaacs J.B. Nemat-Nasser S. and Starrett J.E., "Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments," *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 435, 1991.
- [5] Deltort B., Neme A., and Tanguy B., "A new specimen geometry for compression hopkinson bars," *Journal De Physique IV*, 1997.
- [6] Davies E.D.H. and Hunter S. C., "The dynamic compression testing of solids by the method of the split hopkinson pressure bar," J. Mech. Phys. Solids, vol. 11, 1963.

Inhoudsopgave

Da	ankw	oord		i
To	elati	ng tot	bruikleen	ii
0	verzi	cht		iii
Li	jst va	an sym	ıbolen en afkortingen	x
1	Inle	iding		1
	1.1	Situeri	ng van de thesis	2
	1.2	Doelst	ellingen van de thesis	3
	1.3	De Ho	pkinson proef	4
		1.3.1	Opstelling voor beproeving in druk	4
		1.3.2	Golfvoortplanting in een staaf	7
		1.3.3	Opwekken van een spanningsgolf	7
		1.3.4	Vervorming en spanning in het proefstuk bij een Hopkinson proef	7
	1.4	TRIP-	staal	9
	1.5	Materi	aalmodellen	10
2	De	Hopkiı	nson opstelling	12
	2.1	De Op	stelling	12
		2.1.1	Hopkinsonstaven en hun ondersteuning	12
		2.1.2	Versneller	13
		2.1.3	Data-acquisitie	13
	2.2	Uitlijn	ing versneller	14
	2.3	Optim	alisatie van de versneller	17
		2.3.1	Snelheidsmeting	19
		2.3.2	Drukmeting	20
		2.3.3	Vergelijking impactor geometrie en opgewekte spanningsgolf $\ . \ . \ . \ .$	21
		2.3.4	Aanpassing versneller	22
	2.4	Absorb	oer	25

3	Aar	nsturin	g	26
	3.1	Oorspi	ronkelijk pneumatisch circuit en aansturing	26
	3.2	Aanpa	assingen aan het circuit	27
	3.3	LabVI	IEW^{TM} programma ASIDE	31
		3.3.1	$LabVIEW^{TM}$	31
		3.3.2	Automation Software for Impact and Dynamic Experiments	
			(ASIDE)	31
		3.3.3	Verband tussen pers druk, impacts nelheid, vervormingssnelheid $\ \ . \ . \ .$	35
	3.4	Evalua	atie van de sturing	37
4	Pro	efstuk	geometrie en -productie	38
	4.1	Proefs	tukgeometrie	38
	4.2	Vervaa	ardigen van de proefstukken	41
5	Opt	timalis	atie van de staafuiteinden	45
	5.1	Proble	eemomschrijving	45
	5.2	Besche	ermplaatjes	46
		5.2.1	Invloed van de beschermingsplaatjes op de golfvormen $\ .\ .\ .\ .$.	47
		5.2.2	Resultaten	48
	5.3	Gehar	de aluminium stompjes	48
		5.3.1	Resultaten	49
	5.4	Aange	epaste geometrie	49
		5.4.1	Aangepaste geometrie van het proefstuk	49
		5.4.2	Aangepaste geometrie van de staafuiteinden	50
	5.5	Voorsp	panning	51
	5.6	Invloe	d op de golfvormen	52
6	Ein	dige E	lementen Simulaties	53
	6.1	Statise	ch model	53
	6.2	Full-sc	cale model van de opstelling	57
		6.2.1	Algemeen	57
		6.2.2	Overzicht van de uitgevoerde simulaties met full-scale modellen \ldots .	58
		6.2.3	Volledige opstelling met Al stompjes en beschermingsplaatjes	59
		6.2.4	Hopkinsonstaven en beschermingsplaatje elastisch en $\mu = 0$	65
	6.3	Model	van het staafuiteinde	67
	6.4	Spann	ingsverdeling in een proefstuk	67
		6.4.1	Spanningscomponenten in een proefstuk	67
		6.4.2	Gesimuleerde spanningsverdeling	69
		6.4.3	Invloed van de wrijving op de spanningsverdeling	76
		6.4.4	Invloed van de proefstuklengte op de spanningsverdeling \hdots	77
		6.4.5	Invloed van het materiaal op de spanningsverdeling	81

7	Dyr	namische drukproeven	82
	7.1	Praktische opmerkingen	82
		7.1.1 Centreren van het proefstuk	82
		7.1.2 Hogesnelheidscamera	83
	7.2	Proeven op staal met vloeigrens $\sigma_y = 550 MPa$ en weinig rekversteviging	84
		7.2.1 Bespreking van de proeven	84
		7.2.2 Beschadiging van de beschermingsplaatjes	89
		7.2.3 Vergelijking met simulaties	90
	7.3	Proeven op TRIP-staal	92
		7.3.1 Overzicht van de proeven	92
		7.3.2 Verwerking van de proefresultaten	93
		7.3.3 Vergelijking van drukproeven met trekproeven	99
		7.3.4 Vergelijking met simulaties	99
8	Bes	luiten en aanbevelingen voor verder onderzoek 10	01
	8.1	Besluiten	01
	8.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek	03
Α	Lev	eranciers 10	04
в	Aar	asluiting stuur en meet PC 10	05
	B.1	Overzicht	05
	B.2	Verbinding van de acquisitie-kaart met de connectorbox	07
	B.3	Connectorkabel	07
С	Kal	ibratie druksensor 10	08
D	CA	D-tekeningen 10	09
	D.1	Centreerstuk	09
	D.2	Zaaghouder	09
	D.3	Impactorglijbaan	09
\mathbf{E}	Dat	asheets van de gebruikte lijm en smeermiddelen 11	13
\mathbf{F}	Log	boek en Rapport 11	16
	F.1	Voorbeeld van een rapport	16
	F.2	Voorbeeld van een logboek	16
G	CD	-rom 1	19

Lijst van symbolen en afkortingen

Romeinse hoofdletters

$A_{i,s,p}$	Oppervlak van de doorsnede van de impactor, staven en proefstuk
$C_{i,s}$	golfvoortplantingssnelheid in de impactor en ingangsstaaf
С	correctiefactor voor de drukval en wrijvingsverliezen
Ε	elasticiteitsmodulus
F	kracht
L_i	impactorlengte
L_p	proefstuklengte
\mathbf{S}_{ij}	spanningscomponent werkend op een vlakje met normale i in de richting j
V	impactsnelheid
$\mathbf{Z}_{i,s}$	Impedantie van de impactor en staven

Kleine Romeinse letters

1	stroke=afstand waarover impactor versnelt
\mathbf{m}_i	impactormassa
р	luchtdruk
$\mathbf{r}_{R,T}$	reflectiecoëfficiënt en transmissiecoëfficiënt
t	tijd
u	deeltjesverplaatsing
v	deeltjessnelheid

Kleine Griekse letters

ϵ	rek
$\epsilon_{i,r,t}$	ingaande, gereflecteerde en doorgelaten golf
$\dot{\epsilon}$	vervormingssnelheid
λ	golflengte
μ	wrijvingscoëfficiënt
ho	massadichtheid
σ	spanning
v	uni-axialiteit

Hoofdstuk 1

Inleiding

In dit eerste hoofdstuk wordt kort het kader geschetst van dit afstudeerwerk en worden de doelstellingen beschreven. Hiervoor is het noodzakelijk om dieper in te gaan op de basisprincipes van dynamische materiaalbeproeving door middel van een Split Pressure Bar (SHPB) opstelling. Enkele belangrijke formules alsook de verwerking van de proefresultaten worden toegelicht. Het hoofdstuk wordt beëindigd met een korte beschrijving van het gebruikte proefmateriaal, nl. TRansformation Induced Plasticity staal (TRIP-staal). Deze staalsoort wordt o.a. gebruikt in de auto-industrie (fig. 1.1).



Figuur 1.1: Materiaalsamenstelling van een moderne autobody uit het UltraLight Steel Auto Body (ULSAB) program van Porsche Engineering Services, Inc. (PES)

1.1 Situaring van de thesis

Recent metallurgisch onderzoek heeft geleid tot de ontwikkeling van nieuwe, geavanceerde staalsoorten. Voorbeelden hiervan zijn Dual Phase (DP), Transformation Induced Plasticity (TRIP) en Complex Phase (CP) stalen. Hun fijnkorrelige microstructuur waarin verschillende materiaalfasen voorkomen, zorgt voor bijzondere mechanische eigenschappen. Kenmerkend is een hoge sterkte in combinatie met een grote vervormingscapaciteit. Hierdoor zijn ze in staat om bij plastische deformatie een grote hoeveelheid energie te absorberen (zie verder §1.4).

Net omwille van deze eigenschappen wordt in de auto-industrie graag gebruik gemaakt van deze nieuwe materialen. De hoge sterkte leidt tot gewichtsreductie (en lager brandstofverbruik), de grote vervormbaarheid maakt het mogelijk om complexe onderdelen te vervaardigen (door bijv. hydroforming). De hoge energie-absorptie is dan weer enorm belangrijk bij het ontwerp van wagens met een verbeterde crashbestendigheid (crashworthiness). Hetzelfde is geldig voor ontelbare andere toepassingen waar deze materialen kunnen worden aangewend zoals vogelimpact op turbineschoepen, snelle omvormprocessen, bepantsering,...

Bij al deze toepassingen zijn de optredende vervormingssnelheden zeer hoog. Het is bekend dat de mechanische eigenschappen van materialen bij dynamische vervormingen sterk kunnen verschillen van die bij statische belastingen. Over het dynamisch materiaalgedrag van de nieuwe generatie staalsoorten waaronder TRIP-staal is echter nog lang niet alles gekend. Kennis hiervan is onontbeerlijk om optimaal gebruik te kunnen maken van deze materialen. Momenteel wordt daarom intensief onderzoek verricht naar het dynamisch gedrag van o.a. TRIP-staal.

Een veel gebruikte methode om de dynamische materiaaleigenschappen te bepalen is de Hopkinson techniek [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] (§1.3). Hiermee kunnen vervormingssnelheden in het bereik van $10^2 s^{-1}$ tot $10^4 s^{-1}$ behaald worden. De Hopkinson techniek heeft een aantal specifieke voordelen t.o.v. andere experimentele methoden: het principe is relatief eenvoudig en bovendien moet er niet op het proefstuk zelf gemeten worden om de spannings- en rektoestand van het materiaal te bepalen. Het is mogelijk om trek-, druk-, torsie- en buigproeven uit te voeren, gebaseerd op hetzelfde principe. De proefresultaten zijn over het algemeen nauwkeurig en de reproduceerbaarheid is goed. Niettemin wordt vastgesteld dat verschillende testen op hetzelfde materiaal tegenstrijdige resultaten kunnen opleveren [8] [9] [1] [10]. Dit is hoofdzakelijk te wijten aan de invloed van de proefstukgeometrie en de interactie van de eindvlakken van het proefstuk met de Hopkinsonstaven.

De resultaten van de experimentele beproeving worden ondermeer gebruikt voor het opstellen van materiaalmodellen. Deze materiaalmodellen worden dan aangewend voor het uitvoeren van numerieke simulaties. Zulke simulaties vormen een onmisbaar hulpmiddel om reeds van in de ontwerpfase van nieuwe componenten rekening te houden met het dynamisch materiaalgedrag. De simulaties worden ook zeer nuttig aangewend voor de fundamentele studie van het vervormingsgedrag van allerlei materialen en geometrieën. Informatie zoals spanningsconcentraties, temperatuurverloop van inwendig materiaal, versnellingen,... is zeer moeilijk experimenteel te bekomen. Ook hier vormen simulaties de uitkomst. De resultaten van simulaties zijn echter maar zo nauwkeurig als de onderliggende materiaalmodellen. Vandaar het grote belang van experimentele materiaalkarakterisering.

1.2 Doelstellingen van de thesis

- De Vakgroep Mechanische Constructie en Productie aan de Universiteit Gent beschikt over een Hopkinson opstelling (fig. 1.2). Deze opstelling werd in het verleden al succesvol gebruikt voor het uitvoeren van proeven in trek. In een vorig afstudeerwerk [11] werd de opstelling wel al uitgebreid voor het uitvoeren van compressieproeven, maar een aantal problemen bleven onopgelost. Zo had de opgewekte drukgolf niet de gewenste blokgolfvorm. Daarnaast werd vastgesteld dat de impactor meerdere keren impacteert op de ingangsstaaf. Ook met de uitlijning van de impactor t.o.v. de ingangsstaaf was er een probleeem. Het was de bedoeling om tijdens dit afstudeerwerk deze tekortkomingen weg te werken.
- Terwijl de beproeving in trek volledig automatisch verloopt, was er voor de proeven in druk nog geen sturing. Dit kwam de reproduceerbaarheid niet ten goede en kon leiden tot onveilige situaties. Om hieraan tegemoet te komen, diende het volledige proefverloop geautomatiseerd te worden m.b.v. een LabVIEW sturing. Dit gebeurde bij voorkeur op een analoge manier als voor de trekproeven.
- TRIP-staal en andere nieuwe generatie staalsoorten zijn standaard beschikbaar onder de vorm van dunne platen. Dit komt door het specifieke productieproces waar een combinatie van mechanische belasting (walsen) en thermische behandelingen zorgt voor het ontstaan van de typische eigenschappen van TRIP-staal (§1.4). Voor de beproeving in druk stelt zich daarom een probleem. Het belasten van plaatmateriaal leidt snel tot knik. Er werd onderzocht hoe met plaatmateriaal toch bruikbare proefstukken voor dynamische compressieproeven kunnen gemaakt worden. Een literatuurstudie was vereist om de meest optimale proefstukgeometrie te bepalen.
- Naast het experimentele werk, werd ook aandacht besteed aan het opstellen van een eindig elementen model in ABAQUS. Een numeriek model is erg handig om snel de invloed van verschillende ontwerpparameters (proefstukgeometrie, vorm van de staafuiteinden, wrijving...) na te gaan. Een eindig elementen model kan daarnaast ook gebruikt worden om materiaalmodellen te verfijnen. Door het vergelijken van experimentele resultaten met de resultaten van simulaties kan de nauwkeurigheid van de materiaalmodellen sterk verbeterd worden. De techniek om modellen te verfijnen door middel van de combinatie van experimenten en simulaties is reeds beschreven in [8].



Figuur 1.2: De Hopkinson opstelling

1.3 De Hopkinson proef [8]

1.3.1 Opstelling voor beproeving in druk

Een schematische voorstelling van de opstelling wordt weergegeven in figuur 1.4. Zij bestaat uit een impactor, een ingangsstaaf, het proefstuk en een uitgangsstaaf. Ingangs- en uitgangsstaaf hebben doorgaans dezelfde diameter. Bij het uitvoeren van een proef impacteert de impactor op het vrije uiteinde van de ingangsstaaf (het aambeeld). Dit wekt een longitudinale drukgolf ϵ_i op die in de ingangsstaaf propageert naar het proefstuk toe. Een deel van de golf wordt terug in de ingangsstaaf gereflecteerd op het grensvlak ingangsstaaf-proefstuk (ϵ_r). Het andere gedeelte wordt doorgelaten (ϵ_t) en propageert verder in de uitgangsstaaf. De ingaande ϵ_i , gereflecteerde ϵ_r en de doorgelaten golf ϵ_t worden geregistreerd met behulp van rekstrookjes op de Hopkinsonstaven. Figuur 1.3 toont de overeenkomstige spanningsgolven. De staven dienen dus als golfgeleider en als "meetinstrument". De plaatsen waar de golven opgemeten worden, zijn gekozen zodat er geen interferentie is tussen de golven onderling. Dit is niet noodzakelijk maar het maakt de verwerking van de proefresultaten wel veel eenvoudiger omdat dan één rekmeting op de ingangsstaaf en één meting op de uitgangsstaaf volstaan. Indien er op de staven geen plaatsen voorkomen zonder interferentie (door gebruik van te korte staven), zijn twee rekmetingen op de ingangsstaaf vereist. Voor het bepalen van de plaatsen zonder



Figuur 1.3: Voorbeeld van drie opgemeten golven bij een trekproef

interferentie kan het Lagrange diagram (fig. 1.5) gebruikt worden. Dit diagram toont de optredende golven i.f.v. de plaats en tijd. Het afgebeelde diagram is geldig voor zowel drukals trekproeven op de gebruikte opstelling. Het verticale zwarte lijntje stelt de belasting van het proefstuk voor. De belastingsduur komt overeen met de periode van de opgewekte golf.



Figuur 1.4: Schematische voorstelling van de Hopkinson opstelling voor drukproeven

Onder welbepaalde voorwaarden kunnen uit de opgemeten golven ϵ_i , ϵ_r en ϵ_t het tijdsverloop van de rek ϵ , de vervormingssnelheid $\dot{\epsilon}$ en de spanning σ in het proefstuk worden bepaald. De vereenvoudigde veronderstellingen zijn:

- in de Hopkinsonstaven en het proefstuk heerst een uniaxiale spanningstoestand
- het proefstuk bevindt zich in een toestand van quasi-statisch evenwicht

• de staven blijven elastisch

Als aan deze veronderstellingen voldaan wordt, zijn de berekeningen relatief eenvoudig (zogenaamde klassieke verwerking). Dit is een groot voordeel van de Hopkinson techniek. In werkelijkheid zijn er echter een aantal storende invloeden: dispersieverschijnselen, inertie en wrijving kunnen voor onjuiste resultaten zorgen. Door een goede keuze van de proefstukgeometrie (§4) en door het gebruik van een smeermiddel in het contactvlak proefstuk-staaf kan de invloed van de wrijvings- en inertieëffecten tot een minimum beperkt worden. Dispersieverschijnselen komen voort uit de golfvoortplanting in de Hopkinsonstaven en worden gereduceerd bij het gebruik van staven met een kleine diameter. Er bestaan alternatieve verwerkingsmethodes om toch met dispersieverschijnselen rekening te houden. Een gecombineerde numeriek-experimentele aanpak kan ook een optie zijn om met deze storende verschijnselen om te gaan [8].



Figuur 1.5: Lagrangediagram voor de trek- en drukopstelling

In de paragrafen die volgen worden enkele uitdrukkingen die van belang zijn bij Hopkinson proeven toegelicht. Achtereenvolgens wordt beknopt ingegaan op de golfvoortplanting in een staaf, de opwekking van een spanningsgolf, de vervormingstoestand en de spanningstoestand in het proefstuk.

1.3.2 Golfvoortplanting in een staaf

De eendimensionale golfvergelijking voor lineair elastische staven ($\sigma = E\epsilon$) wordt voorgesteld door

$$\frac{E}{\rho}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$
(1.1)

en geldt voor kleine vervormingen (waarbij $\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$). De vergelijking beschrijft de verplaatsing u van de deeltjes in functie van de tijd t en plaats x langsheen de staaf. Hierin is E de elasticiteitsmodulus en ρ de densiteit van het materiaal van de staaf. De algemene oplossing van deze vergelijking bestaat uit twee golven die zich voortplanten met eenzelfde constante snelheid C_0 , maar in tegengestelde zin.

$$u(x,t) = f(x - C_0 t) + g(x + C_0 t)$$
(1.2)

 $C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ is de longitudinale voortplantingssnelheid van de golf en f en g zijn scalaire functies van één variabele. De vorm van de golf blijft bij voortplanting in de staaf onveranderd; dit model beschrijft aldus niet-dispersieve voortplanting van een golf door een staaf. Het verband tussen de deeltjessnelheid v(x,t) en de rek $\epsilon(x,t)$ wordt gegeven door

$$\epsilon(x,t) = \pm \frac{v(x,t)}{C_0} \tag{1.3}$$

1.3.3 Opwekken van een spanningsgolf

De theoretische puls gegenereerd door een cilindrische impactor is een blokgolf (fig. 1.6) met

• amplitude

$$A_s \sigma = -\frac{Z_s Z_i}{Z_s + Z_i} V \tag{1.4}$$

• duur van de spanningsgolf

$$T = 2\frac{L_i}{C_i} \tag{1.5}$$

Hierin zijn Z_s en Z_i de impedanties van respectievelijk de staaf en impactor, L_i de lengte van de impactor en C_i de voortplantingssnelheid in de impactor. V is de impactsnelheid van de impactor. Deze formules zijn geldig als de impedantie van de impactor kleiner is dan die van de ingangsstaaf. De impedantie van een staaf met sectie A en massadichtheid ρ wordt gedefinieerd als $Z = A\rho C$. Bij een welbepaald impactormateriaal legt de lengte van de impactor de duur van de golf vast, de amplitude kan gekozen worden door de impactsnelheid V aan te passen.

1.3.4 Vervorming en spanning in het proefstuk bij een Hopkinson proef

De drie golven ϵ_i , ϵ_r en ϵ_t worden op verschillende plaatsen opgemeten. Om de vervorming en spanning van het proefstuk te kunnen berekenen moeten deze golven worden omgerekend naar de grensvlakken van het proefstuk. Indien dispersieverschijnselen worden verwaarloosd kan dit gebeuren door een eenvoudige verschuiving van de tijdsas. Vermenigvuldigen van de aldus gevonden golven met de voortplantingssnelheid levert de deeltjessnelheid in de eindvlakken



Figuur 1.6: Theoretische golf gegenereerd door een cilindrische impactor

(formule 1.3). Integratie hiervan levert de verplaatsingen van de grensvlakken. Aangezien de Hopkinsonstaven elastisch blijven, kunnen de krachten in de grensvlakken berekend worden door de opgemeten golven te vermenigvuldigen met de elasticiteitsmodulus en de oppervlakte van de doorsnede van de staven. Voor het proefstuk kunnen volgende gemiddelde grootheden worden berekend:

• de gemiddelde rek

$$\epsilon_m(t) = \frac{C_s}{L_p} \int_0^t \left(\epsilon_i(\tau) - \epsilon_t(\tau) - \epsilon_r(\tau)\right) d\tau \tag{1.6}$$

• de gemiddelde vervormingssnelheid

$$\dot{\epsilon}_m(t) = \frac{C_s}{L_p} \left(\epsilon_i(t) - \epsilon_t(t) - \epsilon_r(t) \right) \tag{1.7}$$

• de gemiddelde spanning

$$\sigma_m(t) = \frac{A_s E_s}{2A_p} \left(\epsilon_t(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_i(t)\right) \tag{1.8}$$

Hierbij is C_s de voortplantingssnelheid van een longitudinale golf in de staven, A_s en A_p de oppervlakte van de doorsnede van respectievelijk de staven en het proefstuk en L_p de lengte van het proefstuk.

Bij voldoende korte proefstukken kan bijkomend een quasi-statische spanningstoestand worden ondersteld. Indien beide staven eenzelfde doorsnede hebben en uit hetzelfde materiaal bestaan dan geldt de evenwichtsvergelijking

$$\epsilon(t) = \epsilon_t(t) = \epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) \tag{1.9}$$

en herleiden bovenstaande relaties zich tot:

$$\epsilon_m(t) = -\frac{2C_s}{L_p} \int_0^t \epsilon_r(\tau) d\tau \tag{1.10}$$

$$\dot{\epsilon}_m(t) = -\frac{2C_s}{L_p}\epsilon_r(t) \tag{1.11}$$

$$\sigma_m(t) = \frac{A_s E_s}{A_p} \epsilon_t(t) \tag{1.12}$$

Enkel in het begin van de proef is de voorwaarde van quasi-statische spanningstoestand niet altijd voldaan. Bij het beproeven van brosse materialen zoals beton of keramieken moet hiermee rekening worden gehouden [12]. Bij het beproeven van TRIP-staal daarentegen worden grote vervormingen verwacht en is deze veronderstelling gerechtvaardigd.

Uit de formules blijkt dat de vervormingssnelheid evenredig is met de gereflecteerde golf. De spanning in het proefstuk is evenredig met de doorgelaten golf.

1.4 TRIP-staal [13] [14] [15] [16]

Het proefmateriaal voor deze thesis is het zogenaamde TRIP-staal. TRIP staat voor TRansformation Induced Plasticity. Dit betekent dat er een transformatie plaatsvindt als het staal plastisch wordt vervormd. Onvervormd TRIP bestaat uit 3 fasen: ferriet (α), bainiet (α_B) en austeniet (γ). Bij vervorming transformeert het metastabiele austeniet in martensiet (α'). Deze transformatie is zichtbaar in een toename van het volume. De aldus gevormde martensitische fase is hard en zet de microstructuur van het materiaal vast. Dit zorgt voor enkele bijzondere eigenschappen.

Kenmerkend voor TRIP-staal is de hoge ductiliteit in combinatie met een hoge sterkte. Door de grote omvormbaarheid kunnen met TRIP complexe onderdelen gemaakt worden. Designers krijgen zo meer vrijheid om complexe structuren te ontwerpen en daarbij het gewicht ervan te beperken. Een belangrijk bijkomend voordeel van de hoge sterkte en vervormbaarheid is de mogelijkheid om aanzienlijke hoeveelheden vervormingsenergie te absorberen. Energie die bijvoorbeeld afkomstig is uit een impactbelasting. Dit maakt het materiaal uitstekend geschikt om te dienen in autostructuren. Een goede materiaalkeuze is immers een belangrijke stap in de crashworthiness optimalisatie van wagens.

Er bestaan verschillende soorten TRIP-stalen met treksterktes van 500MPa tot 800MPa [17]. Figuur 1.7 vergelijkt TRIP met andere staalsoorten. Het TRIP-staal gebruikt in dit werk is Si gelegeerd TRIP-staal (met TRIP800 als commerciële naam). Het is een laaggelegeerd staal met volgende gemiddelde samenstelling: 0.18% C, 1.78% Mn, 0.038% Al, 1.53% Si. Onderstaande tabel toont enkele typische eigenschappen van TRIP:

Vloeispanning	Treksterkte	Rekgrens	versteviging
435 MPa	$825 \mathrm{MPa}$	24~%	0.19

Tabel 1.1:Typische statische mechanische eigenschappen van TRIP800

Als TRIP-staal onderworpen wordt aan te hoge temperaturen zullen materiaaltransformaties zorgen voor gewijzigde eigenschappen. Bij het bewerken van TRIP-staal is het dus cruciaal om de temperaturen laag te houden.



Figuur 1.7: Rek en UTS van TRIP vergeleken met andere geavanceerde staalsoorten

In de volgende paragraaf wordt kort beschreven hoe het gedrag van staal kan gemodelleerd worden.

1.5 Materiaalmodellen [13] [14]

Er bestaan verschillende materiaalmodellen voor de beschrijving van het dynamisch metaalgedrag. Een welbekend model is het Cowper-Symonds model:

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = \sigma \epsilon \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^n \right]$$
(1.13)

C en n zijn materiaal
constanten die door dynamische proeven kunnen bepaald worden. Dit model wordt dik
wijls aangewend voor hoge sterkte stalen.

Het meest gebruikte model voor de beschrijving van het temperatuurs- en vervormingssnelheidsafhankelijke gedrag van staal is het Johnson-Cook model. Dit fenomenologisch model geeft de ware spanning i.f.v. de ware rek, de reksnelheid en temperatuur a.d.h. van 5 materiaalafhankelijke constanten. De ware spanning stijgt lineair met het logaritme van de vervormingssnelheid $\dot{\epsilon}$:

$$\sigma = \left(A + B\epsilon_p^n\right) \left(1 + C\ln\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right]$$
(1.14)

Bruikbare waarden voor de parameters zijn (TRIP800): A=412, B=2145, n=0.66, C=0.014, m=0.76. De parameter C is de enige hiervan die de snelheidsafhankelijkheid weergeeft, de overige (A, B, n) worden bepaald via quasi-statische testen. Bij hoge snelheid is de warmte afvoer naar de omgeving verwaarloosbaar. $T-T_{room}$ stelt dan de adiabate temperatuurstijging voor die kan berekend worden uit $\Delta T = \frac{1}{\rho c} \int \sigma d\epsilon_p$. Hierin is ρ de dichtheid van het materiaal,

c de specifieke warmte
capaciteit en β de fractie plastische energie getransforme
erd in warmte (normaal tussen 0.85 en 0.95). Voor TRIP-staal kan
 $\beta = 1$ gebruikt worden om rekening te houden met de energie die vrij komt door het TRIP effect.

Het is nog belangrijk te vermelden dat dit model een lichte overschatting geeft op de experimentele resultaten bij hoge vervormingssnelheid. Bij lage vervormingssnelheden ($\dot{\epsilon} < 1s^{-1}$) is er eerder een onderschatting. Ook mag het model slechts gebruikt worden tot rekken van ca 25%. Daarboven vlakt de spanningscurve af.

Figuur 1.8 toont het experimenteel waargenomen gedrag van TRIP-staal (uit de literatuur), samen met het gedrag voorspeld door verschillende materiaalmodellen [13]. De figuur is geldig voor een trekbelasting met gemiddelde vervormingssnelheid van $1646 s^{-1}$.



Figuur 1.8: Vergelijking tussen het experimenteel waargenomen materiaalgedrag (in trek) en enkele materiaalmodellen [13]

Hoofdstuk 2

De Hopkinson opstelling

Dit hoofdstuk start met een korte praktische beschrijving van het drukgedeelte van de Hopkinson opstelling van de vakgroep Mechanische Constructie en Productie van de Universiteit Gent. Dit drukgedeelte werd ontworpen in het kader van een vorig afstudeerwerk [11]. Zoals beschreven wordt in dit hoofdstuk, dringen enkele kleine aanpassingen zich op. Zo wordt het uitlijnen van de versneller eenvoudiger gemaakt. Daarnaast wordt de versneller geoptimaliseerd zodat de gegenereerde spanningsgolf beter de vorm van een blokgolf benadert. Ook het probleem van de meervoudige impact wordt hierdoor opgelost.

2.1 De Opstelling

De opstelling bestaat uit twee frames die volledig van elkaar gescheiden zijn. Het ene frame draagt de Hopkinsonstaven met daartussen het proefstuk. Het andere frame draagt de versnellingsinrichting voor zowel de druk- als trekproeven. Door het scheiden van de twee frames worden trillingen, geïnduceerd door de versnellingsinrichting, niet overgedragen op het beproevingsgedeelte van de opstelling. In de volgende paragrafen worden de verschillende onderdelen van de opstelling in meer detail beschreven. Aan het pneumatisch gedeelte en de sturing ervan, wordt een apart hoofdstuk gewijd (hoofdstuk 3).

2.1.1 Hopkinsonstaven en hun ondersteuning

De Hopkinsonstaven vormen de basisonderdelen van de opstelling. De staven geleiden de spanningsgolven naar het proefstuk en worden gebruikt als "meetinstrument". De opstelling is zodanig geconcipieerd dat een ruim gamma aan staaflengtes en diameters kan gebruikt worden. De staven zijn namelijk vrij opgelegd in een aantal blokken met een V-vormige uitsparing. Langs de beide flanken van deze uitsparingen zijn een serie asjes met naaldlagers ingebouwd, zodat de staven "wrijvingsloos" geleid worden. Dankzij een zeer nauwkeurig afgewerkt referentievlak kunnen deze blokken op een willekeurige positie geplaatst worden. Langs de bovenzijde van de ondersteuningsblokken is een beschermende beugel aangebracht. Deze voorkomt dat de staaf uit zijn ondersteuning zou gelicht worden. In dit afstudeerwerk worden altijd dezelfde staven gebruikt. Tabel 2.1.1 geeft enkele eigenschappen van deze staven.

	Ingangsstaaf	Uitgangsstaaf
Lengte [m]	6	3
Diameter [mm]	25	25
Materiaal	Al 5083	Al 5083
Treksterkte [MPa]	290	290
Vloeispanning [MPa]	145	145
Massadichtheid $[kg/m^3]$	2660	2660
Young's modulus [GPa]	70.3	70.3
Golfvoortplantingssnelheid [m/s]	5091	5091
Impedantie [Ns]	6713	6713

Tabel 2.1: Hopkinsonstaven

Met deze staven kan het proefstuk gedurende $T = \frac{\lambda}{v} = \frac{6}{5140} = 1.17 \, ms$ belast worden. De maximaal bruikbare golflengte λ is (om interferentie te vermijden) gelijk aan de lengte van de ingangsstaaf en v is de voortplantingssnelheid van een spanningsgolf in aluminium. Alhoewel Hopkinsonstaven uit staal zeer gebruikelijk zijn, wordt omwille van een aantal grote voordelen geopteerd voor staven uit aluminium. Door de aanzienlijk lagere elasticiteitsmodulus zijn de geïnduceerde rekken in de staaf groter en bijgevolg gemakkelijker meetbaar. De lagere elasticiteitsmodulus zorgt er ook voor dat een grote reksnelheid in het proefstuk kan verkregen worden bij een kleinere impactsnelheid. Er wordt specifiek gekozen voor Al 5083 omdat deze aluminiumlegering niet hardbaar is en dus gemakkelijk gelast kan worden. Het bestand zijn tegen warmte is een belangrijk voordeel bij het losbranden van verlijmde proefstukken (voor trekproeven).

2.1.2 Versneller [11] [18]

De pneumatische versneller bestaat uit een stalen buis waarin de impactor uit kunststof (ERTACETAL H) wordt geplaatst. De impactor versnelt als perslucht in de versneller wordt toegevoerd. Naast de functie van impactlichaam doet de impactor dus ook dienst als zuiger. Bij de aansluiting van de slang voor perslucht is een rubberen veiligheidselement voorzien om schade aan de aansluiting te vermijden indien de impactor onvoldoende afremt bij het terugkeren. De versneller wordt vastgemaakt door twee bevestigingsblokken. De bevestigingsblokken worden op hun beurt vastgeklemd door twee klauwen. Het geheel is zowel in horizontale als verticale richting verstelbaar. Tabel 2.2 geeft de belangrijkste kenmerken van de versneller. Figuur 2.1 illustreert de bevestigingsmethode van de versneller aan het onafhankelijk frame.

2.1.3 Data-acquisitie

Op bepaalde plaatsen op de staven zijn rekstrookjes aangebracht: 2x2 op de ingangsstaaf en 1x2 op de uitgangsstaaf. De rekstrookjes worden per 2 gekoppeld om zo het effect van een

Buitendiameter versneller [mm]	60
Binnendiameter versneller [mm]	40H7
Lengte versneller [mm]	1850
Diameter impactor [mm]	39.5
Diameter impactorgeleiding [mm]	40h7
Lengte impactor [mm]	860
Afrondingsstraal top [mm]	R50
Young's modulus [GPa]	3.60
Massadich theid $[kg/m^3]$	1430
Golfvoortplantingssnelheid [m/s]	1587
Impedantie [Ns]	2852

Tabel 2.2: Versneller

eventuele buiggolf door een slechte uitlijning (§2.2) te reduceren. De positie wordt zo gekozen dat er geen interferentie tussen ingaande en gereflecteerde golven optreedt. De rekstrookjes zijn onderling verbonden in een 'wheatstone-brugschakeling' en worden uitgelezen met een digitaal meetsysteem (LDS Nicolet - Genesis). Deze is geschikt om hoogfrequente signalen uit te lezen en stuurt de signalen door naar een meet-PC waar ze met de gepaste software (LDS Nicolet - Perception) worden ingelezen. De sampling frequentie bedraagt 1 MHz. De meting wordt gestart met een triggersignaal dat afkomstig is van de onderbreking van een laserstraal door de impactor. Hetzelfde triggersignaal wordt gebruikt voor het starten van de hogesnelheidscamera.

2.2 Uitlijning versneller

Om betrouwbare proefresultaten te bekomen moeten de golven in de staven uniaxiaal zijn (zie hoofdstuk 1 -> basisvereisten Hopkinson proef). Hiervoor is het noodzakelijk dat de ingangsstaaf en de impactor nauwkeurig uitgelijnd zijn. Om de kwaliteit van de uitlijning te verifiëren kunnen twee methoden gebruikt worden [18].

De eerste methode maakt gebruik van een 'schietroos' en markeervloeistof. De schietroos wordt bevestigd op het aambeeld van de ingangsstaaf en de markeervloeistof wordt aangebracht op het topje van de impactor. Omdat het moeilijk is om de markeervloeistof exact aan te brengen kan als alternatief gebruik gemaakt worden van carbonpapier. Bij impact laat de impactor een afdruk na op de roos. De positie van de versneller kan dan worden bijgeregeld totdat de markering in het midden van de roos ligt. Deze methode is eenvoudig, snel en de interpretatie kan intuïtief gebeuren. Jammer genoeg is de methode niet volmaakt: na toepassing ervan zal de impactor in het midden van het aambeeld impacteren, maar de methode verzekert niet dat de impactor perfect in lijn ligt met de ingangsstaaf.

De tweede methode maakt gebruik van de signalen die geregistreerd worden door twee tegenover elkaar liggende rekstrookjes op de ingangsstaaf. De rekstrookjes moeten dan wel



Figuur 2.1: Bevestiging van de versneller aan het frame

afzonderlijk uitgelezen worden. Bij excentrische impact zal in de staaf naast de gewenste drukgolf eveneens een buiggolf opgewekt worden. De signalen van een koppel rekstrookjes zullen onder invloed van deze buigcomponent gedeeltelijk in tegenfase gaan. Dit is te zien bij de signalen *rekstrookje1* en *rekstrookje2* van figuur 2.8. Bij centrische impact daarentegen zijn de opgemeten signalen (quasi) gelijk. De mate waarin deze buigcomponenten voorkomen kan nu gebruikt worden om versneller uit te lijnen. Om volledig zeker te zijn van een goede uitlijning moet de procedure gebeuren voor verschillende oriëntaties van de staaf. Met deze methode kan de uitlijning zeer correct gecontroleerd worden. De grote moeilijkheid is echter dat de interpretatie van de signalen niet zo voor de hand liggend is.

Het uitlijnen zelf was vroeger nogal omslachtig. Door de gebruikte bevestigingsmethode en het hoge gewicht van de versneller was het niet evident om de versneller in de gewenste positie te krijgen.

Om het uitlijnen te vereenvoudigen wordt volgende aanpassing uitgevoerd. In de twee Uprofielen (fig. 2.1) waaraan de bevestigingsblokken vastzitten worden drie centreerbouten aangebracht. Door deze bouten is het nu veel gemakkelijker om de versneller op een gecontroleerde manier, kleine positiewijzigingen te geven. Figuur 2.2 toont de centreerbouten. De onderste twee bouten staan 90° uit elkaar. Om de versneller niet te beschadigen kan rond de versneller een stalen band voorzien worden.

De volgende stappen kunnen gebruikt worden voor het uitlijnen:



Figuur 2.2: Centreermechanisme versneller

- 1. Maak alle bouten los (zowel de bevestigingsbouten (4 bouten voor de U-profielen en 4 bouten voor de klauwen) als de centreerbouten).
- 2. Leg de versneller in de V-vormige steunblokken (opening 70 mm) en gebruik hierbij tussenplaatjes van 5 mm. Er wordt nu verondersteld dat door de nauwkeurige afwerking van de steunblokken, de versneller evenwijdig (maar nog niet in lijn) ligt met de ingangsstaaf. Deze veronderstelling kan gerechtvaardigd worden. Doordat de steunblokken ver van elkaar staan $(\pm 1 m)$ zal de afwijking van de perfecte evenwijdigheid zeer gering zijn. Stel bijvoorbeeld dat het eerste steunblok 1 mm uit lijn staat dan zal de impactor impacteren onder een hoek van 89.94° terwijl de excentriciteit van de implactplaats reeds ongeveer 1.5 mm bedraagt (afstand aambeeld - ondersteuningsblok 0.5 m). Een excentriciteit van 1.5 mm op een staaf met een straal van 12.5 mm is niet verwaarloosbaar.
- 3. Schroef de U-profielen vast aan het frame. Zorg ervoor dat de versneller gecentreerd is t.o.v. de openingen in het U-profiel met diameter 70 mm. De 4 bouten van de klauwen blijven los.
- 4. Span de centreerbouten aan en verwijder de tussenplaatjes.
- 5. Gebruik de methode met de schietroos om de nauwkeurigheid van de uitlijning vast te stellen. De impactor kan hiervoor met de hand versneld worden. Gebruik de centreerbouten om de positie van de versneller bij te stellen zodat de de markering in het centrum van de roos komt te liggen. Om de versneller evenwijdig te houden met de ingangsstaaf moeten de centreerbouten op beide bevestigingsplaatsen identiek bijgesteld worden. Dit kan men doen door het aantal omwentelingen van de bouten te tellen.
- 6. Zet de bevestigingsblokken vast door de 4 bouten van de klauwen aan te spannen en maak daarna de centreerbouten los.

7. Normaal moet de versneller nu voldoende nauwkeurig uitgelijnd zijn. Dit kan geverifieerd worden door gebruikt te maken van de tweede methode (rekstrookjes apart uitlezen). Indien nodig kan men de uitlijning nog fijnregelen. (Eerst centreerbouten vastzetten voordat de bevestigingsblokken (klauwen) losgemaakt worden!)

Opmerking: als de ingangsstaaf niet volledig recht is, zal de opgewekte golf een buigcomponent blijven bevatten, zelfs al is de versneller perfect uitgelijnd. Deze buigcomponent wordt in amplitude beperkt door het opspringen van de staven tegen te gaan. Hiervoor zijn kunststof kussens tussen de staven en de beugels aangebracht. De originele kunststofkussens waren niet goed gedimensioneerd en hinderden de naaldlagers van de V-blokken. Nabewerking van de blokken verhielp dit euvel.

2.3 Optimalisatie van de versneller

De versneller vertoonde twee tekortkomingen. Ten eerste had de opgewekte golf niet de gewenste theoretische blokgolf-vorm. In theorie genereert een cilindervormige impactor een blokgolf (§1.3.3), maar in werkelijkheid wordt de golf die op figuur 2.3 te zien is, waargenomen. Dit gebeurt reeds vanaf een druk van 1.5 bar. De golf vertoont eerst een piek waar een spanning σ_{piek} mee overeen komt. Daarna zakt de spanning tot het niveau van de constante waarde σ_I . Dit is een groot nadeel bij het uitvoeren van drukproeven. Om een constante vervormingssnelheid te verkrijgen moet de amplitude van de ingaande golf ook constant zijn.



Figuur 2.3: Waargenomen rekgolf in de ingangsstaaf bij 2 bar

In een vorig werk [11] werd dit verschijnsel reeds waargenomen. De vervormde spanningsgolf kan verschillende oorzaken hebben:

- Door de afronding van de impactzijde van de impactor zal de opgewekte spanning oscilleren in de tijd. Dit werd onderzocht in [11] en bleek niet de oorzaak te zijn.
- Wanneer de impactor botst tegen de ingangsstaaf zet deze door het samendrukken uit, wat een verhoogde wrijving tegen de cilinder geeft. Hierdoor zal de spanning in de

ingangsstaaf dalen.

- De visco-elastische eigenschappen van de impactor kunnen aan de basis liggen van de afwijking. Het visco-elastisch gedrag genereert een spanning die evenredig is met de vervormingssnelheid. Doordat in het contactpunt op de impactor driedimensionale spanningsconcentraties optreden, overeenkomstig met de theorie van Pochhammer en Chree, is de vervormingssnelheid en dus ook de elasticiteitsmodulus hier hoger met als gevolg een overshoot van de spanningsamplitude. Deze verklaring werd onderzocht in [11] door middel van een eindige elementen simulatie. Deze simulatie leek toen deze theorie te bevestigen. Twee mogelijke oplossingen voor het probleem werden voorgesteld:
 - De afrondingsstraal van de impactortop vergroten zodat de spanningsconcentratie lager wordt en het visco-elastisch effect minder tot uiting komt. Het nadeel hieraan is dat er met een afgeplatte top meer oscillaties in de opgewekte golf kunnen verwacht worden.
 - Gebruik maken van een impactor uit een materiaal dat een minder uitgesproken visco-elastisch gedrag vertoont.
- Een vierde mogelijke verklaring is dat het aambeeld weggeblazen wordt door de luchtverplaatsing voor de impactor.

Verder onderzoek was nodig om een uitkomst te bieden voor het probleem.

De tweede tekortkoming van de versneller was het meervoudig impacteren van de impactor op de ingangsstaaf. Dit was hoofdzakelijk te wijten aan de manier van aansturen (hoofdstuk 3). Het 3/2-ventiel dat de perslucht naar de versneller stuurt moet na impact onmiddellijk terug openen zodat de perslucht uit de versnellerbuis weg kan stromen. Het ventiel heeft echter een schakeltijd van ongeveer 30 ms waardoor de druk in de versneller na de eerste impact niet onmiddellijk afneemt. Bij het terugkeren van de impactor na de impact, is er dus een nieuwe drukopbouw in de versnellerbuis waardoor de impactor opnieuw versnelt in de richting van de ingangsstaaf met een tweede impact als gevolg. Bij voldoende hoge druk komt ook nog een derde, vierde,... impact voor. Om dit te vermijden werden verschillende mogelijke oplossingen uitgedacht:

- In de versneller kan een ontluchtingsgat geboord worden. Dit gat werkt dan als een soort schuifklep. Eens de impactor voorbij dit gat komt ontsnapt de lucht in de versneller waardoor de tweede drukopbouw veel kleiner zal zijn. Deze methode heeft een aantal belangrijke nadelen. De huidige versneller kan nu namelijk gebruikt worden voor impactoren van verschillende lengte. Door het gat zou slechts één impactorlengte kunnen gebruikt worden. Er is ook geen zekerheid dat bij hoge drukken voldoende lucht op korte tijd kan afgevoerd worden.
- Het 3/2-ventiel vroeger openen. Dit zou kunnen door het ventiel via een computer aan te sturen i.p.v. met het signaal afkomstig van de laser. Het computerprogramma berekent

dan wanneer het ventiel geopend moet worden, rekening houdend met de schakeltijd ervan.

• De afstand tussen de versneller en het aambeeld vergroten. Op die manier is er meer tijd voor het ventiel om te sluiten.

Om een oplossing te vinden voor de twee problemen werd de werking van de versneller geanalyseerd d.m.v. een snelheidsmeting en drukmeting.

2.3.1 Snelheidsmeting

Uit de snelheid van de impactor net voor de botsing met het aambeeld kan de verwachte amplitude (σ_v) van de golf in de ingangsstaaf worden berekend. Terzelfdertijd wordt de amplitude van de ingaande golf gemeten met de rekstrookjes op de ingangsstaaf, i.h.b. σ_I en de piekwaarde σ_{piek} , zoals aangeduid op figuur 2.3. Door het vergelijken van deze waarden kan afgeleid worden of het vervormde signaal te wijten is aan een overshoot tijdens het begin van van het signaal of een undershoot tijdens het tweede deel van het signaal.

Met een hogesnelheidscamera werd de botsing van de impactor met het aambeeld gefilmd. Uit deze beelden kon de snelheid van de impactor afgeleid worden. De hieruit berekende, verwachte σ_v bleek overeen te komen met de opgemeten piekwaarde σ_{piek} . De resultaten zijn te zien in tabel 2.3.

Impactsnelheid (uit film)	σ_v	σ_{rek}	σ_{piek}
$9.4\mathrm{m/s}$	38.3 MPa	33.6 MPa	$37.8\mathrm{MPa}$

Tabel 2.3: Resultaten van de snelheidsmeting (2 bar)

Er is dus geen overshoot in het begin maar wel een drukdaling op het einde van de golf. De hypothese van het visco-elastisch gedrag kan daarom geschrapt worden.

Tijdens deze proeven waren bovendien papieren lintjes tussen de versneller en het aambeeld aanwezig (figuur 2.4) om een idee te krijgen van de luchtverplaatsing veroorzaakt door de impactor. Uit de opname was duidelijk te zien dat de lintjes niet overdreven hard wegwaaiden zodat ook de hypothese van de weggeblazen ingangsstaaf verworpen kan worden.

Op het filmpje werden nog twee andere fenomenen waargenomen:

- De ingangsstaaf ondergaat een kleine torsietrilling.
- Bij 2 bar is er een 6-voudige impact.



Figuur 2.4: Versneller, aambeeld en lintjes

2.3.2 Drukmeting

Het drukverloop van de perslucht in de versneller laat toe de werking ervan beter te begrijpen. Daarom werd aan de ingang van de versneller een druksensor (type PDCR840, Labo nummer 4EM059) gemonteerd. Het resultaat van de voorafgaande kalibratie is te vinden in de bijlage C. In het data-acquisitie programma LDS Nicolet - Perception kan de druksensor geconfigureerd worden door als versterkingsfactor 4.87 mV/bar in te geven.

Figuur 2.5 toont het opgemeten drukverloop samen met de golf in de ingangsstaaf bij een luchtdruk van 2 bar. Op de figuur is duidelijk te zien dat de maximale druk zeer snel bereikt



Figuur 2.5: Drukverloop in de versneller en opgemeten rek in ingangsstaaf tijdens test6 (2 bar)

wordt. Deze maximale druk benadert de ingestelde 2 bar. Daarna neemt de druk sterk af. De ladingsverliezen over de aanvoerleiding nemen kwadratisch toe met de stromingssnelheid. Dit betekent een beperking op de haalbare impactsnelheden bij een gegeven maximale compressordruk. Bij de berekening van de impactsnelheid uit de ingestelde druk moet eveneens met deze drukdaling rekening gehouden worden (§ 3.3.3). Na impact keert de versneller terug in de richting van de versneller. Door de niet-verwaarloosbare schakeltijd van het 3/2-ventiel kan de lucht in de versneller niet voldoende snel ontsnappen. Een nieuwe drukopbouw wordt waargenomen op de curve van het drukverloop. Door de drukgolf in de impactor gebeurt de drukopbouw 'schoksgewijs'. Het uiteindelijke gevolg van de drukopbouw is een tweede impact, dit is ook te zien op het signaal van de ingangsstaaf.

2.3.3 Vergelijking impactorgeometrie en opgewekte spanningsgolf

Als de geometrie van de impactor vergeleken wordt met de vorm van de opgewekte golf, dan is er een opvallende overeenkomst (figuur 2.6). De verhouding van de duur van de drukpiek tot de totale periode blijkt overeen te komen met de verhouding van de lengte van de top van de impactor tot de totale impactorlengte. Dit wijst erop dat de geleidszone van de impactor (3 ringen van 15mm breed) iets te maken heeft met de vervormde spanningsgolf.



Figuur 2.6: Vergelijking van de impactorgeometrie met de opgewekte spanningsgolf

Een kleine berekening toont aan dat inklemming (=2de mogelijke oorzaak van de golfvervorming) mogelijk is.

De binnendiameter van de versnellerbuis is afgewerkt op $40\text{H7} = 40_0^{25} \, mm$. De geleidingsvlak-

ken van de impactor zijn afgewerkt op $40h7 = 40^{0}_{-25} mm$. Er is dus een gemiddelde speling van $\delta = 25 \,\mu m$. Dit komt overeen met een glijdende passing, wat wenselijk is.

Als geschoten wordt bij 2 bar, wordt een drukgolf met gemiddelde amplitude van 35 MPa in de ingangsstaaf opgemeten. Dit komt overeen met een drukgolf in de impactorstaaf met een gemiddelde amplitude van $\left(\frac{25}{40}\right)^2 35 = 13.7 MPa$. De impactor vervormt elastisch met een rek van $\epsilon_{imp} = \frac{\sigma_{imp}}{E_{imp}} = \frac{13.7}{3600} = 0.00381$. Hierdoor ontstaat een radiale uitzetting Δd van de impactor met diameter d. (Voor kunsstof wordt een poissoncoëfficiënt van $\nu = 0.4$ genomen)

$$\Delta d = d\nu \epsilon_{imp} = 40 \cdot 0.4 \cdot 0.0038 = 0.0608 \, mm$$

De nieuwe diameter van de impactor is dus $40^{60}_{35} mm$: een perspassing. Er is nu een negatieve speling op de diameters van gemiddeld $\delta = 35 \,\mu m$. Met formule 2.1 kan de contactdruk berekend worden tussen impactor en versnellerbuis [19].

$$p = \frac{\delta/d}{\frac{1}{E_0} \left(\frac{(d_0/d)^2 + 1}{(d_0/d)^2} + \nu_0\right) - \frac{1}{E_i} \left(\frac{(d_i/d)^2 + 1}{(d_i/d)^2 - 1} + \nu_i\right)}$$
(2.1)

Hierin is $d_0 = 60 \, mm$ de buitendiameter van de versneller, $d = 40 \, mm$ de diameter van de impactor en $d_i = 0 \, mm$ de binnendiameter van de impactor. Samen geeft dit een waarde voor de contactdruk $p = 4.95 \,\text{MPa}$. Het contactoppervlak is $A = 40\pi \cdot 15 \cdot 3 = 5655 \, mm^3$ (3 contactzones van elk 15 mm breed). De normaalkracht is dan $N = pA = 27709 \, N$. Bij een veronderstelde wrijvingscoëfficiënt van $\nu = 0.2$, wordt de tangentiale kracht $F = \mu N =$ 5541 N. Wordt deze kracht uniform over de doorsnede van de impactor verdeeld dan komt dit overeen met een spanningsdaling $\sigma_{inklemming}$ in de ingangstaaf van

$$\sigma_{inklemming} = \left(\frac{40}{25}\right)^2 \frac{F}{d^2/4\pi} = 11.3 \, MPa$$

De experimenteel waargenomen spanningsvermindering was 4.2 MPa. Uiteraard zit er door de vele schattingen een grote fout op de berekende $\sigma_{inklemming}$ (wrijvingscoëfficient, maattoleranties,...). Toch toont de berekening aan dat een spanningsvermindering van enkele MPa door inklemming zeker mogelijk is.

2.3.4 Aanpassing versneller

Uit het onderzoek blijkt duidelijk dat inklemming van de impactor door radiale uitzetting de oorzaak is van de vervormde drukgolf. Een kleine aanpassing aan de versneller is voldoende om inklemming te vermijden. Door de afstand tussen de versneller en het aambeeld te vergroten kan het klemmen van de impactor evenals het probleem van de meervoudige impact opgelost worden. Om vastklemmen te vermijden moet de afstand zo gekozen worden dat de geleiding van de impactor zich buiten de versneller bevindt op het moment van impact. Om de goede uitlijning van de impactor t.o.v. de ingangsstaaf te behouden moet de impactor buiten de versneller verder geleid worden. Deze ondersteuning is ook noodzakelijk om beschadiging te voorkomen van de nauwkeurig afgewerkte geleidingsvlakken van de impactor. Er werd gekozen om aan het uiteinde van de versneller een V-vormige glijbaan te monteren. De impactordiameter kan nu toenemen zonder vastklemming in de loop van de versneller. Figuur 2.7 toont de glijbaan volgens de tekeningen en de werkelijke realisatie ervan.

Het effect van de glijbaan werd getest bij verschillende drukken. Uit figuur 2.8 blijkt duidelijk dat opgewekte golf beter de gewenste blokgolf benadert. Er zijn wel iets meer oscillaties waarneembaar in de afzonderlijke signalen. Deze oscillaties zijn in tegenfase. Dit is dus waarschijnlijk toe te schrijven aan de onnauwkeurige afwerking van de glijbaan met een slechte uitlijning als gevolg. In de toekomst kan een nauwkeurigere glijbaan gemaakt worden of er kan gekozen worden voor een alternatieve oplossing: bijv. afzonderlijke V-blokken, gemonteerd op het referentievlak van de opstelling.

Figuur 2.9 toont de drukopbouw in de versneller en het signaal in de ingangsstaaf. Na de eerste impact is er geen tweede drukopbouw waardoor er ook geen dubbele impact meer is. Door de grotere afstand tussen de versneller en de ingangsstaaf heeft het 3/2-ventiel meer tijd om schakelen.



Figuur 2.8: Golven in de ingangsstaaf bij gebruik van de geoptimaliseerde versneller



Figuur 2.7: De glijbaan: zoals getekend, gemaakt en gemonteerd op de versneller



Figuur 2.9: Drukverloop in de versneller samen met het signaal in de ingangsstaaf

2.4 Absorber

Een laatste uitbreiding die eventueel nodig zou zijn, is een absorber. De doorgelaten golf ϵ_t reflecteert volledig aan het uiteinde van de uitgangsstaaf en de gereflecteerde golf ϵ_r reflecteert op het begin van ingangsstaaf. Het theoretisch gevaar hieraan is dat het proefstuk een tweede keer (in trek en daarna in druk) zou kunnen belast worden. Dit moet vermeden worden omdat het foute resultaten kan opleveren. Als men bijvoorbeeld de vervorming van het proefstuk na een experiment opmeet en vergelijkt met de - uit de signalen berekende - vervorming, bekomt men tegenstrijdige resultaten. Bij drukproeven echter, is het proefstuk vrij bevestigd tussen de ingangs- en uitgangsstaaf zodat een trekbelasting onmogelijk is. Een absorber is hiervoor dus niet nodig.

Bij de huidige opstelling wordt de bewegingsenergie van de staven geabsorbeerd door dempers met beschermmousse. De impedantie van deze dempers is echter niet afgestemd op de staven waardoor niet alle energie door de demper opgenomen wordt. Dit veroorzaakt een probleem: uit experimenten blijkt dat bij het tegen elkaar botsen van de staven de vastgelijmde stompjes en beschermingsplaatjes kunnen loskomen.

Om dit probleem op te lossen is het nodig om een absorber te ontwerpen. Deze zou dan kunnen bestaan uit een kunststof staaf die geplaatst is aan het einde van de uitgangsstaaf. De diameter van de kunststof staaf moet zo gekozen worden zodat de impedantie van de absorber gelijk is aan de impedantie van de uitgangsstaaf. Op die manier wordt de golf theoretisch volledig doorgelaten in de absorber. De lengte van de absorber wordt gelijk gekozen aan de helft van een golflengte. De volledige golf wordt dus geabsorbeerd voordat het contact tussen absorber en uitgangsstaaf verbroken wordt. De absorberstaaf wordt vervolgens afgeremd door de bestaande dempers. Door de keuze van kunststof als absorber materiaal is de lengte van de absorber kleiner dan die van de aluminium uitgangsstaaf. Toch blijft de lengte aanzienlijk (zo'n 95 cm). Hoofdzakelijk wegens plaatsgebrek op de opstelling (nu reeds meer dan 11 m!) is een absorber niet evident. Omdat de vernoemde problemen minder belangrijk zijn, wordt voorlopig geen absorber gebruikt.
Hoofdstuk 3

Aansturing

Een Hopkinsonproef voltrekt zich in slechts enkele seconden. Gedurende die korte tijd moeten een aantal acties ondernomen worden: juiste druk instellen, versnellen impactor, dataacquisitie en eventueel filmen met een hogesnelheidscamera. Om alles nauwkeurig en reproduceerbaar te laten verlopen werd het proefverloop geautomatiseerd. In dit hoofdstuk worden de aanpassingen die daartoe nodig zijn aan het bestaande pneumatisch circuit en de sturing ervan beschreven. Eerst wordt de werking van de vroegere aansturing geschetst. Dan worden de aanpassingen toegelicht. In het laatste deel van het hoofdstuk wordt ingegaan op het LabVIEW programma dat het proefverloop automatiseert

3.1 Oorspronkelijk pneumatisch circuit en aansturing

Het originele pneumatisch circuit en de sturing van de drukopstelling worden uitvoerig beschreven in [18]. De belangrijkste kenmerken ervan zijn:

- De versneller wordt rechtstreeks gevoed met perslucht uit het drukvat van de compressor. Dit drukvat heeft een volume van $0.2m^3$. De druk wordt ingesteld door de compressor manueel uit te schakelen wanneer de gewenste druk is bereikt.
- De aansturing gebeurt manueel. Het 3/2-ventiel, dat de perslucht naar de verneller stuurt, opent bij het indrukken van een mechanische schakelaar. Het ventiel sluit terug als de impactor een laserstraal onderbreekt. Deze laser is gepositioneerd vlak na de versnellerbuis (fig. 2.7). Het signaal van de fotocel (van de laser) is rechtstreeks verbonden met de manuele schakelaar.

Deze methode heeft een aantal nadelen:

- Slechte reproduceerbaarheid. Het is moeilijk om de druk exact in te stellen op de wenswaarde.
- Complexe proeven op korte tijd: moeilijk voor de operator om alles bij te houden. Dit kan bijgevolg leiden tot gevaarlijke situaties. De impactor zou bijvoorbeeld op een ongewenst moment kunnen versnellen.

Automatisatie van de sturing is een belangrijke stap in het elimineren van deze nadelen. Hiertoe moet ook het pneumatisch circuit aangepast worden.

3.2 Aanpassingen aan het circuit

Het doel is om via een LabVIEW programma het proefverloop te automatiseren. Een bijkomende vereiste is dat de sturing voor de eenvoud zoveel mogelijk analoog moet zijn aan die van de trekopstelling. Daarom wordt gekozen om tussen het drukvat van de compressor een extra drukvat te schakelen. De druk in dit extra drukvat wordt geregeld door de stuurcomputer. Dit doet de computer door elektronische ventielen aan te sturen. De gewenste druk wordt bekomen in de volgende stappen:

- 1. Inlaatklep open, uitlaatklep gesloten -> Druk p in het drukvat stijgt.
- 2. Indien de druk p gelijk is aan wenswaarde $p_{wens} + 0.1 \, bar \rightarrow$ Inlaatklep sluiten.
- 3. Door lekverliezen daalt de druk p in het drukvat.
- 4. Indien $p = p_{wens} \rightarrow$ Versnellen impactor

Deze methode werd reeds gebruikt bij het uitvoeren van trekproeven. Het grote voordeel ervan is dat de druk waarbij geschoten wordt altijd exact gelijk is aan de wenswaarde. Een bijkomend voordeel is dat door het registreren van de nodige tijd voor de drukdaling ten gevolge van de lekverliezen, de slijtage van dichtingen in het circuit gevolgd kan worden.

In deze paragraaf wordt het minimaal nodige volume van het extra drukvat berekend. Zoals in 2.1.2 beschreven wordt, heeft de versneller geen mechanisme om de impactor vast te houden. Dit is niet nodig omdat de druk bij het openen van het 3/2-ventiel heel snel stijgt. De perslucht hiervoor is afkomstig uit het drukvat. Om de drukdaling tijdens het versnellen van de impactor enigzins te beperken moet het drukvat een zeker minimum volume hebben. Het nodige volume kan bepaald worden door voorop te stellen dat de druk in het vat na het beëindigen van een proef minstens 90% van de druk bij aanvang moet zijn ($P_b = 0.9P_a$). Door de korte duur van een proef mag aangenomen worden dat de perslucht een adiabatische expantie ondergaat. Het verband tussen drukken en volumes is dan

$$\frac{P_b}{P_a} = \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^k = \left(\frac{V_a}{V_a + V'}\right)^k = 0.9 \tag{3.1}$$

Voor lucht bij kamertemperatuur is k = 1.4. Volume V_a stelt het volume van het drukvat voor. Volume V_b is het volume van het drukvat en de versnellerbuis (V') samen. Bij een stroke (de afstand waarover versneld wordt) van 1.5m is $V' = 0.00189m^3$. Oplossen van 3.1 geeft

$$V_a = 0.0242m^3$$

Een drukvat van 251 volstaat dus.

Om zoveel mogelijk gebruik te maken van onderdelen van de bestaande opstelling is ervoor gekozen om het drukvat van de trekopstelling te gebruiken. Het volume van dit drukvat is ruim meer dan 251. De vork van de versneller voor de trekproeven dient dan volledig ingetrokken te worden. Doordat het drukvat gemeenschappelijk gebruikt wordt voor zowel de trek- als drukproeven kan naast het drukvat ook het in- en uitlaatventiel van de trekopstelling gebruikt worden voor de drukproeven. Het is enkel nodig om de bestaande pneumatische circuits van de trek- en drukopstelling samen te voegen. Er zijn dus geen nieuwe onderdelen nodig, wat de sturing alleen maar eenvoudiger (en goedkoper) maakt. Het resulterende circuit is te zien op figuur 3.1. De SHPB versneller bevindt zich aan de linkerkant van de figuur en een gedeelte van het drukvat is te zien aan de rechterkant van de figuur. Daartussen bevindt zich het controlepaneel met de verschillende ventielen. Het schema van figuur 3.2 verduidelijkt dit alles. Ook de plaats van de sensoren zijn in het schema aangeduid.

Het zelfde circuit wordt dus gebruikt voor zowel de trek- als drukproeven. Via twee manuele ventielen kan geschakeld worden tussen trek en druk. Het eerste ventiel stuurt de pilootdruk naar ofwel de kleppen van de trekopstelling ofwel de kleppen van de drukopstelling. De pilootdruk is noodzakelijk voor het functioneren van de kleppen. Met het tweede ventiel kan het drukgedeelte van het circuit afgesloten worden.

Het volledige circuit (van de trek- en drukopstelling) bevat in totaal 5 elektronisch gestuurde kleppen: twee gestuurde kleppen zorgen voor het vullen van het drukvat, 2 kleppen bedienen de vork van de SHTB opstelling en een 3/2-ventiel staat in voor de voeding van de SHPB versneller. Al deze kleppen worden aangestuurd door de stuur-PC. Solid-state relais zorgen voor een galvanische scheiding tussen deze PC en de kleppen. In bijlage B wordt de praktische aansluiting van de kleppen aan de PC uit de doeken gedaan.

Naast de elektronische ventielen is er een manuele in- en uitlaatklep voorzien in het circuit. Net voor een proef dient de manuele inlaat geopend en de uitlaat gesloten te worden. Na afloop van de proef moet de inlaatklep gesloten en de uitlaatklep geopend worden. Het drukvat bevat dus enkel perslucht tijdens een proef zodat er geen onveilige situaties ontstaan bij bijvoorbeeld falende elektronische kleppen.

Tussen het drukvat en de SHPB versneller bevat het circuit slechts één bocht en alle leidingen hebben een grote diameter. Dit is belangrijk om de drukval, veroorzaakt door de snelle luchtstroom in de leidingen, te beperken. Toch wordt het drukverlies aanzienlijk bij hoge drukken. Bij het berekenen van de nodige luchtdruk wordt hier rekening mee gehouden via een correctiefactor C. De factor C brengt zowel de drukverliezen als de wrijvingsverliezen van de impactor in de versnellerbuis in rekening. In (§ 3.4) wordt dit verder besproken.

In de figuur 3.1 wordt ook de laser afgebeeld. De laser is net na de versneller gepositioneerd. De laserstraal kruist de baan van de impactor en valt in op een fotocel. Wanneer de versneller de laserstraal onderbreekt, wordt dit door de fotocel gedetecteerd. Dit signaal wordt dan gebruikt als trigger voor het starten van de data-acquisitie en voor het starten van de hogesnelheidscamera. Bovendien wordt het triggersignaal ingelezen door de stuurcomputer, die op basis hiervan de luchttoevoer naar de versneller afsluit (via het 3/2-ventiel).



Figuur 3.1: Pneumatisch circuit



Figuur 3.2: Schema van de opstelling

3.3 LabVIEWTM programma ASIDE

3.3.1 LabVIEWTM [20]

 $LabVIEW^{TM}$ (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) is een grafische programmeertaal die gebruik maakt van iconen in plaats van tekstlijnen om applicaties te creëren. In tegenstelling tot tekstgebaseerde programmeertalen, waar instructies de uitvoering van het programma bepalen, gebruikt $LabVIEW^{TM}$ dataflow programmering, waar de data de uitvoering bepaalt.

In $LabVIEW^{TM}$ wordt een gebruikersinterface, frontpaneel genoemd, gecreëerd met behulp van tools en objecten. Nadien wordt code toegevoegd, gebruik makend van een grafische representatie van de verschillende functies om de frontpaneel-objecten te sturen. Deze code is samengevoegd in het blokdiagram en als deze goed gestructureerd is, stelt het blokdiagram een flowchart voor.

 $LabVIEW^{TM}$ -programma's worden virtuele instrumenten genoemd, of VI's, omdat hun uitzicht en hun werking fysische instrumenten imiteren, zoals bijvoorbeeld oscilloscopen en multimeters. Elke VI gebruikt functies om de input van de gebruikersinterface of andere bronnen (metingen, bestanden,...) te manipuleren en deze informatie te visualiseren, op te slaan in bestanden of te verplaatsen naar andere comuters.

3.3.2 Automation Software for Impact and Dynamic Experiments (ASIDE)

Het $LabVIEW^{TM}$ -programma ASIDE werd in een vorig afstudeerwerk [20] ontwikkeld. Het programma werd zo geconcipieerd dat naast het reeds bestaande programma voor de SHTB opstelling, nieuwe modules gemakkelijk toegevoegd kunnen worden. Het programma is dus uitbreidbaar voor de SHPB opstelling en voor andere impactproeven. De bestaande sturing voor de trekproeven diende als basis voor het nieuwe programma voor de drukproeven. De structuur van het programma wordt in figuur 3.3 weergegeven. De rood gekleurde onderdelen in het schema, werden tijdens dit afstudeerwerk toegevoegd.

Het programma wordt geopend door Pneumatische versnellers.vi te starten. Hier kan dan via een keuzemenu de gewenste proefopstelling geselecteerd worden. Wordt "SHPB" geselecteerd, dan opent Hopkinson Druk.vi. Het frontpaneel van deze VI is op figuur 3.4 te zien. Nadat de gebruiker de benodigde input aan het programma heeft verschaft, wordt na bevestiging (OK-knop) ervan het eigenlijke proefverloop gestart. Het programma Uitvoeren drukproef.vi voert vervolgens de proef uit zoals die in de vorige stap werd gedefinieerd. Na afloop van de proef wordt automatisch een rapport gegenereerd d.m.v. het programma Rapport druk.vi. De proefinstellingen worden ook geregistreerd in het logboek (Logboek druk.vi). In de hiernavolgende paragrafen wordt dieper ingegaan op de verschillende onderdelen van het programma.



Figuur 3.3: Structuur van het programma ASIDE

Hopkinson DRUK.vi

In dit deelprogramma wordt de proef gedefinieerd. Het frontpaneel wordt op figuur 3.4 getoond. Er zijn drie tabbladen waarop gegevens kunnen worden ingevoerd. Het blad General specifications is het belangrijkste en dient voor de invoer van algemene gegevens zoals: naam uitvoerder, datum en proefnummer. Hier worden eveneens de proefstukafmetingen (lengte en diameter) opgegeven voor een veronderstelde cilindervormige proefstukgeometrie. Tenslotte dient ook nog de gewenste druk om de impactor te versnellen ingesteld te worden (zie verder). Op het tabblad **Test set-up specifications** kan de configuratie van de proefstand worden ingegeven. Het betreft de gegevens van de hopkinsonstaven en de versneller (lengte, diameter, massa,...). De correctiefactor C, voor de drukverliezen in het circuit wordt hier ook ingevoerd. Het tabblad **Calibration-parameters pressure transducer** laat toe de twee calibratieparameters van de druksensor van het drukvat op te geven. De invoegvelden van de net besproken tabbladen worden met een paswoord beschermd. Voor het tabblad **General** specifications is echter geen paswoord vereist.

De nodige druk van de perslucht kan op vier verschillende manieren berekend worden. De gewenste berekeningsmethode kan geselecteerd worden via een draaiknop op het frontpaneel van Hopkinson DRUK.vi (fig. 3.4), tabblad General specifications. De AAN/UIT knop rechts onderaan op het frontpaneel laat toe om de druk te berekenen vooraleer overgegaan wordt op de verdere uitvoering van de proef. Als op de OK-knop gedrukt wordt terwijl de schakelaar zich in de OFF stand bevindt, wordt alleen een drukbereking uitgevoerd. De

drukberekening zelf gebeurt door de VI Uitvoeren drukproef.vi die telkens door Hopkinson DRUK.vi wordt opgeroepen. Het resultaat van de berekening wordt grafisch voorgesteld op de indicator Required pressure. De proef wordt evenwel nog niet gestart. Op die manier is er een mogelijkheid om, bij een eventuele "onlogische waarde" van de berekende druk, de ingegeven waarden voor de diverse grootheden nog eens te controleren.



Figuur 3.4: Frontpaneel Hopkinson DRUK.vi

Onderstaande lijst geeft de 4 berekeningsmodes weer, samen met de grootheden die in het programma moeten ingegeven worden om de berekening te kunnen uitvoeren. Deze grootheden kunnen via de verschillende tabbladen ingevoerd worden. De eerste mode is de nauwkeurigste en de laatste de minst nauwkeurige. Dit komt omdat tijdens de berekeningen een aantal veronderstellingen worden gemaakt (§3.3.3).

- 1. Rechtstreeks ingeven van de wenswaarde voor de \mathbf{druk} -> -
- 2. Drukberekening op basis van de gewenste **impactsnelheid** -> stroke, correctiefactor C, massadichtheid impactor en diameter impactor.
- 3. Drukberekening op basis van de gewenste amplitude van de ingaande spanningsgolf
 -> idem als 2 + diameter ingangsstaaf en massadichtheid ingangsstaaf.

4. Drukberekening op basis van de gewenste **vervormingssnelheid** -> idem als 3 + schatting vloeispanning proefmateriaal en afmetingen proefstuk

De formules, nodig voor de berekening, worden in §3.3.3 afgeleid.

Hopkinson Druk.vi vevult ook nog een onderhoudsfunctie. Na 20 en na 60 proeven, vraagt het programma om een klein, respectievelijk groot onderhoud van de opstelling. Bepaalde onderdelen van de opstelling moeten dan nagekeken worden. Het programma maakt gebruik van het logboek voor het bepalen van de onderhoudstijdstippen.

Uitvoeren drukproef.vi

Dit programma wordt gestart wanneer in Hopkinson DRUK.vi op de OK-knop wordt gedrukt met de keuzeschakelaar in de ON stand. Het is afgeleid van het gelijkaardige Uitvoeren proef.vi van de trekopstelling.

De eerste functie van het programma is de berekening van de nodige luchtdruk voor het versnellen van de impactor. De input-gegevens voor deze berekening zijn afkomsig van Hopkinson DRUK.vi. Na het bepalen van de druk en na bevestiging van de gebruiker start de proef.

Zoals reeds beschreven, verloopt het vullen van het drukvat in verschillende stappen. Eerst wordt de druk in het drukvat opgevoerd tot 0.1 bar boven de wenswaarde, waarna de inlaatklep gesloten wordt. Vervolgens daalt de druk in het drukvat door lekverliezen. Op het moment dat de gewenste druk bereikt wordt, opent het 3/2-ventiel zodat de impactor versnelt. Bij het onderbreken van de laser door de impactor, wordt het 3/2-ventiel opnieuw gesloten en wordt de druk in het drukvat afgelaten.

Wanneer tijdens de proef op de STOP-knop, ESC-toets of noodstop wordt gedrukt, zorgt het programma voor het veilig beïndigen van de proef. Het drukvat wordt dan volledig ontlucht.

Naast het uitvoeren van de eigenlijke drukproef, heeft dit programma een monitorfunctie naar de gebruiker toe. Figuur 3.5 toont het frontpaneel. De gebruiker wordt ingelicht over: de druk in het drukvat (numeriek en grafisch), de toestand van de kleppen (grafisch: rood=gesloten en groen=open) en het lekverlies. Op elk moment kan de gebruiker het programma stopzetten door op de STOP-knop te klikken of door op de ESCape toets te drukken. Er zijn ook twee POP-up vensters voorzien die de gebruiker helpen bij het correct uitvoeren van de proeven.

Rapport druk.vi

Deze VI wordt eveneens opgeroepen vanuit Hopkinson DRUK.vi. Het programma genereert een automatisch rapport. Het rapport vermelt zowel de gegevens van de proefstand als van het proefstuk die eerder werden ingegeven. Het is ook mogelijk om bijkomende commentaar in het rapport toe te voegen. De bestandsindeling is van het type "html".

Bijlage F bevat een voorbeeld van een rapport.



Figuur 3.5: Frontpaneel van Uitvoeren drukproef.vi

Logboek druk.vi

Deze VI wordt eveneens opgeroepen vanuit Hopkinson DRUK.vi. Het programma Logboek druk.vi, registreert elke proef in een logboek. Een logboekitem bevat ongeveer dezelfde informatie als het rapport dat door Rapport druk.vi gegenereerd wordt. Het logboek houdt ook het aantal uitgevoerde proeven bij. Het is de bedoeling dat om de 60 proeven een nieuw logboek wordt aangemaakt.

Bijlage F bevat eveneens een voorbeeld van een logboek.

In de volgende paragraaf worden de formules, nodig voor de berekening van de nodige druk, afgeleid.

3.3.3 Verband tussen persdruk, impactsnelheid, vervormingssnelheid

In dit deel worden betrekkingen opgesteld die het verband weergeven tussen de persdruk, impactsnelheid en vervormingssnelheid. Deze formules worden dan in het LabVIEW programma ASIDE gebruikt om de nodige luchtdruk te berekenen uitgaande van de gewenste impactsnelheid of vervormingssnelheid.

Voor de eenvoud wordt een constante druk in de versneller tijdens de proef verondersteld. Dit is een grove vereenvoudiging: het beperkte drukvatvolume en de drukverliezen over de leiding en het ventiel zorgen voor een niet constante druk. Toch blijft deze veronderstelling behouden omdat de formules anders recursief worden. Hierdoor kunnen eenvoudige expliciete uitdrukkingen gemakkelijk in LabVIEW geïmplementeerd worden. Met de drukverliezen wordt later rekening gehouden door het invoeren van een correctiefactor.

Voor een constante druk p volgt uit de wet van Newton dat een impactor met massa m_i en oppervlakte A_i een versnelling a krijgt

$$F = m_i a = p A_i \tag{3.2}$$

Bij een constante versnelling bedraagt de tijd tot impact

$$t = \sqrt{\frac{2l}{a}} \tag{3.3}$$

Hierin stelt l de afstand voor waarover versneld wordt (=stroke). De impactsnelheid van de impactor op het aambeeld van de ingangsstaaf is dan

$$V = \sqrt{2la} = \sqrt{2l\frac{pA_i}{m_i}} \tag{3.4}$$

De snelheid zal echter lager zijn doordat de druk in werkelijkheid niet constant is en doordat er wrijvingsverliezen zijn. Hiermee kan rekening gehouden worden door een reductiefactor C in te voeren. De factor C is de verhouding van de werkelijke impactsnelheid tot de theoretische impactsnelheid. De formule die in LabVIEW kan geïmplementeerd worden is dan

$$p = \frac{m_i}{2lC^2A_i}V^2 \tag{3.5}$$

Doordat hierin een kwadraat van C voorkomt zal de formule 3.5 niet al te nauwkeurig zijn.

In combinatie met de formule 1.4, die het verband tussen de impactsnelheid en de opgewekte spanningsamplitude ($\sigma_i = E_s \epsilon_i$) beschrijft geeft dit:

$$C = E_s A_s \epsilon_i \sqrt{\frac{m_i}{2lA_i p}} \frac{Z_s + Z_i}{Z_s Z_i}$$
(3.6)

Hierin stellen Z_s en Z_i de impedantie voor van respectievelijk de ingangsstaaf en de impactor en A_i is de oppervlakte van de doorsnede van de ingangsstaaf. Deze formule kan gebruikt worden om experimenteel een waarde voor C te bepalen.

De nodige luchtdruk kan ook rechtstreeks afgeleid worden uit de gewenste amplitude van de drukgolf σ_i .

$$p = \frac{m_i}{2lA_iC^2} \frac{(Z_s + Z_i)^2}{Z_s^2 Z_i^2} A_s^2 \sigma_i^2$$
(3.7)

Omdat $\sigma_i^2 = E_s^2 \epsilon_i^2$ en wegens het krachtenevenwicht (formule 1.9) kan ook geschreven worden

$$p = \frac{m_i}{2lA_iC^2} \frac{(Z_s + Z_i)^2}{Z_s^2 Z_i^2} A_s^2 \left(\epsilon_t - \epsilon_r\right)^2$$
(3.8)

 ϵ_t en ϵ_r volgen uit de formules 1.11 en 1.12:

$$\epsilon_t = \frac{A_p}{E_s A_s} \sigma_m; \quad \epsilon_r = \frac{L_p}{2C_s} \dot{\epsilon} \tag{3.9}$$

Met de formules 3.8 en 3.9 kan dus de nodige luchtdruk berekend worden uitgaande van de gewenste vervormingssnelheid $\dot{\epsilon}$ en een schatting van σ_m .

3.4 Evaluatie van de sturing

In figuur 3.6 wordt het experimentele en theoretische verband (formule 3.7) tussen de drukpuls in de ingangsstaaf en de luchtdruk uitgezet. De curven stijgen trager dan lineair, wat wil zeggen dat de benodigde luchtdruk bij hoge spanningsamplitudes heel snel toeneemt. Uit de figuur blijkt ook dat formule 3.7 de amplitude in de ingangsstaaf redelijk goed beschrijft. De correctiefactor voor het drukverlies in de leidingen ligt rond de C=0.63 (groene curve). Uit de figuur volgt tenslotte ook nog dat de maximaal bereikbare amplitude met de huidige opstelling (max. 6.5 bar) ongeveer 90 MPa bedraagt.



Figuur 3.6: Experimenteel en berekend verband tussen de luchtdruk en de amplitude van de spanningsgolf in de ingangsstaaf.

Hoofdstuk 4

Proefstukgeometrie en -productie

In dit hoofdstuk worden de afmetingen van de proefstukken voor dynamische drukproeven bepaald. Een literatuurstudie ligt hier aan de basis. Het doelmateriaal voor deze proefstukken is plaatstaal waarvan TRIP-staal het belangrijkste onderzochte materiaal is. Het maken van proefstukken uit plaatstaal brengt belangrijke praktische problemen met zich mee, waarop in dit hoofdstuk wordt ingegaan. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een stappenplan voor de productie van proefstukken.

4.1 Proefstukgeometrie

Voor het uitvoeren van dynamische compressie experimenten wordt meestal gebruik gemaakt van cilindrische proefstukken. Over de ideale afmetingen van deze proefstukken lopen de meningen nogal uiteen. De geometrie moet zodanig gekozen worden dat de spanning ééndimensionaal is en een uniforme spanningsverdeling bekomen wordt. Bovendien moet de spanning homogeen zijn. De geometrie van het proefstuk heeft een invloed op de wrijving in de contactvlakken proefstuk-staven en op de axiale en radiale inertiekrachten in het proefstuk.

• Wrijving in de eindvlakken

Wrijving heeft een zeer grote invloed op de resultaten. Door de wrijving zijn de spanningen in het proefstuk niet langer uniaxiaal. Slechts zeer lage waarden van de wrijvingscoëffiënt $\mu \approx 0.01$ zijn daarom toelaatbaar [12]. Smering heeft een belangrijke invloed op de wrijving. Lichtenberger, Lach en Bohmann [9] hebben deze invloed experimenteel bepaald. Uit de vervorming van ringvormige proefstukken kon de wrijvingscoëfficiënt in het contactvlak proefstuk-staaf bepaald worden. Voor stalen proefstukken (XC45) werden wrijvingscoëfficiënten van 0.150 (droog) tot 0.025 (gesmeerd) gevonden. Ook werd waargenomen dat bij toenemende vervormingssnelheid de wrijvingscoëfficiënt afneemt. De laagste wrijvingscoëfficiënt werd bekomen met een mengeling van grafiet en lichte olie. Ook "kopervet" wordt gebruikt voor de smering van het contactvlak [2]. Bovendien heeft de proefstukgeometrie een effect op de invloed van de wrijving: een hogere hoogte/diameter (h/d) verhouding vermindert de invloed van de wrijving. De wrijving zelf wordt er niet door beïnvloed.

• Axiale en radiale inertie

Door de hoge versnelling van materiaaldeeltjes veroorzaken inertiekrachten een niet te verwaarlozen afwijking van de uniaxiale spanningstoestand. Davies en Hunter [1] stellen

$$\frac{h}{d} = \frac{\sqrt{3}}{2}\nu_s \tag{4.1}$$

voor als de optimale verhouding om inertie effecten te minimaliseren. Hierin is h de hoogte en d de diameter van het proefstuk. ν_s is de effectieve poisson coëfficiënt onder testvoorwaarden; voor metalen is dit bij plastische vervorming 0.5. Samanta [3] heeft deze analyse nog eens overgedaan en bracht de verhouding op $\frac{h}{d} = \frac{\sqrt{3}}{4}$, wat op hetzelfde neerkomt voor metalen. Deze verhoudingen werden bepaald in de veronderstelling van uniforme vervorming. Dit is echter o.a. door wrijving niet het geval [12].

• Homogeniteit van de spanning

De klassieke formules voor het berekenen van de spanningstoestand in het proefstuk, gaan uit van een uniforme spanningsverdeling doorheen het proefstuk in zowel de axiale als radiale richting. In het begin van een proef is de homogeniteit in de axiale richting echter niet verzekerd, er moet een minimale vervorming zijn [8] [12]. Proefstukken met een kleine hoogte zullen het snelst een homogene spanningstoestand in axiale richting bereiken. Bij het beproeven van staal is deze voorwaarde minder van belang omdat er grote vervormingen optreden. De homogeniteit van de spanningen in de radiale richting wordt o.a. bepaald door de wrijving in de eindvlakken en de indrukking van de staafuiteinden.

Sommige onderzoekers stappen af van cilindrische proefstukken om wrijvings- en inertie effecten te beperken [10]. Ze gebruiken een haltervormig proefstuk (zoals gebruikelijk bij trekproeven). Deze proefstukken hebben in het algemeen een hoge h/d verhouding. Een praktisch nadeel van een hoge h/d verhouding is dat de kans op knik toeneemt. Ook moet men bij haltervormige proefstukken rekening houden met de effecten van de inklemming aan de randen. Deze werden tot nu toe nog niet voldoende onderzocht. Uiteraard is ook het vervaardigen van zulke proefstukken moeilijker zodat de voorkeur eerder uitgaat naar cilindervormige proefstukken.

Onderstaande tabel 4.1 toont gebruikte proefstukgeometrieën uit de literatuur. Met d_0 wordt de staafdiameter bedoeld. Bij druk ligt de gebruikte hoogte/diameter verhouding steeds rond de eenheid. Daarom zullen proefstukken met als h/d verhouding

$$\frac{h}{d} = 1 \tag{4.2}$$

gebruikt worden. Dit is niet de ideale verhouding volgens Davies en Hunter (formule 4.1). Maar tijdens de proef neemt echter de hoogte af en de diameter toe. Hierdoor zal toch ongeveer de "ideale" verhouding bekomen worden.

Tot nu toe werd alleen een geschikte h/d verhouding gekozen. De absolute afmetingen van het proefstuk kunnen worden bepaald uit een compromis. Enerzijds is een groot proefstuk om

Geometrie	Diameter	Hoogte	$\frac{h}{d}$	$\frac{d}{d_0}$	Materiaal	$\mathbf{trek}/\mathbf{druk}$	bron
cilinder	$10\mathrm{mm}$	$11.5\mathrm{mm}$	1.15	-	Ti6Al4V	druk	[21]
halter	7	8	1.14	0.35	35NCD16	druk	[10]
cilinder	10	8	0.5	0.625	Al en PMMA	druk	[4]
cilinder	9.5	2.6 - 4.5	0.27 - 0.47	0.6	Al	druk	[2]
cilinder	10	10	1	0.79	alulight	druk	[5]
cilinder	12.5	12.5	1	-	PVC foam	druk	[22]
halter	3.2	7	2.18	-	Remco Iron	trek	[6]
halter	3	5	1.66	-	Weldox	trek	[23]
halter	4	8	2	0.33	_	trek/druk	[24]

Tabel 4.1: Geometrieën uit de literatuur

productie-technische redenen een voordeel. Anderzijds is het zo dat de vervormingssnelheid lager is bij grote proefstukken.

Formule 1.11 geeft de reksnelheid i.f.v. de gereflecteerde golf ϵ_r . Uit de de formule voor het krachtenevenwicht 1.9 en de gemiddelde spanning 1.12 kan ϵ_r berekend worden. Hiervoor is wel een schatting nodig van de spanning in het proefstuk gedurende een proef. Voor TRIP is 1000 MPa, alhoewel wat conservatief, een realistische waarde. Voor een proefstuk met een lengte $L_p = 5 mm$ en de volgende parameters

•
$$C_s = \sqrt{\frac{70e9}{2700}} = 5091 \, m/s$$

- $A_s = 0.000491 \, m^2$
- $A_p = 0.00002 \, m^2$
- $E_s = 70 \, GPa$
- $L_p = 5 \, mm$
- $\sigma_i(t) = 80 MPa$
- $\epsilon_i(t) = \frac{\sigma_i(t)}{E_s} = 0.001143,$

hoort aldus een reksnelheid $\dot{\epsilon}(t) = 1143 \, s^{-1}$. Dit is voldoende. Daarom wordt er verdergewerkt met

$$h = d = 5 \, mm \tag{4.3}$$

Door de resultaten die bekomen worden uit simulaties en experimenten, kan de proefstukgeometrie verder verfijnd worden. (zie hoofdstukken 6 en 7)

Vanwege het specifieke productieproces is TRIP-staal standaard verkrijgbaar in de vorm van dunne platen. Dit is een praktisch probleem voor het maken van cilindervormige proefstukken. Bij de rechtstreekse beproeving van plaatjes TRIP-staal zal de allerkleinste onregelmatigheid in de opstelling ervoor zorgen dat het proefplaatje knikt. Er zijn twee mogelijkheden om dit probleem aan te pakken. Het is in principe mogelijk om het proefplaatje in de dwarsrichting te ondersteunen om zo knik te voorkomen. De grote moeilijkheid bij deze methode is dat de ondersteuning de spanningstoestand in het proefstuk niet mag beïnvloeden. Bij het beproeven van composieten kan hier enigzins nog aan voldaan worden. Men maakt dan gebruik van een honingraatstructuur: grote stijfheid in de dwarsrichting en zeer lage stijfheid in de langsrichting ([25] en fig. 4.1). Bij de beproeving van staal, waar grote plastische vervormingen voorkomen is zo'n ondersteuning minder evident. De ondersteuning zou enerzijds voldoende stijf moeten zijn om knik te voorkomen, maar moet anderzijds toch de dwarse uitzetting toelaten. Bovendien moet wegens de kleine afmetingen van het proefstuk de ondersteuning zeer compact zijn.

Daarom wordt voor een andere aanpak gekozen. Door plaatjes op elkaar te kleven kan toch een massief stuk materiaal verkregen worden. Hieruit kunnen dan de cilindervormige (of eventueel haltervormige) proefstukken gemaakt worden. Door de grotere dwarsdoorsnede wordt knik vermeden. In de literatuur is er weinig te vinden over proefstukken die opgebouwd zijn uit plaatjes. Han Zhao en Gérard Gary gebruiken in [26] proefstukken opgebouwd uit plaatjes ("sandwich specimen"). De preciese geometrie en manier van verlijming wordt echter niet meegedeeld.



Figuur 4.1: Honingraatstructuur voor de ondersteuning van proefstukken [25]

4.2 Vervaardigen van de proefstukken

Het doel is om uit plaatmateriaal cilindervormige proefstukken te maken. Tijdens de productie mag het materiaal niet opwarmen om de temperatuurgevoelige microstructuur van het TRIPstaal niet te beïnvloeden. Daarnaast moet absoluut vermeden worden dat het proefmateriaal tijdens de productie van het proefstuk reeds plastisch vervormt en zo de microstructuur van het materiaal verandert door transformaties. Smeden is dus zeker geen bruikbare techniek. De cilindervormige proefstukken kunnen wel gemaakt worden door de plaatjes op elkaar te lijmen. Verschillende mogelijkheden hiervoor werden overwogen:

- De plaatjes worden zeer nauwkeurig uitgesneden via een draadvonkerosieproces. Daarna worden de plaatjes op elkaar gekleefd. De afmetingen van de plaatjes en de afschuining van de snede worden zo ingesteld zodat de op elkaar verlijmde plaatjes een cilinder vormen. Het voordeel van deze methode is dat er geen nabewerking nodig is. Deze methode bleek echter niet haalbaar omwille van diverse redenen. Ondanks de nauwe toleranties van het draadvonkerosieproces is het niet evident om van de verschillende plaatjes een cilinder te maken. Bovendien zorgen de zeer kleine afmetingen van de plaatjes voor technische moeilijkheden bij het draadvonken.
- Rechthoekige plaatjes van gelijke afmetingen op elkaar kleven en daarna uit het platenpakket cilinders snijden via draadvonkerosie. Het voordeel van deze methode is de grote nauwkeurgheid en het feit dat de lijmlagen niet mechanisch belast worden.
- Rechthoekige plaatjes van gelijke afmetingen op elkaar kleven en daarna via een draaibewerking cilindertjes maken uit het platenpakket. Hier worden de lijmlagen wel belast.

Uiteindelijk werd gekozen voor de laatste methode met als hoofdargument de eenvoud van de gebruikte productietechnieken. Het draadvonken, dat bij de andere methodes wordt gebruikt, is niet voor alle laboratoria haalbaar. Het is te verkiezen om de proefstukken te maken via conventionele productietechnieken.

Dit hoofdstuk wordt besloten met een stappenplan voor het maken van de proefstukken. Verschillende pogingen waren nodig om de eerste keer tot bruikbare proefstukken te komen.

Er wordt vertrokken van plaatjes TRIP-staal met de volgende afmetingen: lengte $90 \,\mathrm{mm}$, breedte $25 \,\mathrm{mm}$ en dikte $1.39 \,\mathrm{mm}$.

- 1. De plaatjes voorbereiden voor het lijmen. Om goede hechting te verzekeren moeten de plaatjes zeer goed ontvet en ruw gemaakt worden. Zeer ruw schuurpapier of zelfs een vijl kunnen hiervoor gebruikt worden. Een hoge ruwheid is belangrijk omdat de lijm de beste sterkte-eigenschappen vertoont bij een afstand tussen de te verlijmen oppervlakken van 0.05 mm. Voor het ontvetten wordt aceton gebruikt. Het is heel belangrijk om voldoende tijd te laten tussen het ontvetten en het verlijmen want een kleine hoeveelheid achtergebleven aceton op de oppervlakken tast de lijmsterkte aan.
- 2. Vier plaatjes op elkaar kleven. Verschillende lijmen werden uitgeprobeerd: Epofix, Loctite^R 406 en Loctite^R 480. De laatste lijm gaf de beste resultaten. Deze lijm heeft een verhoogde flexibiliteit en afpelsterkte samen met verbeterde schokweerstand. Bijlage E bevat een datasheet van deze lijm. Om de plaatjes correct te positioneren, kunnen ze tussen metalen blokken geklemd worden. Vastkleven van de blokken aan de plaatjes wordt voorkomen door een plastiekfolie. Alhoewel de lijm snel vulkaniseert (max.

enkele uren) duurt het toch minstens 24 uur voordat de lijm op volle sterkte is. Het platenpakket wordt tijdens het uitharden vastgeklemd in een bankschroef.

- 3. Uit het platenpakket drie balkjes maken. Tijdens het verzagen is koeling noodzakelijk om te TRIP-structuur niet aan te tasten. De drie bekomen balkjes moeten daarna nog perfect vierkant gemaakt worden. Dit is belangrijk voor de volgende stap: de draaibewerking. Voor het vierkant maken wordt een schaafmachine gebruikt. Het voordeel van schaven t.o.v. frezen is dat bij het schaven de lijmverbindingen niet belast worden.
- 4. Draaien van een staafje uit de balkjes. Voor de nauwkeurig inklemming van het proefstuk wordt een zelfcentrerende vierklauw gebruikt. De spindelsnelheid bedraagt 800 tpm.
- 5. Op lengte zagen van de staafjes. Omdat na deze stap de eindvlakken van het proefstuk eventueel nog gepolijst worden, moet een toeslag op de proefstuklengte voorzien worden. Voor het verzagen wordt een hulpstuk gebruikt (fig. 4.2 en bijlage D). Het staafje past in de opening met diameter 5 mm, die vervolgens dichtgeklemd wordt. Hierdoor worden de lijmverbindingen niet belast en kunnen de plaatjes waaruit het proefstuk is opgebouwd niet loskomen. Bovendien zal door het hulpstuk, het staafje altijd correct gepositioneerd zijn t.o.v. het zaagblad. Door een boord aan de rand van het hulpstuk, past het precies op de tafel van de machine. De gebruikte machine is van het merk Struers, type Discotom-2 met waterkoeling. De "autofeed" functie met voldoende lage voedingssnelheid geeft betere resultaten dan een manuele voeding.
- 6. Polijsten van de eindvlakken van de proefstukken. Meerdere proefstukken kunnen tegelijkertijd gepolijst worden door gebruik te maken van het hulpstuk dat op figuur 4.2 te zien is. De proefstukjes worden in de gaten (met diameter 5 mm) van het hulpstuk geplaatst. Het hulpstuk wordt op zijn beurt op de magnetische tafel van de polijstmachine vast gezet. Alle proefstukken die tegelijkertijd gemaakt worden, hebben exact dezelfde afmetingen. Dit komt de reproduceerbaarheid ten goede. Het polijsten met een polijstmachine werd tijdens dit werk dikwijls vervangen door manueel polijsten met schuurpapier. Het afronden van de hoeken van het proefstuk werd ook manueel uitgevoerd.

Op figuur 4.3 zijn een aantal beelden van het productieproces te zien. Het resultaat wordt op figuur 4.4 getoond.



Figuur 4.2: Houder om het staafje vast te klemmen tijdens het verzagen en houder voor het polijsten



Figuur 4.3: Vervaardigen van de proefstukken



Figuur 4.4: Proefstukken van diverse lengte

Hoofdstuk 5

Optimalisatie van de staafuiteinden

Bij compressie Hopkinson proeven is de vloeispanning van het proefstuk beduidend lager dan de vloeispanning van de staven. De staafuiteinden blijven dan vlak, terwijl het proefstuk vervormt. De gereflecteerde trekgolf in de ingangsstaaf is in dat geval een goede maat voor de relatieve snelheid van de beide staafuiteinden, zodat deze kan gebruikt worden om het rekverloop in het proefstuk te bekomen. Bij het testen van zeer harde materialen (keramiek, hard staal) is dit echter niet meer het geval. De spanning in het proefstuk uit TRIP-staal zal tijdens een dynamische compressieproef oplopen tot meer dan 1000 MPa. Het aluminium van de Hopkinsonstaven daarentegen, heeft een vloeisterkte van slechts 145 MPa. Het proefstuk zal dus een indrukking nalaten in de staven. Bij het gebruik van deze aluminium staven zonder aanpassingen zullen dus niet de proefstukken maar wel de staven plastisch vervormen. Het gevolg is beschadiging van de staven en foute proefresultaten. Dit probleem wordt in dit hoofdstuk verder besproken.

5.1 Probleemomschrijving

Plastische vervorming van de staafuiteinden heeft aanleiding tot de volgende problemen:

- Beschadiging van de staven, de indrukking is permanent.
- De formules 1.10 voor de rek, 1.11 voor de vervormingssnelheid en 1.12 voor de spanning zijn niet meer geldig. In de staafuiteinden ontstaat tengevolge van de spanningsconcentratie en plastische vervorming een complexe 3-assige spanningstoestand. Het effect hiervan op de gereflecteerde en doorgelaten golven is heel moeilijk voorspelbaar.
- In een ideale Hopkinson proef is de gereflecteerde spanningsgolf ϵ_r een maat voor de snelheid van het uiteinde van de ingangsstaaf relatief t.o.v. het uiteinde van de uitgangsstaaf. Wanneer de staafuiteinden echter vervormen, is de relatieve snelheid van de staafuiteinden niet meer evenredig met de vervormingssnelheid van het proefstuk. De geregistreerde reksignalen kunnen in dat geval niet langer gebruikt worden om de vervormingstoestand van het proefstuk te beschrijven. De doorgelaten golf blijft wel een goede indicatie voor de spanning in het proefstuk [27].

- Doordat de indrukking van het proefstuk groter is aan de rand dan in het centrum van de contactvlakken, zal in het proefstuk een niet-uniforme spanningstoestand heersen. De samendrukking van het proefstuk aan de rand is groter dan langs de centrale as. Naast foute proefresultaten vormen de niet-axiale spanningen een extra belasting voor de lijm tussen de afzonderlijke lagen van het proefstuk. FEM simulaties zijn uitstekend geschikt om de spanningsverdeling in het proefstuk na te gaan (Hoofdstuk 6).
- Door de indrukking van de staven wordt het proefstuk aan de uiteinden als het ware ingeklemd. De wrijvingskrachten in de eindvlakken worden hierdoor veel groter met tonvorming van het proefstuk tot gevolg. Dit zorgt voor een niet-uniforme spanningstoestand in de radiale richting.

Op de proefopstelling van de Koninklijke Militaire School (KMS) [21] werd het probleem opgelost door gebruik te maken van staven uit 'maraging steel'. Deze staalsoort heeft een vloeisterkte tot 1500 MPa waardoor indrukking van de staven veel minder problematisch is. Stalen staven hebben echter ook een groot nadeel. Door hun 3x hogere elasticiteitsmodulus is een veel hogere impactsnelheid nodig voor eenzelfde reksnelheid. De huidige versneller en compressor hebben een beperkt drukbereik (max. ± 6.5 bar). Met stalen staven zou dus een andere versneller en compressor nodig zijn. Om al te grote aanpassingen aan de opstelling te vermijden worden daarom de aluminiumstaven behouden.

In [27] worden testen uitgevoerd op keramische materialen. Omdat indrukking van de staven niet vermeden kon worden brengt men rekstrookjes aan op het proefstuk zelf. Op die manier kan het rekverloop van het proefstuk bekomen worden zonder gebruik te maken van de gereflecteerde golf. De gereflecteerde golf is immers bij ingedrukte staafuiteinden niet meer evenredig met de relatieve verplaatsing van de staafuiteinden. Voor keramische materialen waar de plastische vervormingen zeer beperkt zijn, is een rechtstreekse meting van de vervorming met rekstrookjes op het proefstuk mogelijk maar voor het beproeven van TRIP-staal kan dit niet. De proefstukafmetingen zijn zeer klein en de vervormingen zeer groot. Een andere oplossing moet gezocht worden. Er worden vier mogelijke oplossingen onderzocht:

- 1. Beschermingsplaatjes uit een hard materiaal kleven op de staafuiteinden
- 2. Harde aluminium stompjes kleven op de staafuiteinden
- 3. Aangepaste geometrie van de proefstukken en van de staafuiteinden
- 4. Voorspanning (eigenspanningen) in de staafuiteinden

Deze mogelijkheden worden in de nu volgende paragraaf beschreven. Alleen de eerste twee mogelijkheden blijken bruikbaar.

5.2 Beschermplaatjes

De staafuiteinden kunnen beschermd worden met dunne plaatjes uit een hard en stijf materiaal. Er wordt gekozen voor plaatjes uit CP1000-staal (Complex Phase steel). Deze staalsoort heeft een vloeispanning van ongeveer 1000 MPa. Toch heeft het materiaal ook een hoge ductiliteit wat belangrijk is bij impactbelasting (geen bros breken). CP-staal is gelijkaardig aan TRIP staal maar verschilt ervan door een nog fijnere korrelstructuur. Er wordt gebruik gemaakt van plaatjes met een dikte van 1.8 mm. Voor de diameter wordt 15 mm gekozen, zodanig dat de invloed op de golfvormen beperkt blijft (§5.2.1). Deze plaatjes worden op de staafuiteinden gelijmd. Verschillende figuren van de beschermingsplaatjes zijn te vinden in hoofdstuk 7 over de experimenten (bijvoorbeeld. fig. 7.8).

5.2.1 Invloed van de beschermingsplaatjes op de golfvormen

De ingaande spanningsgolf zal gedeeltelijk weerkaatsen op het CP-plaatje. In het algemeen is het zo dat een golf in een staaf gedeeltelijk reflecteert omwille van de volgende drie redenen:

- Een zone met 3-assige spanningstoestand veroorzaakt reflectie. Het beschermingsplaatje zorgt voor een 3-assige spanningstoestand in de staafuiteinden waarop de golven dus reflecteren. Zonder beschermingsplaatjes zou er echter een veel grotere niet-unidirectionele spanning ontstaan waardoor er veel meer reflectie zou zijn. Dit kan dus zeker geen reden zijn om de beschermingsplaatjes niet te gebruiken. De reflectie die ontstaat door de complexe spanningstoestand is zeer moeilijk te begroten. Hoe groter het plaatje hoe minder dit effect optreedt.
- 2. Verandering in diameter. Omdat de diameter uiteindelijk toch gereduceerd wordt tot 5 mm (proefstuk) is deze verandering in diameter minder van belang.
- 3. Verandering van impedantie. Reflecties door impedantieveranderingen werden onderzocht in de literatuur [8]. Steunend op de eendimensionale golftheorie kunnen uitdrukkingen worden opgesteld voor het gedeelte van een golf dat wordt gereflecteerd aan een grensvlak tussen twee elastische materialen. Wanneer een golf σ_I (blokgolf) een grensoppervlak tussen twee verschillende materialen, 1 en 2, ontmoet, dan zal een gedeelte σ_R van de golf op dit grensoppervlak worden gereflecteerd en een gedeelte σ_T doorgelaten worden. De verhouding van de gereflecteerde en de doorgelaten golf tot de oorspronkelijke golf kan worden bekomen door uit de drukken dat in het grensvlak tussen de twee materialen de krachten en de deeltjessnelheden gelijk moeten zijn. Uiteindelijk komt men dan voor de kracht t.o.v. F_I tot

$$F_T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_I, \quad F_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_I \tag{5.1}$$

Met $F_T = A_2 \sigma_T$, $F_R = A_1 \sigma_R$ en Z_1 en Z_2 de impedantie van materialen 1 en 2 zoals gedefinieerd in §1.3.3. Vaak wordt gebruik gemaakt van de grootheden reflectiecoëfficiënt r_R en transmissiecoëfficiënt r_T :

$$r_T = \frac{F_T}{F_I} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad r_R = \frac{F_R}{F_I} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$
 (5.2)

De reflectiecoëfficiënt kan negatieve waarden aannemen. In dat geval wordt een (trek-) drukgolf gereflecteerd als een (druk-) trekgolf.

De diameter van het beschermingsplaatje kan gekozen worden zodat er geen impedantieverschil tussen de staven en het plaatje is $Z_{CP} = Z_{Al}$. De hiermee corresponderende diameter is 14.5 mm.

Opmerking over de toepassing van de theorie over reflecties

Het is heel belangrijk om op te merken dat de toepassing van de theorie over reflectie in dit geval niet erg zinvol is. Het plaatje is immers zo dun (1.8 mm) dat de golven in het plaatje nooit tot een regime toestand komen zodat het eigenlijk zinloos is om de reflectie door diameter- en impedantieverandering te berekenen. In het beschermingsplaatje zijn het vooral de randeffecten die het spanningsverloop bepalen. (De formule 5.2 zal verder wel gebruikt worden voor het bepalen van de invloed van de geharde aluminium stompjes.)

Daarom en vooral omdat het technisch moeilijk is om ronde CP-plaatjes te maken worden de berekende afmetingen ($\otimes 14.5 \text{ mm}$) voor de beschermingsplaatjes niet strikt gevolgd. Bij de proeven worden verder vierkante plaatjes van 20 mm x 20 mm met afgeronde hoeken gebruikt.

5.2.2 Resultaten

Simulaties in Abaqus hebben aangetoond dat de beschermingsplaatjes alleen, niet volstaan om indrukking van de staafuiteinden te vermijden. Dit is duidelijk op figuur 5.1 te zien. De figuur toont de van Mises spanning in 1/4 van een proefstuk tijdens een proef. De spanning in het proefstuk is sterk niet-uniform (tussen 1000 MPa en 2000 MPa) en de indrukking van de staafuiteinden is zeer uitgesproken. De vervormingen zijn op ware schaal ("scalefactor"=1) weergegeven.



Figuur 5.1: Indrukking van de staafuiteinden met beschermingsplaatjes.

5.3 Geharde aluminium stompjes

De staafuiteinden kunnen bijkomend beschermd worden met korte stompjes uit een hard materiaal. Deze stompjes worden dan op de staafuiteinden gekleefd. Om reflecties aan het grensoppervlak van de hopkinsonstaven en de stompjes te beperken, moet het impedantieverschil en oppervlakteverschil tussen de stompjes en de hopkinsonstaven zo klein mogelijk zijn. In het ideale geval is er zelfs geen verschil. Stompjes uit aluminium komen het dichtst in de buurt van dit doel. Het aluminium met de hoogste vloeisterkte en hardheid, dat verkrijgbaar is in staafvorm, is Al 7075-T6 (AlZn5.5MgCu). De aanduiding T6 staat voor kunstmatige veroudering. De verouderingstemperatuur is slechts 120°C zodat moet opgelet worden met proeven bij verhoogde temperatuur en bij lassen! Ook het losbranden van het stompje zal de hoge sterkte eigenschappen teniet doen. Onderstaande tabel (5.1) vergelijkt de belangrijkste karakteristieken tussen dit materiaal en het Al5083 van de hopkinsonstaven [28] [29]. Doordat de mechanische eigenschappen van beide materialen sterk gelijkaardig zijn, blijft de reflectie aanvaardbaar laag (zie §5.6).

	Al 5083	Al 7075-T6
Massadichtheid $[kg/m^3]$	2660	2810
Treksterkte [MPa]	290	570
Vloeispanning [MPa]	145	503
Brinell Hardheid	77	150
Young's modulus [GPa] gemiddeld/druk	71/71.7	71.7/72.5
Poisson coëfficiënt	0.33	0.33
Rek bij breuk [%]	22	11
Machinability [%]	70	30

Tabel 5.1: Vergelijking van de eigenschappen van Al 5083 en Al 7075-T6

5.3.1 Resultaten

Uit simulaties blijkt dat de indrukking beperkt blijft tot maximaal 0.12 mm (blauwe curve op fig. 5.4). Dit is niet veel maar het kan wel een invloed hebben op de experimentele resultaten. Daarom worden andere manieren om de indrukking te verminderen verder onderzocht.

5.4 Aangepaste geometrie

5.4.1 Aangepaste geometrie van het proefstuk

Indrukking kan voorkomen worden door de contactspanning in het interactievlak van proefstuk en staven te verminderen. Dit kan door over te gaan naar haltervormige of "dogbone"-vormige proefstukken i.p.v. de cilindervormige proefstukken [10]. Deze nieuwe proefstukvorm brengt echter twee bijkomende problemen met zich mee:

- Het is heel wat moeilijker om deze proefstukken te maken vooral omdat het proefstuk uit op elkaar gelijmde plaatjes bestaat.
- Door de afwijkende vorm zullen de spanningen in het proefstuk minder uniform zijn terwijl de hoofdreden voor het reduceren van de indrukking van de staven net het verminderen van de niet-uniforme spanningstoestand is.

Het heeft dus weinig zin om af te stappen van de cilindervormige proefstukken.

5.4.2 Aangepaste geometrie van de staafuiteinden

Het is eigenlijk niet de indrukking zelf die nadelig is, maar vooral het feit dat de indrukking niet gelijkmatig is. Het proefstuk wordt daardoor niet meer uniform belast in de eindvlakken. Langs de centrale as van het proefstuk is de spanning veel hoger dan langs de randen van het proefstuk. Er wordt onderzocht of een aangepaste geometrie van de staafuiteinden een meer **gelijkmatige** indrukking tot gevolg kan hebben. Naast het vlakke staafuiteinde worden twee mogelijke geometrieën beschouwd.

1. Op het staafuiteinde wordt een cirkelvormige groef gemaakt (fig. 5.2). Het doel hiervan is het verminderen van de stijfheid. Het idee hier achter is dat door de lagere stijfheid, enerzijds de indrukking groter wordt maar dat anderzijds de indrukking meer uniform is. Uit simulaties (fig. 5.4) blijkt dit echter niet het geval te zijn. In tegendeel, de indrukking wordt zelfs groter en ongelijkmatiger. Dit kan dus zeker geen oplossing zijn.



Figuur 5.2: Staafuiteinde met groef

2. Op het staafuiteinde wordt een ring uit een materiaal met hoge stijfheid geplaatst (fig. 5.3). De ring kan bijvoorbeeld gemaakt zijn uit machinestaal of eventueel zelfs uit kool-stofvezel. De bedoeling hiervan is het opsluiten van het aluminium van de staafuiteinden, zodat het zelfs bij zeer hoge spanningen niet plastisch kan vervormen. In het opgesloten volume aluminium heerst dan een 3-zijdige druktoestand. Wederom bleek uit de simulaties dat dit in de praktijk niet goed werkt. Het aluminium blijft plastisch vervormen. Doordat de druk in de ondersteuning van het CP-beschermingsplaatje nu hoger is, is de indrukking van het beschermingsplaatje zelfs groter.

Geen van deze beide mogelijkheden zal dus gebruikt worden. Figuur 5.4 toont de plastische vervorming en de indrukking voor de verschillende staafgeometrieën. De aanduidingen v1, v2 en v3 staan voor respectievelijk niet-aangepast staafuiteinde, staafuiteinde met groef en staafuiteinde met spanring. De verplaatsing in de axiale richting wordt aangeduid met U3. De niet-aangepaste versie van het staafuiteinde heeft uiteindelijk nog de beste eigenschappen.



Figuur 5.3: Staafuiteind met spanring

De zone met maximale PEEQ van het beschermingsplaatje bevindt zich telkens ter hoogte van de diameter van de proefstukken (2.5 mm). Dit is logisch want de afschuifspanningen zijn daar maximaal. (PEEQ = equivalente plastische vervorming)



Figuur 5.4: PEEQ en indrukking van de staafuiteinden voor verschillende geometrieën

5.5 Voorspanning

Een laatste mogelijkheid die wordt bekeken is het effect van eigenspanningen in het staafuiteinde. De bedoeling is om via het introduceren van eigenspanningen in de beschermingsplaatjes en staven, de plastische vervorming (die onstaat door schuifspanningen) te reduceren. Deze optie wordt gesimuleerd in Abaqus door eerst het aluminium gelijkmatig in te drukken over 0.05mm. Daarna pas start de eigenlijke proef. De eigenspanningen blijken net zoals bij het staafuiteinde met spanring een omgekeerd effect te hebben. Door de hogere stijfheid van het onderliggend materiaal gaat het beschermingsplaatje zelfs meer plastisch vervormen.

Eigenspanningen zouden eventueel een probleem kunnen worden bij het uitvoeren van meerdere experimenten met dezelfde staafuiteinden. Door de belasting van de eerste proef worden er eigenspanningen in het materiaal ingevoerd. De resultaten van het eerste experiment kunnen daarom verschillen van de verdere experimenten.

5.6 Invloed op de golfvormen

De staafuiteinden worden uiteindelijk beschermd met beschermingsplaatjes en geharde aluminium stompjes. Zoals in het vorige deel beschreven, zijn dit de enige twee doeltreffende mogelijkheden. Om de invloed van de stompjes zo beperkt mogelijk te houden, wordt de diameter van de stompjes gelijk genomen aan de staafdiameter. De lengte van de stompjes is best ook zo klein mogelijk. Uit de simulaties blijkt dat er enkel in de zeer nabije omgeving van de staafeinden een grote spanningsconcentratie bestaat (fig. 6.5), zodat een lengte van 40 mm volstaat. Door de keuze van Al7075 blijft het impedantieverschil tussen de staven en de stompjes beperkt tot +3.3%. De reflectiecoëfficiënt is dan klein: 0.0165. Bij een ingaande drukgolf is de reflectie dus een zeer klein drukgolfje.

De invloed van het beschermingsplaatje en de Al7075 stompjes wordt vervolgens ook gesimuleerd in Abaqus. Voor de simulaties wordt een model op volle schaal gebruikt. Figuur 5.5(a) toont de ingaande golf en de reflectie ervan. Figuur 5.5(b) toont de gereflecteerde golf in meer detail. Er zijn resultaten te zien van drie simulaties: invloed CP-plaatje afzonderlijk, invloed stompjes afzonderlijk en de gecombineerde invloed. Een merkwaardig verschijnsel valt op. De amplitude van de gereflecteerde golf bij combinatie van de stompjes en het plaatje is kleiner dan de amplitude van de gereflecteerde golf bij het CP-plaatje afzonderlijk. Omdat de reflecties in elk geval beperkt blijven, wordt dit hier niet verder onderzocht.



Figuur 5.5: a) Reflectie veroorzaakt door CP beschermingsplaatje en Al7075 stompjes. b) Detail van de reflectie door beschermingsplaatje en Al7075 stompjes afzonderlijk

De stompjes en het beschermingsplaatje zijn verlijmd aan de staven. De invloed van een dunne lijmlaag is eveneens verwaarloosbaar [8].

Hoofdstuk 6

Eindige Elementen Simulaties

Simulaties werden intensief aangewend bij verschillende onderdelen van deze thesis. Bij het onderzoek naar de indrukking van de staafuiteinden waren de simulaties onmisbaar (hoofdstuk 5). Verder worden simulaties in dit hoofdstuk gebruikt voor het optimaliseren van de proefstukgeometrie. Het programma dat hiervoor wordt gebruikt is Abaqus. In de vorige afstudeerwerken [18] en [11] werd reeds uitvoerig beschreven hoe men een eindig elementen model in Abaqus kan opstellen. Daarom wordt het niet nodig geacht om dit in dit werk te herhalen. In het eerste deel van dit hoofdstuk wordt enkel kort beschreven welke modellen er werden opgesteld, waarvoor ze werden gebruikt en wat de resultaten zijn. In het tweede deel van het hoofdstuk worden simulaties gebruikt om de spanningsverdeling in een proefstuk te analyseren. Uit deze resultaten volgen conclusies voor de optimale proefstukgeometrie

6.1 Statisch model

Met dit model wordt ondermeer onderzocht of de spanningstoestand in proefstukken met een vierkante doorsnede grondig verschillend is van die in proefstukken met cilindervormige doorsnede. Proefstukken met een vierkante doorsnede zijn namelijk gemakkelijker te maken dan cilindervormige proefstukken. Er worden twee verschillende modellen gebouwd in ABAQUS/STANDARD. Met het eerste model wordt de invloed onderzocht van de wrijving in de eindvlakken op de uniformiteit en uniaxialiteit van de spanning in een proefstuk onder statische belasting.

Het model bestaat uit het cilinder- of kubusvormig proefstuk dat tussen twee rigid body's wordt geplaatst. De onvervormbare lichamen verplaatsen zich over een vaste afstand (3 mm). Doordat de rigid body's in tegenstelling met de werkelijke staafuiteinden niet vervormen, wordt de invloed van vervormde staafuiteinden uitgesloten. Alleen de geometrie van het proefstuk en de wrijving in de eindvlakken hebben een invloed. Er worden "equivalente" afmetingen voor beide proefstukgeometrieën gebruikt. De afmetingen van het kubusvormige proefstuk bedragen 6.95 mm en die van het cilindervormige proefstuk zijn hoogte=6.95 mm en diameter=7.84 mm. Met deze keuze is de oppervlakte van de doorsnede van beide proefstukken gelijk.

Het tweede model wordt gebruikt om de invloed van de indrukking van de staafuiteinden te onderzoeken. De rigid body's zijn hier vervangen door solid body's die dus kunnen vervormen.

Het is belangrijk om de vermazing van de proefstukken voldoende fijn te nemen. Anders kunnen spanningsconcentraties voorkomen die enkel afkomstig zijn van de te grove vermazing maar niet in het werkelijke proefstuk aanwezig zijn. Het kubusvormige proefstuk bevat 5508 kwadratische elementen en het cilindervormig proefstuk 6630 kwadratische elementen. Voor het cilindervormig proefstuk geeft het Advancing front algoritme voor de vermazing de beste resultaten (d.w.z. het minst ongewenste spanningsconcentraties).

Figuur 6.1 toont een beeld van de simulaties met het eerste model. De eerste figuur toont de doorsnede van een cilindervormig proefstuk. De tweede figuur toont de doorsnede langsheen een diagonaal van het kubusvormig proefstuk. De grijs gekleurde delen stellen stukken voor van de rigid body's waartussen het proefstuk geklemd is. De rigid body's zijn eigenlijk schalen zodat het gemakkelijk is om naar de contactvlakken van de proefstukken en de staven te kijken. De wrijvingscoëfficiënt is ingesteld op $\mu = 0.2$. De vervormingen zijn op ware schaal weergegeven. Bij beide proefstukgeometrieën zijn de spanningen het grootst aan de randen van de contactvlakken.



Figuur 6.1: Statisch samengedrukt cilindrisch proefstuk en kubusvormig proefstuk

De kleuring van figuur 6.1 is gebaseerd op de verhouding van de von Mises spanning en de gemiddelde von Mises spanning in het proefstuk. Om een idee te krijgen van de totale uniformiteit van de spanningen in het proefstuk wordt de volgende grootheid gedefinieerd:

$$Uniformiteit_{min/max} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \cdot 100$$
(6.1)

Met σ_{min} en σ_{max} wordt hier respectievelijk de minimale en maximale von Mises spanning in het proefstuk bedoeld. Het resultaat is een percentage. Het nadeel van deze definitie is dat alleen de extreme spanningswaarden met elkaar vergeleken worden. Tussenliggende spanningswaarden worden niet meegerekend. Stel bijvoorbeeld dat de spanning in een bepaald proefstuk zeer uniform is maar dat er alleen aan de proefstukrand een grote spanningspiek voorkomt. In dat geval geeft deze definitie een lage uniformiteit terwijl de uniformiteit eigenlijk toch goed is. Een andere mogelijke grootheid om de uniformiteit van de spanningen te onderzoeken, is gebaseerd op de spreiding op de von Mises spanning σ_v . De standaardafwijking wordt berekend in de centrale knoop van elk element van het proefstuk en dan gedeeld door de gemiddelde waarde, om een dimensieloos getal te verkrijgen. Een kleine standaardafwijking betekent een grote uniformiteit van de spanningen en is dus positief. Vandaar de volgende definitie

$$Uniformiteit_{spreiding} = \left(1 - \sqrt{\frac{n\sum(\sigma_v^2) - (\sum \sigma_v)^2}{n^2}} \frac{n}{\sum \sigma_v}\right) \cdot 100$$
(6.2)

Om de uniaxialiteit van de spanningen in de beschouwde proefstukken te evalueren wordt de volgende grootheid gedefinieerd:

$$\Delta = \frac{\sigma_v}{|\sigma_I| + |\sigma_{II}| + |\sigma_{III}|} \tag{6.3}$$

De spanning is volledig uni-axiaal als $\Delta = 1$, de spanning is alzijdig als $\Delta = 0$. De spanning σ_v is de von Mises vergelijkingsspanning en de waarden σ_I , σ_{II} en σ_{III} zijn de drie hoofdspanningen. Deze grootheid kan in elke knoop van het model berekend worden en is altijd kleiner dan of gelijk aan 1 (dankzij de absolute waarde tekens in de noemer). Het gemiddelde van alle Δ waarden voor elke knoop is een maat voor de uni-axialiteit van de spanningen in het proefstuk.

Opmerking: In de literatuur [12] wordt formule 6.3 gebruikt zonder de absolute waarde van de spanningen in de noemer te nemen. Het gevolg is dat de uniaxialiteit dan ook waarden groter dan 1 kan aannemen wanneer niet alle hoofdspanningen het zelfde teken hebben. In [12] wordt de uniaxialiteit echter alleen in het centrale element van het proefstuk berekend. In deze paragraaf wordt de uniaxiliteit daarentegen berekend over elk element van het proefstuk en daarvan wordt dan het gemiddelde genomen. Het gebruik van de definitie volgens 6.3 verzekert dat niet-axiale spanningen altijd aanleiding geven tot het verminderen van de uniaxialiteit.

De net gedefinieerde grootheden voor de uniformiteit en uniaxialiteit worden nu gebruikt om de invloed van de wrijving en de indrukking van de staafuiteinden te onderzoeken. Enerzijds wordt de wrijvingscoëfficiënt gevarieerd tussen $\mu = 0$ en $\mu = 0.20$ terwijl er geen indrukking van de staafuiteinden is. Anderzijds wordt de indrukking van de staafuiteinden gevarieerd door verschillende materiaalmodellen voor de staafuiteinden te gebruiken. De wrijvingscoëfficiënt blijft daarbij gelijk aan $\mu = 0.1$. De resultaten van de simulaties zijn samengevat in figuur 6.2.

• Uniaxialiteit i.f.v. de wrijving

Op de grafiek worden de uniaxiliteit in het centrale element van het proefstuk en de gemiddelde uniaxialiteit i.f.v. de wrijving voorgesteld (formule 6.3). Uit de figuur volgt dat:

1. de uniaxialiteit van de spanningen in het centrale element van het proefstuk is ongeveer 30% lager dan de gemiddelde uniaxialiteit.



Figuur 6.2: Invloed van de wrijving en indrukking van de staafuiteinden op de uniformiteit en uniaxialiteit van de spanning in een cilinder- en kubusvormig proefstuk

- 2. de geometrie (cilinder- of kubusvormig) heeft nagenoeg geen invloed op de uniaxialiteit
- 3. de wrijving heeft een grote invloed op de uniaxialiteit. Bij een wrijvingscoëfficiënt van $\mu = 0.1$ is de uniaxialiteit in het centrum gedaald tot slechts 0.6 en bij $\mu = 0.2$ tot 0.45.

• Uniformiteit i.f.v. de wrijving

De twee verschillende definities (formule 6.1 en 6.2) worden gebruikt voor het berekenen van de uniformiteit. De formule (formule 6.1) die gebruik maakt van de minimale en de maximale uniformiteit blijkt het meest gevoelig te zijn. De uniformiteit is sterk afhankelijk van de wrijvingscoëfficiënt maar er is weer weinig invloed van de proefstukgeometrie. Opmerking: De waarden voor de uniformiteit in figuur 6.2 bij $\mu = 0.2$, komen niet volledig overeen met die van figuur 6.1. De reden hiervoor is dat in figuur 6.2 de uniformiteit berekend wordt met de spanningen in de **centrale knopen** van elk element. In figuur 6.1 worden **alle** knopen gebruikt, dus ook die in de hoekpunten van de elementen aan de rand van het proefstuk, waar de spanningswaarden extreme waarden aannemen.

• Uniaxialiteit i.f.v. de indrukking

De invloed van de indrukking van de staafuiteinden op de uniaxialiteit is heel beperkt. Bij een kleine indrukking lijkt de uniaxialiteit, tegen de verwachtingen in, iets te stijgen. De uniaxialiteit van de spanningen in cilindervormige proefstukken is iets hoger dan in de kubusvormige proefstukken.

• Uniformiteit i.f.v. de indrukking

Ook op de uniformiteit heeft de indrukking van de staven zeer weinig invloed. Cilindervormige proefstukken zijn iets beter dan de kubusvormige variant.

Uit de simulaties zijn drie algemene besluiten af te leiden:

- 1. De wrijving heeft een grote invloed op de uniaxialiteit en de uniformiteit van de spanningen in een proefstuk. De wrijving moet daarom zo laag mogelijk gehouden worden, wat in overeenstemming is met [12].
- 2. De invloed van de indrukking van de staafuiteinden is daarentegen beperkt.
- 3. De uniaxialiteit en uniformiteit in cilinder- en kubusvormige proefstukken is nagenoeg gelijk. Cilindervormige proefstukken zijn slechts iets beter dan kubusvormige.

6.2 Full-scale model van de opstelling

6.2.1 Algemeen

De ingangsstaaf, uitgangsstaaf, beschermingsplaatjes, de aluminium stompjes en het proefstuk zijn in het model opgenomen. Verschillende versies van dit model worden gebruikt om

• inzicht te verkrijgen in de werking van een drukproef

- de invloed van de beschermingsplaatjes en de aluminiumstompjes op de golfvormen te onderzoeken
- het spannings- en rekverloop in het proefstuk te onderzoeken
- het spanningsverdeling in het proefstuk te analyseren

6.2.2 Overzicht van de uitgevoerde simulaties met full-scale modellen

Tabel 6.1 geeft een overzicht van de verschillende uitgevoerde simulaties. De simulaties verschillen in gebruikte geometrie (proefstuk, beschermingsplaatje), mesh, definitie van de interacties, gebruikte staafuiteinde, wrijvingscoëfficiënt... Alle proefstukken hebben een diameter van 5mm.

Model	Job	Beschrijving
Hopkinson	Hopkinson_druk	Elastische staven, zonder bescherming
Hopkinson volledig	volledige opstelling	Fijnere mesh in kritische gebieden en materiaalmodel voor CP-materiaal
	volledige opstelling 2	Plastische staven
SHPB volledig	SHPB volledig 3	proefstuk 5mm, afgeronde randen
SHPB_volledig_alustomp	SHPB_alustomp	Aluminiumstomp 450MPa
SHPB_volledig	SHPB_volledig	Idem vorige modellen maar betere mesh (Advancing front algoritme)
SHPB_volledig_alustomp	SHPB_alustomp	proefstuk 5mm
	SHPB_alustomp2	proefstuk 4mm
	SHPB_alustomp3	proefstuk 5mm, aangepaste output voor rekstrookjes
	SHPB_alustomp_4_000	proefstuk 5mm, $\mu = 0$
	SHPB_alustomp_4_005	proefstuk 5mm, $\mu = 0,05$
	SHPB_alustomp_4_010	proefstuk 5mm, $\mu = 0, 10$
	SHPB_alustomp_4_020	proefstuk 5mm, $\mu = 0, 20$
SHPB_st	SHPB_st_005	proefstuk 5mm, staal i.p.v. TRIP, $\mu = 0,05$
	SHPB_st_010	5mm, staal i.p.v. TRIP, $\mu = 0, 10$
SHPB alu 4mm	SHPB alu pr 4 010	proefstuk 4mm, $\mu = 0, 10$
SHPB_alu_6mm	SHPB_alu_pr_6_010	proefstuk 6mm, $\mu = 0, 10$
$SHPB_alu_7mm$	SHPB_alu_pr_7_010	proefstuk 7mm, $\mu = 0, 10$
CP_Alustomp	CP_Alustomp	Zonder proefstuk -> invloed aluminiumstompjes en beschermingsplaatjes
SHPB_volledig_elastisch	SHPB_el	Elastische staven en beschermingsplaatje + $\mu = 0$

Tabel 6.1: Overzicht van de verschillende simulaties

Alle modellen hebben gemeenschappelijk dat ze worden uitgevoerd in ABAQUS/EXPLICIT. In tegenstelling tot ABAQUS/STANDARD kunnen hiermee golfverschijnselen gesimuleerd worden.

Wegens symmetrie van de opstelling, dient slechts 1/4 deel ervan gemodelleerd te worden. Dit verkort de rekentijd aanzienlijk. Alhoewel de rekentijd nog verder zou kunnen beperkt worden door gebruik te maken van de axiaal-symmetrische geometrie wordt dit niet gedaan omwille van de volgende redenen:

- Intuïtieve interpretatie van een axiaal-symmetrisch model is minder evident. Visueel is een axiaal-symmetrisch model ook een stuk minder "aantrekkelijk".
- Met een axiaal-symmetrisch model kan de invloed van buigingsgolven en slechte uitlijning niet gesimuleerd worden.
- Proefstukken zonder axiaal-symmetrie (vb. kubusvormig) kunnen met het huidige model bestudeerd worden.

In de volgende paragraaf wordt dieper ingegaan op een van de modellen.

6.2.3 Volledige opstelling met Al stompjes en beschermingsplaatjes

Het model

De kenmerken van dit model worden hieronder opgelijst.

- File: Hopkinson_4 Model: SHPB_volledig_alustomp Job: SHPB_alustomp3
- Geometrie

Dit model bestaat uit 5 onderdelen: ingangsstaaf en uitgangsstaaf met aluminium stompjes, proefstuk en 2 beschermingsplaatjes. De onderdelen hebben dezelfde afmetingen als bij de werkelijke opstelling. Wegens symmetrie volstaat het om slechts 1/4 te modelleren.

- Diameter staven: $25\,\mathrm{mm}$
- Lengte ingangsstaaf: 6000 mm
- Lengte uitgangsstaaf: 3000 mm
- Lengte en diameter proefstuk: 5 mm
- Diameter en dikte beschermingsplaatjes: $15\,\mathrm{mm},\,1.8\,\mathrm{mm}$
- Lengte aluminiumstompjes: 25 mm

• Materiaaleigenschappen

Tabel 6.2 toont de gebruikte eigenschappen van de materialen. In ABAQUS worden grootheden ingegeven zonder de eenheid te vermelden. Daarom is het heel erg belangrijk dat de waarden consistente eenheden hebben. Dit verklaart de nogal vreemde eenheid voor de massadichtheid. Voor het TRIP-staal wordt een Johnson-Cook materiaalmodel gebruikt (zie §1.5). Thermische effecten worden niet meegerekend. Dit is een belangrijke beperking want bij hoge vervormingssnelheden heeft de warmtegeneratie eigenlijk een niet te verwaarlozen invloed. Voor het doel van deze simulaties is het gebruik van een volledig correct materiaalmodel echter minder van belang.

Voor de andere materialen wordt de spanning-rek curve "manueel" ingegeven. Voor aluminium gebeurt dit door de overeenkomstige spanning bij twee (plastische) rekken in te voeren. Het CP1000 materiaal blijft elastisch tot aan de vloeigrens, daana wordt voor het plastisch gedeelte een spanning-rek kromme bij $\dot{\epsilon} = 500 \, s^{-1}$ gebruikt (tabel 6.3).

Materiaal	Dichtheid $\left[\frac{10^3 kg}{mm^3}\right]$	E [MPa]	Poisson	Plastisch gedrag
Al 5083	$2.66E^{-9}$	71700	0.33	$0/145\mathrm{MPa}$ - $0.1/165\mathrm{MPa}$
Al 7075	$2.81E^{-9}$	72500	0.33	$0/480\mathrm{MPa}$ - $0.1/540\mathrm{MPa}$
CP1000	$7.8E^{-9}$	210000	0.3	σ/ϵ -curve bij $\dot{\epsilon} = 500$
TRIP800	$7.8E^{-9}$	210000	0.3	Johnson-Cook –> § 1.5

Tabel 6.2: Materiaaleigenschappen

Plastische rek [-]	0	0.0027	0.0062	0.0100	0.0159	0.0275	0.037	0.048	0.063	0.083	0.10
Ware spanning [MPa]	799	867	954	994	1045	1100	1180	1194	1230	1238	1240

Tabel 6.3: Trek/rek-curve CP1000

• Step

Er worden 3 stappen doorlopen (tabel 6.4). Voor de propagatie van de ingaande golf in de ingangsstaaf en de belasting van het proefstuk worden twee aparte stappen gebruikt. Het voordeel daarvan is dat in dit geval een verschillende output tijdens de propagatiefase en belastingsfase kan gedefinieerd worden. Omdat de vervormingen groot zijn, wordt de berekening niet-lineair en moet de optie *Nlgeom* aangevinkt worden.

Step	Step Time [s]	Beschrijving		
initial	N/A	Symmetrie en interacties worden gedefinieerd		
golf	$0.00118\mathrm{s}$	Propagatie van ϵ_i		
belasting	$0.0022\mathrm{s}$	Belasting van het proefstuk		

Tabel 6.4: Step-instellingen

• Interaction

- Beschermingsplaatjes Staven: Tie interaction
- Proefstuk Beschermingsplaatjes

Type: Surface-to-surface contact (Explicit) Step: Initial Master surface: Beschermingsplaatje Slave surface: Proefstuk (Het oppervlak met de fijnste vermazing is de slave) Weighting factor: 1 (Dit zorgt ervoor dat het eerste oppervlak de master is) Sliding formulation: finite sliding Mechanical constraint formulation: Kinematic contact method Contact interaction property: wrijving005 Friction formulation: Penalty Friction Coeff: 0.05 Normal Behavior: Pressure-overclosure = Hard contact

Allow separation after contact

• Mesh

Tabel 6.5 geeft een overzicht van de gebruikte meshes. Het gebruik van het Advancing front algoritme zorgt voor een betere verdeling van de hexagonale elementen. Het gevolg is een meer uniforme spanningsverdeling. Er worden alleen lineaire elementen gebruikt. Op figuur 6.3 wordt de mesh getoond. De vermazing van de hopkinsonstaven is fijner in de buurt van het proefstuk dan in de rest van de staven omdat de spanningsgradiënt daar het grootst is.

Onderdeel	Element Shape	Technique	Algorithm	Aantal elementen
Proefstuk	Hex	Sweep	Advancing front	1105
Beschermingsplaatje	Hex	Structured	-	660
Ingangsstaaf	Hex	Sweep	Advancing front	7291
Stompje	Tet	Free	Default algorithm	
Uitgangsstaaf	Hex	Sweep	Advancing frong	5325
Stompje	Tet	Free	Default algorithm	

Tabel 6.5: Mesh



Figuur 6.3: Mesh

• Output requests

Tabel 6.6 toont de output requests. Namen die beginnen met F en H stellen respectievelijk *field output* en *history output* voor. De "sets" rekstrookje1 en rekstrookje2 verzamelen een aantal knopen die zich bevinden op de plaats van de rekstrookjes. De kolom "Stap" geeft de step waar de output wordt gestart. De kolom "Frequentie" bevat het aantal datapunten dat wordt weggeschreven tijdens 1 step.

Naam	Stap	Domein	Output	Frequentie
F-Output-1	golf	volledig model	spanningen, rekken en PEEQ	20
H-Output-1	golf	volledig model	vervormingsenergie	50
H-Rekstrookje1	golf	set: rekstrookje1	spanningen	300
H-Rekstrookje2	golf	set: rekstrookje2	spanningen	300

Tabel 6.6:Output requests

• Load

Op het uiteinde van de ingangsstaaf wordt een uniforme drukbelasting aangelegd. De drukpuls heeft een amplitude van 80 MPa en een verloop zoals in figuur 6.4 voorgesteld. De gekozen stijgtijd van $10E^{-5}$ s is in overeenstemming met de experimentele
waarnemingen.



Figuur 6.4: Verloop van de aangelegde drukbelasting

Simulatieresultaten

Figuur 6.5 toont een aantal beelden van de gesimuleerde von Mises spanningen op verschillende tijdstappen. De hoge spanning van het proefstuk wordt over een zeer korte afstand in de hopkinsonstaven afgebouwd. De spanning is reeds gedaald tot onder de 100 MPa op een afstand van slechts 20 mm.

Door de lage wrijvingscoëfficient ($\mu = 0.05$) is er weinig tonvorming van het proefstuk m.a.w. de radiale uitzetting is over de volledige lengte van het proefstuk ongeveer constant.

Figuur 6.6 toont de maximale (d.i. langs de symmetrie-as) indrukking van twee staafuiteinden gedurende een proef. De indrukking is het verschil tussen de axiale verplaatsing van het oppervlak van het beschermingsplaatje in het midden en aan de rand ervan. Tijdens de proef is de indrukking de som van de elastische en plastische vervorming van het staafuiteinde, deze is maximaal $0.11 \, mm$ (één staafuiteinde). Na de proef blijft enkel de plastische indrukking over, deze bedraagt ongeveer $0.032 \, mm$.

Op deze figuur is eveneens de samendrukking van het proefstuk voorgesteld. De indrukking van de staafuiteinden is zeker niet verwaarloosbaar t.o.v. de inkorting van het proefstuk.

In hoofdstuk 5 over de staafuiteinden wordt de indrukking berekend met een ander model (§6.3). Het model dat daar gebruikt wordt is beperkt tot één staafuiteinde. De berekende indrukking is voor beide modellen zeer gelijkaardig (zie fig. 5.4).

Op het moment van maximale belasting wordt de spanningsverdeling in het proefstuk gekenmerkt door: uniformiteit_{spreiding} = 97.2% en uniaxialiteit = 0.91. Deze grootheden zijn berekend zoals beschreven in §6.1. De waarde voor de uniaxialiteit blijkt echter niet goed overeen te komen met de uniaxialiteit in een statisch belast proefstuk bij een wrijvingscoëfficiënt van $\mu = 0.05$. In het statisch belaste geval is de uniaxialiteit = 0.87 en dus iets slechter dan dynamisch. De uniformiteit in het statisch geval is 97.5%, wat wel goed overeen komt.



Figuur 6.5: Simulatiefilm



Figuur 6.6: Indrukking van twee staafuiteinden en het proefstuk i.f.v. de tijd

Echte conclusies kunnen hier echter niet uit gevormd worden omdat de proefstukafmetingen en de rekken niet gelijk zijn.

Figuur 6.7 toont de (reeds verschoven) signalen die rekstrookjes op de ingangs- en uitgangsstaaf zouden registreren. Het valt op dat deze golven er uit zien als de golven die typisch te verwachten zijn bij een elastisch proefstuk [8]. Na een initiële hoge vervormingingssnelheid, valt de vervormingssnelheid terug op nul, immers wordt de vervormingssnelheid bepaald door de gereflecteerde golf (zie hoofdstuk 1). Dit kan verklaard worden door het materiaalmodel van het TRIP-staal dat zeer veel rekversteviging vertoont. Daarbij komt nog dat door de radiale uitzetting van het proefstuk, de oppervlakte van de doorsnede toeneemt zodat de ware spanningen in het proefstuk lager komen te liggen. Dit probleem komt uiteraard niet voor bij trekproeven. Als gevolg hiervan gebeurt alle plastische vervorming in het begin van de golfdoorgang. Op het moment dat de spanning die nodig is voor plastische vervorming stijgt tot boven de spanning in het proefstuk, stopt de vervorming van het proefstuk. Er zijn twee mogelijkheden om dit probleem op te lossen:

- Proefstukken met kleinere afmetingen gebruiken. Technisch is dit moeilijk omdat de proefstukken uit op elkaar verlijmde plaatjes bestaan. Daarnaast wordt ook het negatieve effect van een slechte uitlijning van het proefstuk t.o.v. de staven, versterkt.
- De amplitude van de ingaande spanningsgolf verhogen. Dit kan door een hogere impactsnelheid en dus hogere luchtdruk. Bij de huidige opstelling echter is de maximale druk beperkt om diverse redenen: Hopkinsonstaven uit aluminium, laag drukbereik van de compressor en beperkte maximale toelaatbare druk van de kleppen van de versneller.



Figuur 6.7: Verschoven signalen op de ingangs- en uitgangsstaaf

Door de resultaten van de simulatie op dezelfde manier te verwerken als de resultaten van een experiment kan nagegaan worden of het mogelijk is om uit de geregistreerde signalen het materiaalgedrag van het beproefde materiaal terug te vinden. Verwerking van de signalen van figuur 6.7 volgens de "klassieke methode" (hoofdstuk 1), levert de trek-rek curve van figuur 6.8 (blauwe curve). In deze grafiek wordt de berekende trek-rek curve vergeleken met het Johnson-Cook materiaalmodel dat gebruikt wordt voor de modellering van het TRIP-staal van het proefstuk. De Johnson-Cook curve wordt uitgerekend bij de vervormingssnelheid en de rek die volgen uit de signalen in de staven. Alle rekken worden omgerekend naar ware plastische rek en de spanningen worden omgerekend naar ware spanningen.

Het valt op dat de trek-rek curve die volgt uit de rekmeting op de staven een stuk hoger ligt dan volgens het eigenlijke Johnson-Cook materiaalgedrag zou verwacht worden. Dit zou kunnen verklaard worden door de niet-uniaxialiteit van de spanningen in het proefstuk. Hierdoor is de von Mises spanning in het proefstuk lager dan de axiale spanningscomponent S33. De plastische vervorming wordt bepaald door de von Mises vergelijkingsspanning terwijl de spanning die door de rekmeting op de staven afgeleid wordt, gelijk is aan de axiale spanningscomponent. Er wordt daarom dus een hogere spanning berekend dan de spanning die voor de werkelijke plastische vervorming van het proefstuk zorgt. Er zijn op figuur 6.8 eveneens twee curven die de spanningstoestand in het centrale element van het proefstuk beschrijven: de rode curve toont de axiale spanningscomponent S33, terwijl de paarse curve de von Mises spanning voorstelt. De von Mises spanning is inderdaad iets lager dan de axiale spanningscomponent, wat de voorgaande redenering ondersteunt.

De oranje curve op figuur 6.8 toont nogmaals het verloop van de vervormingssnelheid. Op het moment dat de vloeigrens bereikt wordt, is de vervormingssnelheid slechts ongeveer $300 s^{-1}$. Daarna neemt de vervormingssnelheid snel toe, maar het is van korte duur. Na 20% plastische vervorming is de snelheid reeds tot $100 s^{-1}$ gedaald. Met de huidige opstelling kunnen dus geen grote vervormingen gerealiseerd worden.

In het eindige elementen model is het temperatuur-effect niet in rekening gebracht. Dit verklaart de veel hogere spanningswaarden dan die in de literatuur [13] voorkomen.

Om de verklaring voor het niet gelijk zijn van de berekende trek-rek curve aan de vooropgestelde trek-rek curve verder te onderzoeken, worden in de volgende paragraaf de resultaten van een extra simulatie beschreven.

6.2.4 Hopkinsonstaven en beschermingsplaatje elastisch en $\mu = 0$

Hetzelfde model als in de vorige paragraaf wordt hernomen met als verschil dat de staven en het beschermingsplaatje nu elastisch zijn i.p.v. elastisch-plastisch en de wrijvingscoëfficiënt is nu $\mu = 0$. Hierdoor zijn de spanningen in het proefstuk meer uniaxiaal. De trek-rek curve wordt opnieuw berekend en vergeleken met het Johnson-Cook materiaalmodel. Figuur 6.9 toont de resultaten.



Figuur 6.8: Vergelijking van de berekende trek-rek curve met het gebruikte materiaalmodel voor TRIP-staal



Figuur 6.9: Vergelijking van de berekende trek-rek curve met het gebruikte materiaalmodel voor TRIP-staal; elastische staven en beschermingsplaatje en wrijving $\mu = 0$

Tegen de verwachtingen in ligt de berekende trek-rek curve opnieuw boven de opgelegde Johnson-Cook curve. Nochtans zijn de von Mises spanning en de axiale spanningscomponent S33 nu wel aan elkaar gelijk. De reden voor het niet samenvallen van de twee trek-rek curven blijft dus onbekend. Er moet wel opgemerkt worden dat de nauwkeurigheid van de berekende curven eerder laag is doordat gemakkelijk fouten kunnen gemaakt worden bij het verschuiven van de signalen naar het proefstuk toe.

6.3 Model van het staafuiteinde

Dit model wordt in hoofdstuk 5 gebruikt bij het optimaliseren van de staafuiteinden. Verschillende staafuiteinde geometrieën worden daar onderzocht. De resultaten zelf zijn te vinden in dit hoofdstuk. In het model wordt slechts één staafuiteinde gemodelleerd. Het proefstuk zit geklemd tussen dit staafuiteinde en een rigid body. Het proefstuk wordt belast door de rigid body te verplaatsen met een constante snelheid. De verplaatsingsnelheid is 5000 mm/s, wat overeen komt met een vervormingssnelheid van $\dot{\epsilon} = 1000 \, s^{-1}$. Het grote voordeel van dit model t.o.v. de full-scale modellen is de kortere berekeningstijd (±45 min. t.o.v. ±2.5 uur).

6.4 Spanningsverdeling in een proefstuk

6.4.1 Spanningscomponenten in een proefstuk

Ter verduidelijking van de verschillende spanningscomponenten in een proefstuk, zijn deze op de schematische figuur 6.10 aangeduid. Het schema toont drie geprojecteerde aanzichten van een proefstuk. Naast elk aanzicht staat een assenstelsel om de oriëntatie te verduidelijken. Om de ligging van de lijmlagen duidelijk weer te geven, wordt het rechterzijvlak van de proefstukken ook getoond. De symmetrievlakken en de symmetrie-as zijn aangebracht in oranje gekleurde stippellijnen. Het paars gekleurde gedeelte stelt 1/8-deel van een proefstuk voor. Dit deel van een proefstuk wordt in de 3D-figuren die verder volgen veel gebruikt om de spanningsverdeling te visualiseren. Figuur 6.10 wordt nu verder besproken.

13-vlak: Dit is een langse doorsnede in het vlak van de lijmlagen, die de centrale as van het proefstuk bevat. Op de randen van het vlakje dat getekend is als een rechthoek werken de spanningscomponenten S11, S33, S13 en S31. S11 en S33 zijn normaalspanningen volgens respectievelijk de 1- en 3-richting. Positieve waarden voor deze spanningen zijn trekspanningen en negatieve waarden zijn drukspanningen. S11 komt in deze doorsnede overeen met de radiale spanning terwijl S22 overeen komt met de omtreksspanning. S22 staat loodrecht op het vlak van het blad en is hier niet getekend. S13 en S31 zijn schuifspanningen en zijn aan elkaar gelijk. Deze spanningen zijn gelijk aan nul langsheen het symmetrievlak van het proefstuk. Enerzijds zijn de spanningen S13 die aangrijpen aan de onderkant en aan de bovenkant van een klein rechthoekje tegensteld wegens het krachtenevenwicht. Anderzijds zijn deze krachten ook aan elkaar gelijk wegens de



Figuur 6.10: Spanningscomponenten in een proefstuk

symmetrie. S13 en S31 moeten daar dus nul zijn. Dit kan als controle voor de simulatieresultaten gebruikt worden. Op de andere plaatsen zijn de schuifspanningen S13 niet nul, maar ze betekenen geen belasting voor de lijmlagen.

- 23-vlak: Dit is een langse doorsnede loodrecht op het vlak van de lijmlagen, die de centrale as van het proefstuk bevat. Op de randen van de getekende rechthoek werken de normaalspanningen S22 en S33 en de schuifspanningen S23 en S32. Doordat deze doorsnede de centrale as van het proefstuk bevat, komt de spanning S22 overeen met de radiale spanning terwijl S11 overeenkomt met de omtreksspanning. S11 staat loodrecht op deze doorsnede. Voor het volledige proefstuk geldt dat de spanning S22 de lijmlagen belast. Omwille van de symmetrie moet de schuifspanningen S23 (en S32 gelijk zijn aan nul langsheen de symmetrievlakken. De schuifspanningen S23/S32 (en S13/S31) ontstaan doordat de vervorming van het proefstuk niet gelijk is op elke afstand van het centrum. Dit wordt veroorzaakt door de wrijving in de eindvlakken en de indrukking van de staafuiteinden. Het gevolg is dat de schuifspanningen links en rechts van het dwarse symmetrievlak gelijk zijn maar een tegengesteld teken hebben. Deze schuifspanningen belasten de lijmlagen.
- 12-vlak: Dit is een dwarse doorsnede ter hoogte van het symmetrievlak van het proefstuk. Op de randen van de getekende rechthoek werken de normaalspanningen S11 en S22 en de schuifspanningen S12 en S21. S11 en S22 moeten langs de centrale as aan elkaar gelijk zijn. Langsheen de symmetrievlakken moeten de schuifspanningen opnieuw nul zijn.

6.4.2 Gesimuleerde spanningsverdeling

3D - afbeeldingen

Al de figuren in deze paragraaf zijn gegenereerd met het model Hopkinson_4. De figuren die volgen (fig. 6.11 en 6.12) tonen het spanningsbeeld voor verschillende componenten. De proefstukken hebben een lengte van $L_p = 5 mm$ en de wrijvingscoëfficiënt is $\mu = 0.1$

• a. **S Mises - dwars**: De von Mises vergelijkingsspanning varieert tussen de 1300 MPa en 1800 MPa over het proefstuk. De grootste spanningen zijn te vinden aan de randen en de laagste spanningen zijn te vinden in het midden van de contactvlakken. Ondanks de grote spreiding op de spanningen zijn de spanningen in het centrale gedeelte van het proefstuk redelijk homogeen verdeeld.

Op de figuur zijn eveneens twee paden aangeduid: een in de langsrichting en een in de dwarsrichting. Deze worden later gebruikt.

- b. S11 dwars: Zowel trekspanningen als drukspanningen komen voor. De positieve (trekspanningen) komen vooral voor aan de buitenkant van het proefstuk en de drukspanningen aan de binnenkant.
- c. S22 dwars: Zelfde spanningsbeeld als S11 maar dan gespiegeld. De grootste trekspanningen komen voor in het midden van het proefstuk aan de omtrek. Dit is de spanning die de lijmlagen belast. Aan de "onderkant" van het proefstuk is S22 gelijk aan nul. Dat is logisch want de spanning werkt daar volgens de buitennormaal van het proefstuk.
- d. S33 dwars: De laagste spanningen komen voor aan het oppervlak in het midden van het proefstuk. De hoogste spanningen komen voor aan de randen en in het centrum. (Let op: lage spanning is rood en hoge spanning is blauw). De spanningen moeten theoretisch axiaalsymmetrisch zijn. Op deze figuur zijn ze niet perfect axiaalsymmetrisch en dat komt waarschijnlijk door de manier waarop Abaqus de elementen inkleurt. Een fijnere mesh zou hier een verbetering zijn.
- e. S33 langs: De langse doorsnede is genomen op 1.25 mm onder het symmetrievlak. In het grootste gedeelte van het proefstuk zijn de spanningen redelijk homogeen. Alleen aan de randen en het oppervlak zijn de spanningen ofwel hoger of lager.
- f. S12 dwars: De schuifspanning S12 is in het 13-langsvlak gelijk aan nul, zoals te verwachten is uit de theoretische beschouwingen. Elders zijn de schuifspanningen beperkt tot zo'n ±100MPa, wat evenwel hoger is dan de afschuifsterkte van de lijmlaag.
- g. S12 langs: Symmetrie t.o.v. het dwarse symmetrievlak . De spanning ligt tussen de -100 MPa en 100 MPa.
- h. S13 dwars: De schuifspanning S13 is nul in het dwarse 12-symmetrievlak, zoals te verwachten is uit de theoretische beschouwingen. De schuifspanningen S13 hebben dezelfde grootte-orde als de S12.



Figuur 6.11: Spanningsverdeling in een proefstuk met lengte $L_p = 5 mm$ en wrijving $\mu = 0.1$.



Figuur 6.12: Vervolg spanningsverdeling in een proefstuk met lengte $L_p = 5 mm$ en wrijving $\mu = 0.1$.

- i. S13 langs De langse doorsnede is genomen op 1.25 mm onder het symmetrievlak. Zoals voorspeld, zijn de spanningen langs beide kanten van het dwarse symmetrievlak gelijk maar hebben ze een tegengesteld teken.
- j. S23 dwars: Zoals te verwachten is, is S23 nul in het dwarse 12-symmetrievlak. In het langse 13-symmetrievlak zou S23 echter ook nul moeten zijn, maar dit is in de simulatie niet het geval. De reden hiervoor is waarschijnlijk te vinden in de te grove mesh.
- k. S23 langs: S23 ligt in dezelfde grootte-orde als de andere schuifspanningscomponenten. Het teken van S23 is tegengesteld tussen de linker en rechterkant van het dwarse 12-symmetrievlak.

Figuur 6.13 toont de equivalente plastische vervorming (PEEQ) in een proefstuk. De verdeling van de PEEQ komt overeen met de verdeling van de von Mises spanning.



Figuur 6.13: PEEQ in een proefstuk met lengte $L_p = 5 mm$ en wrijving $\mu = 0.1$

Spanningsverloop in de dwarsrichting en in de langsrichting

Langs twee paden doorheen het proefstuk wordt de spanning in meer detail onderzocht. Op figuur 6.11.a worden deze twee paden voorgesteld door de pijlen met als aanduiding: langspad en dwarspad.

Op het linkse deel van figuur 6.14 is het spanningsverloop volgens een dwarspad voorgesteld. Daarnaast is er ook een curve voor de PEEQ en voor de uniaxialiteit. Voor de definitie van de uniaxialiteit Δ wordt hier een licht gewijzigde formule toegepast (formule 6.3 -> 6.4): voor de spanningen in de noemer wordt nu geen absolute waarde meer gebruikt. Met deze nieuwe definitie kan de uniaxialiteit ook waarden aannemen die groter zijn dan 1, wat het geval is wanneer niet alle drie de spanningscomponenten hetzelfde teken hebben. Met deze formule bevat Δ dus meer informatie over de spanningstoestand. Een ander praktisch voordeel aan de nieuwe formule is dat nu in plaats van de hoofdspanningen ook de spanningen volgens de 11-, 22- en 33- richtingen kunnen ingevuld worden.

$$\Delta = \left| \frac{\sigma_v}{\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}} \right| \tag{6.4}$$

De figuur kan opgedeeld worden in twee segmenten: $0 mm \le x \le 1.6 mm$ en $1.6 mm \le x \le 2.5 mm$. In het eerste segment zijn de spanningen S11 en S22 negatief en hebben hetzelfde teken als S33. De von Mises spanning is daarom kleiner dan (de absolute waarde van) S33. Omdat alle spanningen hetzelfde negatieve teken hebben, is de uniaxialiteit kleiner dan 1. In het tweede segment daarentegen, zijn de spanningen S11 en S22 positief. De von Mises spanning is dan groter dan S33 en de uniaxialiteit is groter dan 1. Opmerkelijk is ook dat voor x = 1.6 mm alle curven een buigpunt vertonen. Verder is de PEEQ volledig gelijklopend met de von Mises spanning.

Het rechtse deel van figuur 6.14 toont het spanningsverloop volgens het langspad. Alle curven zijn symmetrisch t.o.v. het midden z = 2.5 mm. Ter hoogte van de eindvlakken (x = 0 mm en x = 5 mm) is de uniaxialiteit het laagst omdat S11 en S22 daar het hoogst zijn (in absolute waarde) terwijl S33 daar het laagst is. De plastische vervorming (PEEQ) is in deze zones dan ook het laagst. S11 en S22, die ontstaan door de wrijving in de eindvlakken, verhinderen de vervorming van het materiaal.

In theorie moeten S11 en S22 volgens het langspad aan elkaar gelijk zijn. Dat dit hier niet perfect zo is, kan verklaard worden door de iets te grove vermazing.

Uniaxialiteit van de spanningen in een proefstuk

Formule 6.4 voor het berekenen van de uni-axialiteit, kan toegepast worden op alle elementen van een proefstuk. De grafische voorstelling van de uni-axialiteit over het volledige proefstuk geeft extra inzicht over de spanningsverdeling. Voor het uitvoeren van deze bewerking wordt het post-processing programma TECPLOT360 gebruikt. Figuren 6.15 en 6.16 tonen de resultaten. Slechts 1/4-deel van een proefstuk is weergegeven.

Alleen in de geel gekleurde zone zijn de spanningen uni-axiaal. De plaats ervan komt overeen met figuur 6.14. In de oranje-rood gekleurde zone is de uni-axialiteit groter dan 1 wat wil zeggen dat het teken van de spanningen S11 en S22 verschilt van dat van S33. S11 en S22 zijn dus trekspanningen, terwijl S33 (altijd) een drukspanning is. In de rest van het proefstuk zijn S11 en S22 drukspanningen, waardoor de plastische vervorming bij een bepaalde axiale spanning S33 kleiner zijn dan in het perfect uni-axiale geval met dezelfde S33. De uni-axialiteit is hier kleiner dan 1.

In de volgende paragrafen wordt de invloed van de wrijving en de proefstuklengte bestudeerd. Het onderzoek heeft vooral als bedoeling om de belasting van de lijmlaag te beperken om zo het loskomen van de plaatjes waaruit de proefstukken bestaan te voorkomen. Daarom worden niet alle spanningscomponenten verder bekeken maar gaat de aandacht vooral naar de component S22 in de dwarse doorsnede. Uit experimenten (zie hoofdstuk 7) blijkt namelijk dat in deze



Figuur 6.14: Spanningsverloop in de dwarsrichting en in de langsrichting



Figuur 6.15: Uni-axialiteit in een proefstuk



Figuur 6.16: Uni-axialiteit in een aantal doorsneden van het proefstuk

zone de lijmverbinding het eerst breekt. Volgens de simulaties is de spanningscomponent S22 hier dominant.

6.4.3 Invloed van de wrijving op de spanningsverdeling

Identieke simulaties als in de vorige paragraaf maar dan met variërende wrijvingscoëfficiënt geven een idee van de invloed van de wrijving op de spanningsverdeling. Figuur 6.17 geeft enkele 3D beelden van de spanningsverdeling bij wrijvingscoëfficiënten van $\mu = 0$, $\mu = 0.1$ en $\mu = 0.2$. De niet-axiale spanningen in het wrijvingsloos geval ontstaan door indrukking van de staafuiteinden. Het is duidelijk te zien dat een hogere wrijvingskracht ook hogere niet-axiale spanningscomponenten met zich mee brengt. De rood en geel gekleurde zones stellen plaatsen voor waar de spanning de 25 MPa limiet van de lijm overtreft. Hoe kleiner deze zone is, hoe beter. In het wrijvingsloze geval blijft de spanning overal binnen het sterktebereik van de lijm (zie bijlage E voor meer eigenschappen van de lijm). De spanning S22 blijft zelfs in het grootste deel van het proefstuk negatief (druk).

Figuur 6.18 toont verschillende parameters langsheen een dwarspad van het proefstuk voor verschillende wrijvingscoëfficiënten.

- Invloed wrijving op S22. Hier blijkt weer dat een lage wrijving, de normaalspanning S22 op de lijmlaag beperkt. Anderzijds is de invloed van de indrukking van de staafuiteinden ook niet verwaarloosbaar. De normaalspanning S22 bij $\mu = 0$ is over het volledige dwarspad negatief (druk). De indrukking van de staafuiteinden heeft dus eigenlijk een positieve invloed op de belasting van de lijmlaag. De indrukking van de staafuiteinden is dus vanuit praktisch oogpunt niet echt een nadeel terwijl het toch theoretisch niet goed is omwille van de niet-axiale spanningen. De curven vertonen nog een paar merkwaardigheden. De curven voor $\mu = 0$, $\mu = 0.05$ en $\mu = 0.10$ gaan allen door hetzelfde punt, terwijl de curve voor $\mu = 0.20$ een totaal ander verloop vertoont. Dit wordt hier niet verder onderzocht.
- Invloed wrijving op S Mises en PEEQ Het is duidelijk dat bij een lage wrijvingscoëfficiënt de von Mises spanning en de equivalente plastische vervorming (PEEQ) gelijkmatiger zijn. Opnieuw is het merkwaardig dat alle curven in een zelfde punt snijden $(x = \pm 1.8 \, mm)$. Op deze omtrek is de von Mises spanning altijd gelijk aan 1600 MPa, ongeacht de wrijvingscoëfficiënt. Bovendien lijkt het erop dat wrijving en indrukking van de staafuiteinden een tegengestelde invloed hebben. Wrijving veroorzaakt een hoge spanning in het centrum van het proefstuk en een lage spanning aan het proefstukoppervlak (curve voor $\mu = 0.20$). Terwijl indrukking van de staafuiteinden zorgt voor een lage spanning in het centrum van het proefstuk en een hoge spanning aan het proefstukoppervlak. Anderzijds is het zo dat door de indrukking, de wrijvingskrachten vergroten zodat deze twee fenomenen elkaar wederzijds beïnvloeden.
- Invloed wrijving op gereflecteerde golf. De gereflecteerde golf wordt weinig beïnvloed door de wrijving.

• Invloed wrijving op doorgelaten golf. De doorgelaten golf wordt eveneens weinig beïnvloed door de wrijving.



Figuur 6.17: S22 bij verschillende wrijvingscoëfficiënten voor een proefstuk met lengte L=5mm

6.4.4 Invloed van de proefstuklengte op de spanningsverdeling

Simulaties bij proefstukken met een verschillende lengte tonen de invloed van de lengte op de spanningsverdeling. Op figuur 6.19 is te zien dat in een korter proefstuk de normaalspanning op de lijmlaag lager is dan in een lang proefstuk. Ook de schuifspanning in het proefstuk van 4mm is iets lager in vergelijking met het proefstuk van 5 mm.

Figuur 6.20 toont de invloed van de proefstuklengte op verschillende parameters langsheen een dwarspad.

- Invloed lengte op S22. Dit illustreert nogmaals het voordeel van korte proefstukken: de normaalspanning S22 is in korte proefstukken duidelijk lager dan in lange proefstukken.
- Invloed lengte op S Mises en PEEQ. Deze grafiek toont een zeer onverwacht resultaat. Zowel de von Mises spanning en de vervorming PEEQ zijn in kortere proefstukken meer gelijkmatig over de doorsnede! Door de grotere invloed van randeffecten (wrijving) bij kortere proefstukken, wordt net het tegenovergestelde verwacht.

De algemene conclusie is dus dat ten eerste de wrijving zoveel mogelijk moet beperkt worden, ten tweede de indrukking van de staafuiteinden minder belangrijk is en ten derde kortere proefstukken mogen gebruikt worden.

Algemeen kan besloten worden dat een aanpassing van de vooropgestelde proefstukgeometrie (h=d=5 mm) wenselijk is.



Figuur 6.18: S22, von Mises spanning, PEEQ, gereflecteerde golf en doorgelaten golf langsheen een doorsnede van een proefstuk van 5 mm voor verschillende wrijvingscoëfficiënten.



Figuur 6.19: Spanningsverdeling bij verschillende proefstuklengten en $\mu=0.1$



Figuur 6.20: S22, von Mises spanning en PEEQ bij verschillende proefstuklengten

6.4.5 Invloed van het materiaal op de spanningsverdeling

In alle voorgaande simulaties wordt het beproefde materiaal gemodelleerd met het Johnson-Cook model met materiaalconstanten geldig voor TRIP800-staal (zie §1.5). Naast TRIP-staal worden ook experimenten en simulaties uitgevoerd op een ander staal. Het precieze materiaalgedrag van dit staal is echter onbekend. In Abaqus wordt het materiaal gemodelleerd zoals een staal met een vloeigrens van 550 MPa dat bij plastische vervorming weinig versteviging vertoont. Dit model komt uiteraard niet exact overeen met het materiaal dat in de experimenten gebruikt wordt, maar dat is minder belangrijk. De bedoeling van deze simulatie is immers enkel het vergelijken van de normaalspanningen op de lijmlaag in TRIP-staal en in een staal met een verglijkbare vloeispanning maar veel minder uitgesproken versteviging in het plastisch gebied.

Figuur 6.21 vergelijkt de normaalspanning S22 en de PEEQ ten opzichte van elkaar, langs een dwarse doorsnede van het proefstuk voor de twee verschillende materialen. Enerzijds is de PEEQ van het TRIP-staal over de doorsnede veel gelijkmatiger dan de PEEQ van het gewoon staal. Anderzijds zijn de normaalspanningen die werken op de lijmlaag in het TRIPstaal lager dan in het staal met weinig versteviging. Met andere woorden: het TRIP-staal lijkt beter geschikt te zijn om compressie-proeven op uit te voeren dan het ander staal! Dit opvallend resultaat werd te weinig diepgaand onderzocht om het als een algemene conclusie te mogen beschouwen. Niettemin is het een aanwijzing dat de belasting van de lijmlaag niet noodzakelijk hoger is in een materiaal met hoge rekversteviging.



Figuur 6.21: S22 en PEEQ bij twee verschillende materialen langs een pad in de dwarsdoorsnede van het proefstuk

Hoofdstuk 7

Dynamische drukproeven

Het hoofdstuk gaat van start met enkele praktische opmerkingen omtrent de uitvoering van proeven. Daarna worden de resultaten van de dynamische drukproeven besproken. Twee verschillende materialen werden beproefd: een commercieel staal met een vloeigrens van 550 MPa en TRIP800-staal. De proefstukken zijn altijd opgebouwd uit plaatjes zoals in hoofdstuk 4 beschreven. Telkens worden de resultaten vergeleken met de simulaties.

7.1 Praktische opmerkingen

7.1.1 Centreren van het proefstuk

Voor een correct proefverloop is het heel belangrijk dat het proefstuk perfect gecentreerd zit tussen de twee hopkinsonstaven. Om dit eenvoudig te kunnen doen, wordt een hulpstuk (zie fig. 7.1 en bijlage D) gebruikt. Het proefstuk wordt eerst in de centrale uitsparing gelegd en kan daarna eenvoudig tussen de staven gepositioneerd worden. Het proefstuk blijft vervolgens op zijn plaats door de kleefkracht van het smeermiddel. De hoofdfunctie van het smeermiddel is het verminderen van de wrijving tussen het proefstuk en de staven.



Figuur 7.1: Hulpstuk om het proefstuk tussen de staven te centreren

Voor een correct proefverloop is het bovendien belangrijk dat de hopkinsonstaven perfect uitgelijnd zijn t.o.v. elkaar. Soms is het nodig om de V-vormige steunblokken wat bij te stellen of de staven te roteren tot ze goed uitgelijnd zijn.

7.1.2 Hogesnelheidscamera

Tijdens alle experimenten wordt een opname gemaakt met een hogesnelheidscamera. De gebruikte camera is van het merk Photron type Fastcam APX RS. Filmpjes worden gemaakt aan een frame rate van maar liefst 90 000 frames per seconde en hebben een ruimtelijke resolutie van 128x96 pixels. De opname start bij het onderbreken van de laserstraal door de impactor. Dit gebeurt dus net voor impact van de impactor op het aambeeld van de ingangsstaaf. De opname wordt nadien opgeslagen in zowel TIFF als AVI formaat. Voor een veilig en efficiënt gebruik van de camera zijn volgende aandachtspunten belangrijk:

- Een scherm uit plexiglas beschermt de camera (en de operator) voor rondvliegende delen van het proefstuk, smeermiddel en eventueel afgebroken beschermplaatjes en aluminium stompjes.
- Het proefstuk moet zo gepositioneerd zijn dat de camera "kijkt" in het vlak van de lijmlaagjes. Anders is het onmogelijk om te zien wanneer de lijmlagen breken.
- Wit verven van het proefstuk en zwart verven van de staven verhoogt het contrast. Speciale DEDOCOOL lampen worden gebruikt om 50 Hz flikkering te voorkomen.



Figuur 7.2: Opstelling met hogesnelheidscamera

7.2 Proeven op staal met vloeigrens $\sigma_y = 550 MPa$ en weinig rekversteviging

7.2.1 Bespreking van de proeven

Er werden 18 proeven uitgevoerd op een commercieel staal met een vloeigrens van 550 MPa. Tabel 7.1 geeft een overzicht van deze proeven. Alle proefresultaten werden verwerkt via de klassieke methode en de resulterende spanning-rek diagrammen zijn te vinden in figuur 7.5.

Proef	Smering	h/d [mm]	Afronding	Druk [bar]	Opmerking
St_1	Molykote 33	5.4/5	nee	2.64	
St_2	UN loc'k'	5.6/5	nee	2.7	
St_3	UN loc'k'	5.8/5	nee	2.7	
St_4	UN loc'k'	5.25/5	ja	2.7	foto proefstuk 855
St_5	ROCOL	5.65/5	ja	2.7	foto proefstuk 856-857
St_6	geen	6.4/5	nee	3.5	Alu-stompjes afgebroken
St_7	ROCOL	5.25/5	ja	2.7	
St_8	ROCOL	5.3/5	ja	3.5	foto proefstuk 856-857
St_9	UN loc'k'	-	-	-	Proefstuk brak tijdens afronden
St_10	$\mathrm{geen}/\mathrm{OKS200}$	5.3/5	ja	3	
St_11	geen/teflon	5.3/5	ja	3	
St_12	Molykote BR2 plus	4.4/5	ja	3	Slechte plaatsing t.o.v. camera
St_13	Molykote BR2 plus	6.6/5	ja	3.5	Proefstuk: 2 kanten gepolijst
					${ m Ingangsstaaf}={ m ruw}$
					${ m Uitgangsstaaf}={ m gepolijst}$
St_14	Molykote BR2 plus	3.3/5	ja	3	Staven, proefstuk licht gepolijst
St_15	Molykote BR2 plus	3.4/5	ja	2.5	
St_16	Molykote BR2 plus	5.3/5	ja	3	Zeer dikke vetlaag
St_17	Marly Black Gold	5/5	ja	3	
St_18	Marly Black Gold	3.1/5	ja	3	Beschermingsplaten gepolijst
St_19	Molykote BR2 plus	3.3/5	ja	4	

Tabel 7.1: Overzicht van de experimenten op "gewoon" staal

Proefverloop

Bij alle proeven komen de plaatjes, waaruit het proefstuk is opgebouwd, van elkaar los. Zoals blijkt uit de camerabeelden wordt de lijmverbinding het eerst verbroken in het midden van het proefstuk. Bij sommige proeven komen de plaatjes over de volledige lengte los terwijl bij andere proeven het loskomen slechts gedeeltelijk is. Nadat de lijmlaag faalt, vertonen de plaatjes meestal knik.

Bij bepaalde proefstukken komt het voor dat de plaatjes wegdraaien en vervolgens weggekatapulteerd worden. Er is dan geen knik van de plaatjes en de plastische vervorming van het materiaal is minimaal. Optreden van dit verschijnsel is zichtbaar aan de golven in de hopkinsonstaven: over een zeker interval is de doorgelaten golf gelijk aan nul. Het proefstuk wordt op dat moment niet meer belast want de plaatjes klappen volledig om. De volledige ingaande golf wordt dan gereflecteerd. Na een zekere tijd komt er opnieuw een golf door in de uitgangsstaaf. Dit wijst erop dat de hopkinsonstaven opnieuw contact met elkaar maken. Er is echter weinig of geen vervorming meer van het materiaal wat eveneens te zien is aan de gereflecteerde golf die op nul terugvalt (gereflecteerde golf \approx vervormingssnelheid). Figuur 7.3 illustreert de voorgaande beschrijving aan de hand van de (verschoven) signalen in de hopkinsonstaven tijdens proef St_8. Op de figuur worden ter verduidelijking eveneens een aantal beelden van het proefstuk voorgesteld. Voorbeelden van andere proeven met min of meer hetzelfde proefverloop zijn de proeven 3, 4, 7, 8, 13, 15, 16. Op figuur 7.5 is duidelijk te zien dat bij deze proeven een dalend stuk in de spanning-rek curve voorkomt. Bij proef nummer 8 (oranje curve) is dit het meest uitgesproken. Vervolgens stijgt de spanning-rek curve terug. Het moment waarop dat gebeurt, is afhankelijk van de "hoeveelheid materiaal" dat zich nog tussen de staven bevindt.



Figuur 7.3: Signalen in de hopkinsonstaven bij St_8

Bij bijvoorbeeld proef St_14 daarentegen blijven bepaalde plaatjes bijna tot op het einde bij elkaar. Op de figuur 7.4 zijn de verschoven signalen in de hopkinsonstaven tijdens deze proef te zien, samen met enkele opnamen tijdens het experiment. Op de laatste opname kan gezien worden dat het proefstuk wel degelijk goed gepositioneerd was ten opzichte van de camera. Er werd dus gefilmd in het vlak van de lijmlagen. De golven in de staven bij deze proef verschillen grondig van deze bij proef St_8 (fig. 7.3). Dat is eveneens te zien aan de spanning-rek curve van deze proef die geen dalend stuk bevat. Proef St_8 en St_14 verschillen vooral in de proefstuklengte: 3.3 mm t.o.v. 5.3 mm.

Proef beïnvloedende parameters

De invloed van de volgende parameters op het verbreken van de lijmlaag werd onderzocht: afmetingen van het proefstuk, smering van de contactvlakken tussen het proefstuk en de staven, afronding van de proefstukrand en veroudering van de lijm.

Alleen een duidelijke invloed van de proefstuklengte wordt waargenomen. Bij alle proeven komen de plaatjes, waaruit het proefstuk is opgebouwd, van elkaar los. Bij de kortere proefstukken echter gebeurt dit later. Het knikken van de plaatjes na het falen van de lijmlaag is bij de langere proefstukken eveneens meer uitgesproken dan bij de korte proefstukken. Dit is in overeenstemming met de eindige elementen simulaties (§6.4.4) waar bleek dat de normaalspanningen die de lijm belasten, lager zijn bij korte proefstukken.

Daarnaast is er ook een verschil te zien tussen de proeven met en zonder smering maar tussen de verschillende smeermiddelen onderling is er geen duidelijk verschil te merken. Bij de proeven 10 en 11 werd slechts één contactvlak gesmeerd. Dit leidt tot asymmetrische tonvorming van het proefstuk. De mate van asymmetrie is een indicatie voor de werking van het smeermiddel. De methode blijkt echter niet zo succesvol te zijn (zie figuur 7.6). Tussen de gesmeerde en niet-gesmeerde kant is is slechts een miniem verschil in radiale uitzetting te zien.

De laag smeermiddel werd bij proef St_16 opzettelijk extra dik genomen. Het gevolg is dat de vervorming van het proefstuk start bij een hogere vervormingssnelheid. Bij de andere proeven is de initiële vervormingssnelheid lager, wat uiteraard strijdig is met het concept van **dynamische** beproeving. Het eerste deel van de spanning-rek curve van proef 16 stelt het samendrukken van het smeermiddel voor.

Een dikke laag smeermiddel brengt echter ook praktische problemen met zich mee. Bij drukproeven zijn de proefstukken namelijk niet vastgemaakt aan de hopkinsonstaven. Door het proefstuk tussen de hopkinsonstaven te drukken en door de kleefkracht van het smeermiddel blijft het op zijn plaats. Bij een zeer dikke laag smeermiddel is er echter geen direct contact meer tussen de staven en het proefstuk, waardoor het kan gaan schuinzakken. Een tweede probleem is dat het zeer moeilijk is om dezelfde smeerlaagdikte bij opeenvolgende proeven toe te passen, wat niet goed is voor de reproduceerbaarheid. Het probleem van het schuinzakken en de reproduceerbaarheid kan opgelost worden door een vast smeermiddel te gebruiken. Er wordt gedacht aan teflon. Dit materiaal is verkrijgbaar onder de vorm van een zeer dun lint dat normaal gebruikt wordt voor het afdichten van schroefdraad voor hydraulische en pneumatisch componenenten. Bij proef St_11 werd een eindvlak niet gesmeerd en een eindvlak gesmeerd met een dubbele laag van dit teflon lint. Op de beelden van de hogesnelheidscamera is een licht asymmetrische tonvorming waarneembaar waaruit de smerende werking van teflon blijkt. Op het spanning-rek diagram van figuur 7.5 is te zien dat bij zeer lage vervormingen de spanning trager oploopt dan bij de andere proeven door de teflonlaag die wordt samengedrukt. De werking van teflon smering wordt in het deel over proeven op TRIP-staal verder



Figuur 7.4: Signalen in de hopkinsonstaven bij St 14

onderzocht ($\S7.3$).

Bij de meeste proefstukken werd de scherpe rand van het proefstuk licht afgerond. De afrondingsstraal ligt in de grootte-orde van 0.25 mm. De bedoeling van de afronding is het verminderen van spanningsconcentraties aan de randen. Tijdens de experimenten werd echter geen verschil tussen de proefstukken met en zonder afronding waargenomen.

De proefstukken uit de proeven 1 tot en met 6 werden 3.5 maanden na de verlijming beproefd, terwijl de andere proefstukken minder dan 1 week na de verlijming werden beproefd. Er is geen significant verschil te merken tussen het gedrag van beide groepen proefstukken.



Figuur 7.5: Spanning-rek curve van verschillende proeven op staal met $\sigma_y=550 MPa$



Figuur 7.6: Opname van proef St_10: linkervlak is niet gesmeerd, rechtervlak wel

7.2.2 Beschadiging van de beschermingsplaatjes

Na de eerste zes proeven werden de beschermingsplaatjes opnieuw gepolijst. Figuur 7.7 beeldt twee foto's af van het oppervlak van de beschermingsplaatjes na de eerste zes experimenten, dus vóór het polijsten. Het oppervlak vertoont een duidelijke beschadiging.



Figuur 7.7: Oppervlak van de beschermingsplaatjes na de eerste 6 proeven

Na experiment St_6 en St_17 werden de plaatjes opnieuw gepolijst. Het uitzicht van het oppervlak van de plaatjes na proef St_19 is op figuur 7.8 te zien. Het oppervlak is nu nauwelijks beschadigd. Dit wijst erop dat het materiaal verstevigt onder invloed van de uitgevoerde experimenten.



Figuur 7.8: Oppervlak van de beschermingsplaatjes na proef nummer 19

7.2.3 Vergelijking met simulaties

Op figuur 7.9 wordt het gesimuleerde en experimentele spanningsverloop in de hopkinsonstaven naast elkaar uitgezet. Voor de simulatie wordt het model **SHPB_st** gebruikt (hoofdstuk 6). Het toegepaste materiaalmodel is dat van een staal met een vloeigrens van 550 MPa dat weinig versteviging vertoont. Doordat de stijgtijd van de golf te kort gekozen is, treden grote oscillaties op, maar deze komen niet voor in het interessante gedeelte van de golven. De golven die uit de simulatie volgen worden vergeleken met de opgemeten golven bij de proeven St_2 en St_12.

De signalen van proef St_2 zijn typerend voor alle proeven waar de plaatjes snel loskomen en knikken. De gereflecteerde golf is in het begin ongeveer constant en hoger dan de gesimuleerde golf wat wijst op een constante vervormingssnelheid. De doorgelaten golf is dan ook constant en ligt onder de gesimuleerde golf, wat wil zeggen dat de spanning in het proefstuk lager is dan verwacht. Dit komt natuurlijk door het uitknikken van de plaatjes. Op het moment dat de plaatjes praktisch volledig geplooid zijn, daalt de gereflecteerde golf zeer snel terwijl de doorgelaten golf een piek vertoont. Het proefmateriaal dat zich tussen de staven bevindt, wordt dan enkel in druk belast. Er is dan immers geen knik meer.

De proef St_12 is een van de betere proeven. De experimenteel verkregen golven komen dan ook redelijk goed overeen met de simulatieresultaten. Toch kunnen nog altijd duidelijk twee delen onderscheiden worden in de gereflecteerde en de doorgelaten golf. Tijdens het eerste deel is er een combinatie van samendrukking en knik, terwijl in het tweede deel enkel samendrukking van het proefstukmateriaal voorkomt.



Figuur 7.9: Vergelijking van de gesimuleerde en experimentele gereflecteerde en doorgelaten golf

7.3 Proeven op TRIP-staal

7.3.1 Overzicht van de proeven

Er werden 8 proeven uitgevoerd op proefstukken uit TRIP800-staal. Tabel 7.2 geeft een overzicht van deze proeven. Omdat uit de proeven op het commerciële staal bleek dat proefstukken met een lengte van 5 mm problemen geven, werden deze dan ook niet meer gebruikt. Bij alle proefstukken zijn de randen niet afgerond omdat bij deze bewerking gemakkelijk breuk optreedt.

Proef	Smering	h/d [mm]	Afronding	Druk [bar]	Opmerkingen
TRIP_1	OKS200	4.15/5	nee	4.5	
TRIP_2	OKS200+teflon	4.15/5	nee	5	
TRIP_3	OKS200	3.7/5	nee	5	
TRIP_4	OKS200	2/5	nee	5	
TRIP_5	OKS200	4.15/5	nee	4.5	Bijna gelijk aan TRIP_1
Uitlijning +	Beschermplaatjes	vernieuwen			
TRIP_6	OKS200+teflon	3.8/5	nee	5.5	
TRIP_7	Molykote 33	4.1/5	nee	5	Zonder beschermplaatjes
TRIP_8	Molykote 33	4.15/5	nee	5	Zonder beschermplaatjes

Tabel 7.2: Overzicht van de proeven op TRIP-staal

De proeven TRIP_1 en TRIP_5 zijn identiek wat betreft proefstukafmetingen, smering en druk. Bij TRIP_5 zijn de beschermingsplaatjes echter niet meer vlak door de inwerking van de voorgaande proeven, wat te zien is op figuur 7.10. Verschillen in de resultaten van deze twee proeven zijn dus hoofdzakelijk afkomstig van de indrukking of ruwheid van de staafuiteinden.



Figuur 7.10: Beschermingsplaatjes na TRIP_5

In TRIP_4 wordt het kleinste proefstuk gebruikt met een lengte van slechts 2 mm. Enkel bij deze proef is er geen knik van de plaatjes waaruit het proefstuk bestaat. De lijmverbinding wordt in het midden echter wel verbroken. Op figuur 7.11 wordt dit proefstuk voor en na het

experiment getoond. De proefstuklengte na het experiment is $1.35 \,\mathrm{mm}$ wat overeenkomt met een rek van 32.5% (zie verder).



Figuur 7.11: Proefstuk met lengte $L_P = 2 mm$ (TRIP_4) voor en na een experiment

Bij de proeven TRIP_2 en TRIP_6 wordt het effect van smering met teflon-lint onderzocht. Telkens zijn beide staafuiteinden gesmeerd met 2 lagen teflon en een laagje vet.

De proeven TRIP_7 en TRIP_8 worden uitgevoerd zonder de beschermingsplaatjes uit CPstaal. Dit veroorzaakt grote indrukking van de staafuiteinden zoals getoond in figuur 7.12. De maximale indrukdiepte bedraagt bijna 1 mm. Het grote verschil tussen proef TRIP_7 en TRIP_8 is dat er bij TRIP_8 reeds een grote indrukking aanwezig is in het staafuiteinde.



Figuur 7.12: Staafuiteinde na TRIP_8. De oranje cirkel heeft een diameter van 5 mm.

7.3.2 Verwerking van de proefresultaten

Van alle proeven wordt de spanning-rek curve (fig. 7.13) berekend, uitgaande van de signalen die opgemeten zijn met de rekstrookjes op de hopkinsonstaven. De curve stelt de ingenieursspanning voor i.f.v. de ingenieursrek.

Het eerste wat opvalt, is dat alle curven monotoon stijgen. Er komt dus geen dalend stuk in voor zoals wel het geval was bij de proeven op gewoon staal (fig. 7.5). Dit wijst erop dat knik van de plaatjes minder uitgesproken is dan bij de proefstukken uit het eerder getest staal, wat trouwens ook uit de hogesnelheidsopnamen valt af te leiden. Anderzijds is het natuurlijk ook zo dat de rekversteviging van het TRIP-staal groter is dan van het ander staal. Een aantal curven worden in meer detail besproken:



Figuur 7.13: Spanning-rek curven van de proeven op TRIP-staal zoals berekend

• De curven van TRIP_1 en TRIP_5 (invloed indrukking beschermingsplaatjes) zijn zeer sterk gelijklopend. Alleen in de omgeving van de vloeigrens en bij grote vervormingen is er een afwijking.

Een verklaring voor de minder duidelijk te onderscheiden vloeigrens in TRIP_5 kan gevonden worden in de lagere uniformiteit van de spanningsverdeling in het proefstuk (zie hoofdstuk 6). Het gevolg hiervan is dat niet alle proefstukmateriaal gelijktijdig begint te vloeien. Op bepaalde plaatsen begint het vloeien eerder dan op andere plaatsen wat zich vertaalt in een minder sterk afgetekende vloeigrens.

De afwijking bij hoge vervormingen komt omdat bij TRIP_5 het knikken van de plaatjes meer uitgesproken is.

• Uit de hogesnelheidsopname van TRIP_4 is te zien dat er een relatief dikke laag smeermiddel tussen het proefstuk en de staven aanwezig is. Dit verklaart het langzaam stijgen van de spanning bij aanvang van de proef. Verder is te zien dat de helling van de curve in het plastisch gebied hoger is dan bij de andere proeven. Het feit dat de plaatjes waaruit het proefstuk bestaat niet knikken, zal hier ongetwijfeld mee te maken hebben. Hogere spanningen kunnen echter ook verwacht worden omwille van de niet-axiale spanningstoestand in een kort proefstuk.

De maximale rek op de curve van TRIP_4 bedraagt 42%. Na de proef werd de lengte van het proefstuk met een schuifmaat opgemeten (1.35 mm) en daaruit blijkt dat de werkelijke rek 32.5% is. Hoe is dit verschil te verklaren? Ten eerste moet de spanning-rek curve van TRIP_4 ongeveer 2% naar links verschoven worden om het samendrukken van het smeermiddel uit te sluiten. De rek komt dan op 40.5% i.p.v. 42.5%. Ten tweede kan de indrukking van de staafuiteinden mee in rekening gebracht worden: uit de simulaties bleek dat de staafuiteinden maximaal over ongeveer 0.1 mm indrukken. De gemiddelde indrukking is echter iets kleiner dan de maximale indrukking en bovendien zal doordat het thermisch verzachten van TRIP-staal in de simulaties niet werd meegerekend, de uiteindelijk indrukking nog kleiner zijn. Als bijvoorbeeld een indrukking van 0.05 mm wordt verondersteld dan komt de verplaatsing van de staven dus eigenlijk overeen met een rek van $\frac{2-(1.35-2\cdot0.5)}{2} = 37.5\%$ i.p.v. 32.5%, wat al dichter in de buurt ligt van 40.5%.

• Bij de proeven met teflon-smering (TRIP_2 en TRIP_6) is in het begin van de proef een klein piekje te zien. Dit stelt het samendrukken van de teflonlaag voor.

Om de verschillende spanning-rek curven beter te kunnen vergelijken worden deze verschoven. Het (verlengde van het) lineaire deel in het begin van de curve gaat nu door de oorsprong van het assenstelstel. Op figuur 7.14 zijn de verschoven spanning-rek curven te zien samen met de vervormingssnelheid.

Vooral bij lage rekken en "zeer hoge" rekken vallen de curven niet zo goed samen. Tussenin vallen de curven vrij goed samen. De afwijking bij hoge rekken komt omdat het knikken van de plaatjes niet altijd op hetzelfde moment begint en is dus ook afhankelijk van de proefstuklengte. Bij lage rekken valt het op dat de spanning langzaam stijgt bij toenemende rek en dat de helling van de curve sterk verschillend is voor de diverse proeven. Bovendien is het moment waarop vloeien start niet scherp afgetekend. Voor deze waarnemingen worden drie mogelijke verklaringen voorgesteld:

- 1. Doordat de spanningen in het proefstuk niet uniform zijn, start vloeien niet overal op hetzelfde moment. De niet-uniformiteit van de spanningen komt voort uit de wrijving en de indrukking van de staafuiteinden.
- 2. Doordat de elasticiteitsmodulus van de hopkinsonstaven lager is dan die van de proefstukken en door de plastische vervorming van de staafuiteinden, loopt de spanning in het proefstuk traag op. Terzelfdertijd is de gereflecteerde golf groot want deze is evenredig



Figuur 7.14: Verschoven spanning-rek curven en vervormingssnelheid

met de relatieve verplaatsing van de staafuiteinden. De relatieve verplaatsing van de staafuiteinden komt echter niet voort uit plastische vervorming van het proefstuk maar wel uit elastische en plastische vervorming van de staafuiteinden. Uiteindelijk wordt zo een spanning-rek curve verkregen waar grote rekken overeenkomen met lage spanningen. (In hoofdstuk 5 over de staafuiteinden werd in de inleiding beschreven dat indrukking van van de staafuiteinden tot foute resultaten kan leiden [27])

3. Door de ruwheid van de contactvlakken van het proefstuk en de hopkinsonstaven, maken de eindvlakken van het proefstuk niet volledig contact met de staafuiteinden. Daarbij komt nog dat smeermiddel wordt opgesloten in de ruwheidspieken van de oppervlakken en daar blijft gedurende het volledige proefverloop. Er is dus eigenlijk een kleine spleet aanwezig tussen het proefstuk en de staven. Met als gevolg dat de gereflecteerde golf groter en de doorgelaten golf kleiner wordt. Op de resulterende spanning-rek curve zullen de spanningen dan lager zijn en de rekken hoger.

Bij trekproeven kan dit probleem niet voorkomen omdat de proefstukken vastgelijmd zijn aan de staven.

Opmerking: In het algemeen kan bij een hopkinsonproef (trek en druk) de elasticiteitsmodulus van het proefstukmateriaal niet teruggevonden worden. Dit komt omdat de ingaande drukgolf een zekere stijgtijd heeft en omdat de elasticiteit van de staven ook in de gereflecteerde golf voorkomt.

De derde verklaring lijkt het meest aannemelijk te zijn wanneer de spanning-rek curven van de proeven TRIP_7 en TRIP_8 bekeken worden. Bij beide proeven zijn er geen beschermingsplaatjes aanwezig. De proefstukken maken rechtstreeks contact met de harde Al7075-T6 stompjes. Op figuur 7.14 is te zien dat de initiële helling van TRIP_7 gelijkaardig is aan die van de meeste andere proeven. Nochtans is de indrukking van de staafuiteinden véél groter dan bij alle voorgaande proeven. Het is dus weinig waarschijnlijk dat indrukking van de staafuiteinden de oorzaak is van het langzame stijgen van de spanning i.f.v. de rek (Oorzaak 2 in de bovenstaande opsomming). Als nu de curve van TRIP_8 bekeken wordt, dan valt onmiddellijk de zeer lage spanning op. Bij TRIP_8 was er in de staafuiteinden een grote "put" aanwezig, afkomstig van TRIP_7. Deze "put" was bovendien gevuld met smeermiddel. Het is dus zeer waarschijnlijk dat het proefstuk in dit geval niet volledig contact maakt met de staven.

Het is dus niet de indrukking van de staafuiteinden die fouten veroorzaakt. Het is de ruwheid van de staafuiteinden die zorgt voor fouten. Bij toekomstige proeven moet er dus extra aandacht besteed worden aan het polijsten van de staafuiteinden.

Daarentegen is het zo dat metalen oppervlakken met een zeer lage ruwheid, een hoge wrijvingscoëfficiënt kennen door adhesie. Er moet dus een optimum bestaan. Een hoge ruwheid veroorzaakt fouten in de resultaatverwerking terwijl door een te lage ruwheid de wrijving zal toenemen.

Op figuur 7.14 wordt ook de vervormingssnelheid voorgesteld i.f.v. de rek. Zoals verwacht is de
initiële vervormingssnelheid van de proeven met een dikke laag smeermiddel of teflon smering (TRIP_2, TRIP_4 en TRIP_6) duidelijk hoger dan bij de andere proeven. De teflon-laag mist dus zijn effect niet. Een nadeel van de teflon-laag is evenwel dat deze gedurende de volledige proef tussen het proefstuk en de staven aanwezig is, m.a.w. er is geen rechtstreeks contact tussen het proefstuk en de staafuiteinden. De ingaande golf reflecteert voor een deel op de teflon-laag. Dit is ook te zien op figuur 7.14. De spanning-rek curven van de proeven met teflon smering (TRIP_2 en TRIP_6) liggen het laagst.

Daarnaast is er een vreemde rimpel op de vervormingssnelheid van alle proeven. De oorsprong van de rimpel is niet bekend. Er lijkt wel een verband te bestaan tussen het aantal pieken en de proefstuklengte: hoe korter het proefstuk, hoe lager het aantal pieken. Om het inzicht te vergroten worden in figuur 7.15 de vervormingssnelheid, de golfvoortplantingssnelheid en de ware rek van twee proeven uitgezet t.o.v. de tijd. De rek is eigenlijk de integraal van de vervormingssnelheid.



Figuur 7.15: Vervormingssnelheid, golfvoortplantingssnelheid en rek i.f.v. de tijd

Uit de figuur volgt dat de frequentie van de golvingen op de vervormingssnelheid ongeveer gelijk is aan 30 kHz en onafhankelijk is van de proefstuklengte. De golvingen ontstaan dus zeker niet door het proefstuk. Op de figuur 7.15 wordt eveneens de golfvoortplantingssnelheid in het proefstuk voorgesteld. Dit illustreert de afhankelijkheid van de golfvoortplantingssnelheid van de spanningstoestand van het materiaal. In een materiaal dat vloeit, is de voortplantingssnelheid ongeveer 10 keer lager dan in de onbelaste toestand.

7.3.3 Vergelijking van drukproeven met trekproeven

Op figuur 7.16 zijn de (ware) spanning-rek curven van enkele compressieproeven voorgesteld samen met een spanning-rek curve afkomstig van een trekproef bij gemiddelde vervormings-snelheid van $1500 \, s^{-1}$. Op deze figuur zijn ook opnamen ingevoegd die afkomstig zijn van TRIP_2.

De spanning-rek curve van TRIP_4 is de enige die de referentiecurve afkomstig uit trekproeven, kan volgen bij hoge rekken. Daarentegen wijkt de initiële helling van de spanning-rek curve zeer veel af van die van de referentiecurve. Omdat het proefstuk slechts 2 mm lang is, is de indrukking van de staafuiteinden relatief veel groter dan bij de andere proeven.



Figuur 7.16: Vergelijking van de spanning-rek curve in druk en trek

7.3.4 Vergelijking met simulaties

De experimenteel opgemeten (TRIP_3) en gesimuleeerde gereflecteerde en doorgelaten golven worden op figuur 7.17 naast elkaar uitgezet. Voor de simulatie wordt het model SHPB_alu_4mm gebruikt waarin het proefstukmateriaal wordt gemodelleerd met het Johnson-cook materiaalmodel.

De experimenteel waargenomen gereflecteerde golf is hoger dan die uit de simulatie terwijl de

doorgelaten golf kleiner is. De werkelijke vervormingssnelheid is dus hoger dan de gesimuleerde vervormingssnelheid terwijl de werkelijke spanning lager is dan de gesimuleerde. Het verschil valt te verklaren uit het feit dat de verzachting van het materiaal door opwarming ten gevolge van plastische vervorming, niet in rekening wordt gebracht in de simulaties. Dit is alleen maar gunstig want het betekent dat het werkelijk verloop van de vervormingssnelheid veel meer constant is dan wat uit de simulaties werd afgeleid.



Figuur 7.17: Vergelijking tussen experimentele en gesimuleerde golven

Hoofdstuk 8

Besluiten en aanbevelingen voor verder onderzoek

8.1 Besluiten

Experimenteel onderzoek naar het dynamisch materiaalgedrag is noodzakelijk voor het opstellen en valideren van accurate materiaalmodellen. Dit afstudeerwerk richtte zich op impactdynamische compressieproeven op geavanceerde staalsoorten zoals TRIP-staal. Meer specifiek werd onderzocht hoe dynamische drukproeven kunnen uitgevoerd worden op plaatstaal m.b.v. de hopkinsontechniek. Hiervoor beschikt de vakgroep Mechanische Constructie en Productie aan de Universiteit Gent over een split Hopkinson bar opstelling.

De thesis kan ingedeeld worden in twee delen. Het eerste deel is eerder praktisch van aard en spitst zich toe op de opstelling zelf. Een aantal problemen zoals het uitlijnen van de hopkinsonstaven t.o.v. de impactor, meervoudige impact en een vervormde ingaande spanningsgolf werden aangepakt. Daarbij werd altijd gestreefd naar de eenvoudigste oplossing. Om de uitlijning uletter te later verlegen word een beel eenveudig eentreermeenhenisme ge

Om de uitlijning vlotter te laten verlopen werd een heel eenvoudig centreermechanisme gemaakt.

Bij experimenten werd een vervormde ingaande golf waargenomen. Na een grondige analyse werd vastgesteld dat de oorzaak hiervan te vinden is bij het klemmen van de impactor in de versnellerbuis door radiale uitzetting. Als oplossing werd een soort "glijbaan" gemaakt die de impactor buiten de versnellerbuis geleidt. Door de grotere afstand tussen versneller en ingangsstaaf die zo verkregen werd, is eveneens het probleem van meervoudige impact grotendeels opgelost.

Door middel van een LabVIEW programma werd het proefverloop geautomatiseerd. Daarvoor was het ook nodig om het pneumatisch circuit van de versneller te herschikken. Er werd ervoor gekozen om het pneumatisch circuit van de druk- en trekopstelling samen te voegen. Het gevolg is een reductie van het aantal componenten en de kostprijs met daarentegen een toename van de betrouwbaarheid. Een bijkomend voordeel is dat de computersturing van de drukproeven nu sterk analoog kan zijn aan de vroeger reeds bestaande sturing van de trekopstelling. De gebruiker dient enkel de gewenste proefinstellingen op te geven. Het programma berekent vervolgens de nodige luchtdruk en zorgt dan dat de proef effectief bij deze druk uitgevoerd wordt.

Het beproeven van harde staalsoorten via aluminium hopkinsonstaven brengt een probleem met zich mee: het proefstuk laat een indruk na op de staafuiteinden. Verschillende oplossingen hiervoor werden onderzocht m.b.v. eindige elementen simulaties. Uiteindelijk bleek de bescherming van de staafuiteinden m.b.v. beschermingsplaatjes uit CP-staal en geharde stompjes uit Al7075-T6 de beste oplossing te zijn. Hiermee ligt de maximale indrukking van de staafuiteinden in de grootte-orde van 0.1 mm wat aanvaardbaar zou moeten zijn. De invloed van de beschermingsmiddelen op de golven in de hopkinsonstaven is minimaal, wat volgt uit simulaties.

Het laatste praktisch gedeelte betreft de vervaardiging van de proefstukken. Het basismateriaal voor de proefstukken is beschikbaar onder de vorm van dunne platen $(\pm 1.2 mm)$. Plaatstaal kan echter niet rechtstreeks in druk beproefd worden aangezien de minste onregelmatigheid in de opstelling onmiddellijk tot knik zal leiden. Door plaatjes op elkaar te lijmen konden toch massieve stukken materiaal verkregen worden. Hieruit dienden cilindervormige proefstukken gemaakt te worden. Verschillende productiemethoden werden beschouwd maar opnieuw werd gekozen voor de eenvoudigste oplossing. Mede door het vakmanschap van Luc Van den Broecke was het mogelijk om proefstukken te maken via uitsluitend conventionele bewerkingsmethoden (zagen, steken, draaien,...).

Het tweede luik van de thesis is eerder wetenschappelijk/technisch van aard. Onderwerpen die hier aan bod kwamen zijn: proefstukgeometrie, spanningsverdeling in een proefstuk en de proeven zelf.

De initiële proefstukgeometrie werd gekozen aan de hand van een literatuurstudie. Cilindervormige proefstukken met hoogte = diameter = 5 mm werden vooropgesteld. Na enkele eindige elementen simulaties en experimentele verificatie werd de geometrie wat bijgesteld: cilindervormige proefstukken met hoogte = 4 mm en diameter = 5 mm geven betere resultaten.

Via eindige elementen simulaties in het programma Abaqus werd de spanningsverdeling in een proefstuk tijdens een hopkinsonproef in beeld gebracht. Hierbij werd o.a. gebruik gemaakt van een dimensieloze grootheid die de uni-axialiteit van de spanningen karakteriseert. Speciale aandacht ging uit naar de spanningen die de lijmlaag belasten. Er werd ook onderzocht welke invloed de wrijving in de contactvlakken en de proefstukafmetingen hebben op de lijmlaagbelasting. Hoge wrijving en lange proefstukken zorgen voor grote spanningen en zijn dus nadelig.

Tenslotte werden 26 dynamische drukproeven uitgevoerd. Twee verschillende materialen werden onderzocht: een staal met vloeigrens van $\pm 550 MPa$ en weinig rekversteviging (18 proeven) en TRIP800-staal (8 proeven). Daarbij werden diverse parameters zoals proefstuklengte, smering, type staafuiteinde, leeftijd lijm, afronding proefstukranden,... gevarieerd.

Een belangrijke invloed van de proefstuklengte en de smering werd waargenomen, wat in overeenstemming was met de voorspellingen afkomstig van de simulaties. Tussen verschillende smeermiddelen onderling werd echter weinig of geen invloed vastgesteld.

Ruwheid van de contactvlakken proefstuk-staven heeft een erg nadelige invloed op de proefresultaten. Bij ruwe contactvlakken is de waargenomen spanning lager en de rek hoger dan de werkelijke spanning en rek die in het proefstuk aanwezig zijn.

Ter ondersteuning van de resultaten werd bij elke proef een opname gemaakt met een hogesnelheidscamera (90 000 fps). Daarop was te zien dat de de lijmverbinding niet voldoende sterk is. Bij de proeven op TRIP-staal faalt de lijm minder snel dan bij de proeven op gewoon staal.

8.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Proefstukken

De verlijmde cilindervormige proefstukken geven nog niet het gewenste resultaat. De lijmverbinding faalt te snel. Dit probleem kan aangepakt worden op twee domeinen. In de eerste plaats kan de oorzaak van het falen bestreden worden. De lijmlaagbelasting is o.a. afhankelijk van de proefstukgeometrie en wrijving in de eindvlakken. Door een andere dan de cilindervormige proefstukgeometrie te gebruiken kan de belasting eventueel gereduceerd worden. Onderzoek van de spanningsverdeling in bijvoorbeeld haltervormige proefstukken kan misschien een oplossing bieden. Het bestaande eindige elementen model kan hiervoor gebruikt worden. In de tweede plaats kunnen de proefstukken verbeterd worden door andere hoge sterkte lijmsoorten uit te proberen.

Opstelling

Door het gebruik van aluminium hopkinsonstaven is de huidige opstelling beperkt in drukbereik en laat het proefstuk een indrukking na op de staafuiteinden. Vervangen van deze staven door stalen staven kan hier een verbetering betekenen. Om staven uit staal te kunnen gebruiken moet het drukbereik van de versneller aanzienlijk uitgebreid worden.

Simulaties

In hoofdstuk 6 blijft de oorzaak van bepaalde simulatieresultaten nog onduidelijk. Verder onderzoek is nodig.

In de simulaties werd geen rekening gehouden met de verzachting van TRIP-staal door opwarming. Bij dynamische proeven is het thermisch effect zeker niet verwaarloosbaar. Verder verbeteren van de eindige elementen modellen is daarom wenselijk.

Bijlage A

Leveranciers

Air Compact Belgium NV

Brusselsesteenweg 427 9050 Gent (Gentbrugge) Tel. 09/230 20 30, Fax. 09/231 15 09 www.aircompact.com -> Pneumatische componenten

Dejond NV

Terbekehofdreef 55-59

2610 Antwerpen

Tel. 03/820 34 11, Fax. 03/820 35 11

www.dejond.com

-> Aluminium

Hubo

Ottergemsesteenstraat 248 9000 Gent Tel. 09/222 26 63, Fax. 09/222 98 47 www.hubo.be/info@gentuz.hubo.be -> Hout

VERVAET comm. VA

Drongensesteenweg 49 9000 Gent Tel. 09/226 63 26, Fax. 09/226 10 15 http://www.vandenbulcke.be/ -> Lijm (Loctite)

Bijlage B

Aansluiting stuur en meet PC

B.1 Overzicht

In deze bijlage wordt de aansluiting van de sensoren en actuatoren aan de stuur en meet PC toegelicht. Op figuur B.1 is een foto te zien van de verschillende onderdelen.

- 1. Stuur en meet PC
- 2. Oscilloscoop
- 3. Data-acquisitie eenheid bestaande uit
 - (a) Connectorbox
 - (b) DAQpad-6052E van National Instruments
 - (c) Data-acquisitie kaart SCB68
- 4. Connectorkabel
- 5. Solid state relais
- 6. Vijf elektronische ventielen
- 7. Elektrische voedingen
 - (a) Connector 230V AC voeding voor de kleppen (uitgezonderd 3/2-ventiel !!!)
 - (b) Connector 24V DC voeding voor het 3/2-ventiel
 - (c) 10V DC voeding voor de druksensor
 - (d) 5V DC voeding voor de fotocel
- 8. Fotocel
- 9. Rekstrookjes
- 10. Twee druksensoren



B.2 Verbinding van de acquisitie-kaart met de connectorbox

In plaats van sensoren en actuatoren rechtstreeks aan te sluiten op de pinnen van de acquisitiekaart (onderdeel nr. 3c) worden deze aangesloten via een connectorbox (onderdeel nr. 3a). De connectorbox bevat alleen verbindingen, er wordt hier dus geen signaalverwerking gedaan. Het doel van de connectorbox is om het aansluiten van de diverse onderdelen aan de dataacquisitie eenheid te vereenvoudigen: i.p.v. individuele signaaldraden aan te sluiten kunnen nu standaard connectoren gebruikt worden. Op die manier wordt de data-acquisitie eenheid heel flexibel want deze kan snel aangesloten worden op verschillende proefopstellingen.

Niet alle pinnen van de acquisitie-kaart zijn aangesloten op de connectorbox. Tabel B.2 toont de pinnen die verbonden en gebruikt worden voor de Hopkinsonopstelling.

	Connectorbox	Acquisitiekaart	
Poort	Uitgang ZDB25S	SCB68	Toestel
Line1 - DIO1	3	17	Inlaatklep
Line2 - DIO2	5	49	Uitlaatklep
Line3 - DIO3	7	47	Vork
Line4 - DIO4	9	19	3/2-ventiel
Line5 - DIO5	11	51	Noodstop

Op de achterkant van de connectorbox zijn 16 coaxconnectoren voorzien. Alleen lijn 2, 3 en 4 worden gebruikt voor respectievelijk de druksensor van het drukvat, druksensor van de SHPB-versneller en fotocel.

B.3 Connectorkabel

De kabel die de Connectorbox verbindt met de relaiskast bevat 12 signaaldraden. Deze zijn te onderscheiden door de verschillende kleur. De aansluiting van de draden aan de twee connectoren van de connectorkabel zijn niet "recht", m.a.w. een pin aan het ene uiteinde komt niet overeen met een pin aan het andere uiteinde. Tabel B.3 verduidelijkt dit.

draadkleur	functie	Connectorbox	Relaiskast
roze	DIO1	3	1
oranje	DGND	4	9
bruin	DIO2	5	2
groen	DGND	6	10
zwart	DIO3	7	3
lichtblauw	DGND	8	11
rood	DIO4	9	12
blauw	DGND	10	13
paars	DIO5	11	14
wit	DGND	12	25

Bijlage C

Kalibratie druksensor

De druksensor 4EM059 van de SHPB versneller (type PDCR840, $P_{max} = 20 bar$) werd gekalibreerd. Tijdens de kalibratie werd de sensor gevoed met 10 V DC, afkomstig van het Genesis meetsysteem. De kalibratieparameters (voor metingen tot 10 bar) zijn: **a=4.87 en b=2.46**. Onderstaande figuur C.1 toont de details van de meting.



Figuur C.1: Kalibratie van druksensor 4EM059. Voedingsspanning = 10 V

Bijlage D

CAD-tekeningen

D.1 Centreerstuk

Het centreerstuk dient om het proefstuk correct tussen de hopkinsonstaven te centreren. (zie hoofdstuk 7)

D.2 Zaaghouder

Wordt gebruikt bij de productie van proefstukken. Een staafje met een diameter van 5 mm past in de opening. De zaaghouder past vervolgens op de tafel van de zaagmachine (Struers Discotom-2). Het houdertje verhindert het loskomen van de plaatjes waaruit het proefstuk is opgebouwd. (zie hoofdstuk 4)

D.3 Impactorglijbaan

Dient om de impactor te geleiden buiten de versneller. (zie hoofdstuk 2)







Bijlage E

Datasheets van de gebruikte lijm en smeermiddelen

Product	Molykote BR2 plus	Molykote 33	
Soort	Universeel vet op basis van minerale	Siliconenvet voor hoge en zeer	
	olie met molybdeendisulfide, voor	lage temperaturen	
	zware omstandigheden		
Toepassingen	Lagersmering	Lagersmering	
Eigenschappen	Hoge toelaatbare belasting	Breed temperatuurbereik	
	Lage oxidatie	Lage oxidatie	
		Verenigbaar met vele kunststoffen	
Fysische/chemische	Kleur: zwart	Kleur: roze	
gegevens	Samenstelling: minerale olie, lithiumzeep	Samenstelling: Polyfenylmethyl	
	vaste smeerstoffen, EP-additief,	siloxaan, lithiumzeep	
	corrosieremmer		
	Viscositeit basisolie (40°C): $114\frac{mm^2}{s}$	Viscositeit basisolie (25°C): 100 $\frac{mm^2}{s}$	
	Temperatuurbereik: $-30^{\circ}C - 130^{\circ}C$	Temperatuurbereik: $-73^{\circ}C - 180^{\circ}C$	



LOCTITE[®] 480™

April 2006

PRODUCT DESCRIPTION

 $LOCTITE^{\ensuremath{\mathbb{R}}}$ 480TM provides the following product characteristics:

Technology	Cyanoacrylate		
Chemical Type	Ethyl cyanoacrylate		
Appearance (uncured)	Black liquid ^{⊾мs}		
Components	One part - requires no mixing		
Viscosity	Low		
Cure	Humidity		
Application	Bonding		
Key Substrates	Metals, Plastics and Rubbers		

 $\text{LOCTITE}^{\textcircled{8}}$ 480TM is a rubber toughened adhesive with increased flexibility and peel strength along with enhanced resistance to shock.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C	1.05
Flash Point - See MSDS	
Viscosity, Cone & Plate, mPa·s (cP):	
Temperature: 25 °C, Shear Rate: 1,000 s ⁻¹	100 to 200 ^{LMS}
Viscosity, Brookfield - LVF, 25 °C, mPa·s (cP):	
Spindle 1, speed 6 rpm	100 to 200

TYPICAL CURING PERFORMANCE

Under normal conditions, the atmospheric moisture initiates the curing process. Although full functional strength is developed in a relatively short time, curing continues for at least 24 hours before full chemical/solvent resistance is developed.

Cure Speed vs. Substrate

The rate of cure will depend on the substrate used. The table below shows the fixture time achieved on different materials at 22 °C / 50 % relative humidity. This is defined as the time to develop a shear strength of 0.1 N/mm².

Fixture time, seconds:	
Steel (degreased)	60 to 120
Aluminum	10 to 30
Zinc dichromate	50 to 150
Neoprene	<20
Rubber, nitrile	<20
ABS	20 to 50
PVC	50 to 100
Polycarbonate	30 to 90
Phenolic	20 to 60

Cure Speed vs. Bond Gap

The rate of cure will depend on the bondline gap. Thin bond lines result in high cure speeds, increasing the bond gap will decrease the rate of cure.

Cure Speed vs. Activator

Where cure speed is unacceptably long due to large gaps, applying activator to the surface will improve cure speed. However, this can reduce ultimate strength of the bond and therefore testing is recommended to confirm effect.

Cure Speed vs. Humidity

The rate of cure will depend on the ambient relative humidity. The following graph shows the tensile strength developed with time on Buna N rubber at different levels of humidity.



TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Cured for 24 hours @ 22 °C Physical Properties	
Coefficient of Thermal Expansion, ISO 11359-2, K ⁻¹	80×10⁻ ⁶
Coefficient of Thermal Conductivity ISO 8302, W/(m K)	0.1
Glass Transition Temperature, ISO 11359-2, °C	150
Electrical Properties:	
Volume Resistivity, IEC 60093, Ω·cm	10×10 ¹⁵
Surface Resistivity, IEC 60093, Ω	10×10 ¹⁵
Dielectric Breakdown Strength, IEC 60243-1, kV/mm	25
Dielectric Constant / Dissipation Factor, IEC 60250:	
0.1 kHz	2.65 / <0.02
1 kHz	2.75 / <0.02
10 kHz	2.75 / <0.02

TYPICAL PERFORMANCE OF CURED MATERIAL Adhesive Properties

Cured for 30 seconds @ 22 °C Tensile Strength, ISO 6922:		
Buna-N	N/mm²	≥1.8 ^{LMS}
	(psi)	(≥260)
Cured for 24 hours @ 22 °C		
Lap Shear Strength, ISO 4587:		
Steel (grit blasted)	N/mm²	22 to 30
	(psi)	(3,200 to 4,400)
Aluminum (etched)	N/mm²	14 to 22
	(psi)	(2,000 to 3,200)
Zinc dichromate	N/mm²	8 to 15
	(psi)	(1,200 to 2,200)
ABS	N/mm²	6 to 20
	(psi)	(870 to 2,900)
PVC	N/mm²	4 to 20
	(psi)	(580 to 2,900)
Phenolic	N/mm²	5 to 15
	(psi)	(730 to 2,200)
Polycarbonate	N/mm²	5 to 20
	(psi)	(730 to 2,900)



Nitrile	N/mm² (psi)	5 to 15 (730 to 2 200)
Neoprene	N/mm² (psi)	5 to 15 (730 to 2,200)
Tensile Strength, ISO 6922:		
Steel (grit blasted)	N/mm² (psi)	12 to 25 (1,700 to 3,600)
Buna-N	N/mm² (psi)	5 to 15 (730 to 2,200)

Cured for 24 hours @ 22 °C, followed by 24 hours @ 121 °C, tested @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:		
Steel (grit blasted)	N/mm²	≥18.0 ^{∟мs}
	(psi)	(≥2,610)

TYPICAL ENVIRONMENTAL RESISTANCE

Cured for 1 week @ 22 °C Lap Shear Strength, ISO 4587: Steel (grit blasted)

Hot Strength

Tested at temperature



Heat Aging

Aged at temperature indicated and tested @ 22 °C



Chemical/Solvent Resistance

Aged under conditions indicated and tested @ 22 °C.

		% of initial strength		
Environment	°C	100 h	500 h	1000 h
Motor oil	40	85	85	85
Gasoline	22	90	70	70
Ethanol	22	95	95	80
Isopropanol	22	75	75	75
Freon TA	22	90	90	85
Heat/humidity 95% RH	40	80	80	65

Lap Shear Strength, ISO 4587:

Polycarbonate

		% of initial strength		
Environment	°C	100 h	500 h	1000 h
95% RH	40	100	100	100

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

For safe handling information on this product, consult the Material Safety Data Sheet (MSDS).

Directions for use

- 1. For best performance bond surfaces should be clean and free from grease.
- 2. This product performs best in thin bond gaps (0.05 mm).
- 3. Excess adhesive can be dissolved with Loctite cleanup solvents, nitromethane or acetone.

Loctite Material Specification^{LMS}

LMS dated December 5, 2003. Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected QC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Quality.

Storage

Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may be indicated on the product container labeling.

Optimal Storage: 2 °C to 8 °C. Storage below 2 °C or greater than 8 °C can adversely affect product properties. Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel Corporation cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Bijlage F

Logboek en Rapport

- F.1 Voorbeeld van een rapport
- F.2 Voorbeeld van een logboek

SHPB Proefnr. TRIP_7

Algemeen

Naam uitvoerder: Jan Peirs Datum van uitvoering: 07/05/07

Proefstukgegevens

Lot.: Lot1 Proefstuk.: materiaal: TRIP800 lengte (mm): 4.10 diameter (mm): 5.00 geschatte vloeigrens (MPa): 1200

Kalibratieparameters van de drukmeter

Kalibratieparam. 1: 0.072888 Kalibratieparam. 2: 6.333120

Test set-up gegevens

Correctiefactor drukval: 0.60 VERSNELLER: massa (kg): 1.54 diameter (mm): 40.0 elasticiteitsmodulus (MPa) : 3600.0 massadichtheid (kg/m3): 1430.0 stroke (m): 1.20 HOPKINSONSTAVEN: diameter (mm): 25.0 elasticiteitsmodulus (MPa) : 70000.0 massadichtheid (kg/m3): 2700.0

Proefgegevens

Drukberekening op basis van: wenswaarde luchtdruk (Bar) wenswaarde luchtdruk (Bar) : 5.0 Gemeten instelwaarde (Na resultaatverwerking aanvullen): 5

Opmerkingen

Staven zonder beschermingsplaatjes --> grote indrukking van de staafuiteinden (Al7075-T6)

Het lekverlies in het drukvat

Tijdsduur lekverlies (sec): 1.57

Aantal proeven	9						
	Algemeen			Proefst	ukgegeve	ns	
Naam Uitvoerder	Datum	Testnummer	Lot.	Proefstuk	Lengte	Diameter	Materiaal
Jan Peirs	27/04/07	TRIP_5	Lot1		4.150000	5.000000	TRIP800
Jan Peirs	27/04/07	Uitlijning1			4.150000	5.000000	
Jan Peirs	27/04/07	Uitlijning2	C X		4.150000	5.000000	
Jan Peirs	27/04/07	TRIP_6	Lot1		3.800000	5.000000	TRIP800
Jan Peirs	07/05/07	TRIP_7	Lot1		4.100000	5.000000	TRIP800
Jan Peirs	07/05/07	TRIP_8	Lot1		4.100000	5.000000	TRIP800
		e.					
	Kalibratieparameters			Proef	gegevens		2
8	9	Correctiefactor	Berekeningsmanier	Wenswaarde	Stroke	Impactormassa	Nodige druk
0.072888	6.333120	0.600000	0.000000	4.500000	1.200000	1.540000	4.500000
0.072888	6.333120	0.600000	0.000000	2.000000	1.200000	1.540000	2.000000
0.072888	6.333120	0.600000	0.000000	2.000000	1.200000	1.540000	2.000000
0.072888	6.333120	0.600000	0.000000	5.500000	1.200000	1.540000	5.500000
0.072888	6.333120	0.600000	0.000000	5.000000	1.200000	1.540000	5.000000
0.072888	6.333120	0.600000	0.000000	5.000000	1.200000	1.540000	5.000000
	Meetgegevens		Onderbreking	Rapport			
Gemeten waarde	Gemeten druk na sluiten inlaatklep	Tijdsduur lekverlies	Noodstop Ingedrukt	Filename rapport			
	0.049595	2.148000	Nee	rapport_TRIP_5			
	0.049595	3.330000	Nee	rapport_Uitlijning1			
	0.049595	3.192000	Nee	rapport_Uitlijning2			
	0.049595	1.709000	Nee	rapport_TRIP_6			
5	0.049595	1.567000	Nee	rapport_TRIP_7			
Q	0.048628	1.687000	Nee	rapport_TRIP_8			

Logboek: Split Hopkinson PRESSURE bar

Bijlage G

CD-rom

Thesistekst in PDF formaat De signalen en filmpjes van de proeven Abaqus modellen LabVIEW Programma ASIDE (LabVIEW 8.0)

Bibliografie

- Davies E.D.H. and Hunter S. C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split hopkinson pressure bar. J. Mech. Phys. Solids, 11:155 – 179, 1963.
- [2] Oosterkamp Djapic L., Ivankovic A., and Venizelos G. High strain rate properties of selected aluminium alloys. *Materials Science and Engineering*, pages 225 – 235, 2000.
- [3] Samanta S.K. Dynamic deformation of aluminium and copper at elevated temperatures. J. Mech. Phys. Solds, 19(3), 1971.
- [4] Lee O.S. and Kim M.S. Dynamic material property characterization by using split hopkinson pressure bar (shpb) technique. Nuclear Eng. And Design, pages 119 – 125, 2003.
- [5] Deshpande V.S. and Fleck N.A. High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams. Int. J. of Impact Eng., 24, 2000.
- [6] Noble J.P., Goldthorpe B.D., Chruch P., and Harding J. The use of the hopkinson bar to validate constitutive relations at high rates of strain. J. Mech. Phys. Solids, pages 1187 – 1206, 1999.
- [7] Verleysen P and Degrieck J. Experimental investigation of the deformation of hopkinson bar specimens. International Journal of Impact Engineering, 30:239 – 253, 2004.
- [8] Verleysen P. Experimentele studie en numerieke modellering van het dynamisch gedrag in trek van een al dan niet vezelversterkt quasi-bros materiaal. PhD thesis, Universiteit Gent, 1999.
- [9] Lichtenberger A., Lach E., and Bohmann A. Analyse du frottement dans les essai de compression sur barres d'hopkinson. Journal De Physique IV, 4:29 – 34, 1994.
- [10] Deltort B., Neme A., and Tanguy B. A new specimen geometry for compression hopkinson bars. *Journal De Physique IV*, pages 265 – 270, 1997.
- [11] Quinteyn S. Uitbreiden van de mogelijkheden van een 'hopkinson'-opstelling, 2004-2005.
- [12] Zencker H. and Clos R. Limiting conditions for compression testing of flat specimens in the split hopkinson pressure bar. *Experimental Mechanics*, 39(4):343 – 348, 1999.
- [13] Van Slycken J., Verleysen P., Bouquerel J., and De Cooman B.C. Crashworthiness characterization and modelling of high-strength steels for automotive applications. Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering, 220:391 – 400, 2006.
- [14] Van Slycken J., Verleysen P., Degrieck J., Samek L., and De Cooman B.C. High-strain-rate behavior of low-alloy multiphase aluminium- and silicon-based transformation-induced plasticity steels. *OLUME*, 37A:1527–1539, 2006.
- [15] Jacques P.J. Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8:259 – 265, 2004.

- [16] http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/trip.steels.html.
- [17] http://www.ussautomotive.com/auto/tech/grades/trip800.htm.
- [18] De Vogelaere P. Impactbuigproeven op geavanceerde staalsoorten, 2005-2006.
- [19] Van Beek A. Advanced engineering design: lifetime performance and reliability. 2006.
- [20] Maesen C. Ontwikkeling van labviewTM-programmatuur voor de sturing van diverse dynamische proefstanden, 2001-2002.
- [21] Coghe F., Rabet L., and Kestens L. Deformation mechanisms of a commercial titanium alloy ti6al4v as a function of strain rate and initial texture. J. Phys. IV, 134:845–850, 2006.
- [22] Chakravarty U., Mahfuz H., Saha M., and Jeelani S. Strain rate effects on sandwich core materials: an experimental and analytical investigation. *Acta Materialia*, 51, 2003.
- [23] Day S, Hopperstad O.S., Borvik T., and Clausen A.H. Constitutive relation and failure criterion for three structural steels at high strain rates. *Structures under schock and impact VII*, pages 427 – 436, 2004.
- [24] Ogawa K. Impact-tension compression test by using a split-hopkinson bar. Experimental Mechanics, pages 81 – 86, 1984.
- [25] Gary G. and Zhao H. Dynamic testing of fibre polymer matrix composite plates under in-plane compression. *Composites*, pages 835 – 840, 2000.
- [26] Zhao H. and Gary G. The testing and behaviour modelling of sheet metals at strain rates from 10^{-4} to $10^4 s^{-1}$. Materials Science and Engineering, 207:46 50, 1996.
- [27] Nemat-Nasser S., Isaacs J.B., and Starrett J.E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 435:370 – 391, 1991.
- [28] http://www.matweb.com.
- [29] http://aluminium.matter.org.uk/.