

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Fracture load predictions for adhesive joints subject to quasi-static loads

Eskandarian, M.; Azari, S.; Papini, M.; Spelt, J. K.

This publication could be one of several versions: author's original, accepted manuscript or the publisher's version. / La version de cette publication peut être l'une des suivantes : la version prépublication de l'auteur, la version acceptée du manuscrit ou la version de l'éditeur.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

Proceedings of the Light Metals Technology Conference 2007, 2007-09-24

NRC Publications Record / Notice d'Archives des publications de CNRC: https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=63a53a88-407b-4740-ae5e-75b4e1cd1280 https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=63a53a88-407b-4740-ae5e-75b4e1cd1280

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at <u>https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright</u> READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.





Fracture load predictions for adhesive joints subject to quasi-static loads

M. Eskandarian¹⁾, M. Papini²⁾ and J.K. Spelt^{3)*}

¹⁾ Aluminium Technology Centre, Industrial Materials Institute, National Research Council Canada (ATC/IMI/NRC), 501 boul. de l'Université, Chicoutimi (Québec), Canada G7H 8C3

²⁾ Department of Mechanical and Industrial Engineering, Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, Ontario, Canada M5B 2K3

³⁾ Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 5 King's College Road, Toronto, Ontario, Canada M5S 3G8

* Corresponding Author

An engineering approach to fracture load predictions for adhesive joints was presented in Refs. [1] and [2]. A series of quasi-static fracture tests on double-cantileverbeam (DCB), single-lap-shear (SLS) and cracked-lap-shear (CLS) joints were conducted in order to investigate the applicability of this approach to a variety of joints bonded by a toughened epoxy adhesive. First, the dependence of the critical energy release rate (G_c) on the mode ratio was determined experimentally for DCB specimens. This approach was then used to predict the ultimate strength of SLS and CLS joints.

The effects of adhesive strain rate, adherend geometry and substrate material on G_c were investigated. This revealed that the adherend flexural rigidity had the most significant influence on G_c and the shape of the R-curve. These joints, having different materials and geometries, were also modeled in a series of finite element analyses to gain a better understanding of the loading and fracture phenomena.

References

- 1. G. Fernlund, M. Papini, D. McCammond and J.K. Spelt, Fracture load predictions for adhesive joints, *Compos. Sci. Technol.*, 1994, <u>51</u>, pp. 587-600.
- M. Papini, G. Fernlund and J.K. Spelt, Effect of crack-growth mechanism on the prediction of fracture load of adhesive joints, *Compos. Sci. Technol.*, 1994, <u>52</u>, pp. 561-570.

Conseil national de recherches Canada

National Research Council Canada

Industrial Materials

Institute

Institut des matériaux industriels

Fiche d'information et d'autorisation pour documents internes, externes et conférences **CTA**

Nom	l pour l'I Prénom	Centre financ.	Centre de coût	Commande interne	Signature		Date sign.	Premi aute publica
Eskandarian	M.	502300	502305	859	M. (sk	antaria/	08/14/20	007 *
utres auteurs				Externe		·		***
Papini	Marcello			Ryerson Univ.				
Spelt	Jan K.			U. of Toronto				
Azari	Shahrokh			U. of Toronto				
	1933년 1818년 1818년 1919년 - 1919년 1819년 1819년 1919년 - 1919년 1819년 1 1919년 - 1919년 1819년 1 1919년 - 1919년 1819년 1 1919년 - 1919년 1819년 1 1819년 1819년 1819							
* Je certifie, en tai DCUMENT	nt que premie	r auteur, qu	e j'ai vérifié	avec le(s) partenaire	e(s) qu'il(s) n'a (n'o	ont) pas d'objection a	à ce docun	nent.
tre		****						
racture load pre	dictions fo	or adhesi	ve joints	subject to quas	i-static loads			
· · · · · · · · · · · ·		r						
tatut de distr	ibution	Général						
уре								
⊖ Sommaire (abs	tract)	<u>بر بند جا</u>		~ ~		P		*****
	nacy	ECRIT	nal à suivr	e: 🔿 Oui 🔘 No	on	Si oui, date :		
	•				on	Si oui, date :		
C Rapport	O Techniq		nal à suivr lustriel de s		n	Si oui, date :		
O Rapport O Autre	O Techniq	ue O Ind			on	Si oui, date :		
○ Rapport ○ Autre ● Document sour	O Techniq	ue O Ind	lustriel de s	service				
C Rapport C Autre Document sour Si un sommai	O Techniq nis pour pu re (abstract)	ue O Ind	lustriel de s	service lemment, veuillez i				
C Rapport C Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G	ue O Inc blication a été sour	lustriel de s <u>mi</u> s précéd CNRC [service lemment, veuillez i CNRC	ndiquer les num			
C Rapport C Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter d	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G	ue O Inc blication a été sour	lustriel de s <u>mi</u> s précéd CNRC [service lemment, veuillez i	ndiquer les num			
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans	ue O Inc blication a été sour Light Meta	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo	ervice emment, veuillez i CNRC ogy Conference 20	ndiquer les num 07	éros :		
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la cadre 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence :	ue O Inc blication a été sour Light Meta 2007-09-2	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu :	ndiquer les num	éros : C	2007	09.24
 C Rapport C Autre C Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la cadre da ra À paraître dar 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence :	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conference	Iustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date :		-09-24
 C Rapport C Autre C Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter dana de la cadre de la cadre	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence : ns : ication	ue O Inc blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conferenc A é	Iustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu :	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date :		
C Rapport C Autre C Autre D Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la c À paraître dar atut de publ Revue ou livre	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence : ns : ication avec comité	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conference A é de lecture	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte	lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de	sera dispo An	nible. née cal.
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal dar 	O Techniq nis pour pu <u>re (abstract)</u> 5411-G ans onférence : is : ication avec comité de conférence	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conferenc A é de lecture ce avec cor	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar Revue ou livre Procès-verbal da 	O Techniq nis pour pu <u>re (abstract)</u> 5411-G ans onférence : is : ication avec comité de conférence	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conferenc A é de lecture ce avec cor	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de	sera dispo An	nible. née cal.
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la co À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Autre 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence : is : ication avec comité de conférence de conférence	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conferenc A é de lecture ce avec cor	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar Revue ou livre Procès-verbal da 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence : is : ication avec comité de conférence de conférence	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conferenc A é de lecture ce avec cor	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la co À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Autre 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence de conférence	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conferenc A é de lecture ce avec cor	lustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence de conférence	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conferenc A é de lecture ce avec cor	Iustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec mité de lec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar Tatut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp 	O Techniq nis pour pur re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence) : ations	Light Meta 2007-09-2 Conference A é de lecture ce avec con ce sans con	Iustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec mité de lec mité de lec	service lemment, veuillez i CNRC ogy Conference 20 Lieu : lings é par votre adjointe.	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp Jtres informa Partenaires : 	O Techniq nis pour pu re (abstract) 5411-G ans onférence : is : ication avec comité de conférence) : itions	Light Meta 2007-09-2 Conference A ê de lecture ce avec con ce sans con	Iustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceeco tre compléte mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec	service	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp utres informa Partenaires : Déclaration d'inver 	O Techniq nis pour pur re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence) : ation : et déposée :	Light Meta 2007-09-2 Conference A é de lecture ce avec con ce sans con GM / Uc Non Non	Iustriel de s mis précéd CNRC d al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec mité de lec	service	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar Tatut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp utres informa Partenaires : Déclaration d'inver Demande de breve Si non, explications 	O Techniq nis pour pur re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence) : ation : et déposée :	Light Meta 2007-09-2 Conference A é de lecture ce avec con ce sans con GM / Uc Non Non	Iustriel de s mis précéd CNRC d al Technolo 24 ce Proceec tre compléte mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec	service	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp Utres informa Partenaires : Déclaration d'inver Demande de breve 	O Techniq mis pour pur re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence) : ation : et déposée : s :	Light Meta 2007-09-2 Conference A é de lecture ce avec con ce sans con GM / Uc Non Non-pat	Iustriel de s mis précéd CNRC d al Technolo 24 ce Proceeco tre compléte mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec mité de lec	service	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An	nible. née cal. blication
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar atut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp Utres informa Partenaires : Déclaration d'inver Demande de breve Si non, explications Cuesson 	O Techniq mis pour pur re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence) : ation : et déposée : s :	blication a été sour Light Meta 2007-09-2 Conference A é de lecture ce avec con ce sans con GM / Uc Non Non-pat	Iustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceeco tre compléte mité de lec mité de lec mité de lec ofT Dar Pay centable res	service	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q Veuillez l'aviser lo	éros : C Date : Date de publication 2007-09-24	sera dispo An Pu	nible. née cal. blication 2007
 Rapport Autre Document sour Si un sommai IMI 2007-11 À présenter da le cadre de : Date de la ca À paraître dar Tatut de publi Revue ou livre Procès-verbal de Procès-verbal de Autre Paru dans (vol. pp utres informa Partenaires : Déclaration d'inver Demande de breve Si non, explications 	O Techniq mis pour pur re (abstract) 5411-G ans onférence : ication avec comité de conférence) : ation : et déposée : s : 2000 3	Light Meta 2007-09-2 Conference A é de lecture ce avec con ce sans con GM / Uc Non Non-pat	Iustriel de s mis précéd CNRC al Technolo 24 ce Proceeco tre compléte mité de lec mité de lec mité de lec ofT Da Pay centable res	service	ndiquer les num 07 St. Sauveur, Q Veuillez l'aviser lo Veuillez l'aviser loDate	éros : C Date : Date : Date de publication	sera dispo An Pu	nible. née cal. blication

Can	che
Can	ada

1.

Canada

Institut des matériaux industriels

Industrial Materials Institute

Fiche d'information et d'autorisation pour documents internes, externes et conférences

Année <u>calendrier</u> 2007

No de projet	50-859-0					
Titre du document	Fracture to quasi.	load prediction	ctions for rads	adhesive	joints	subject
Statut du docum	ent Général					
Types de docum	ent			-2		******
Sommaire (Abstra	_	Écrit final suivra	? 🗌 Non 🗌	Si Oui Date		
Document soumis Si un sommaire (abs veuillez indiquer les	stract) a été soumis		1	CNRC		
À présenter dans le cadre de	Light	Metals T	Jechnolog y	Conference 37 Sauveur Date	1	
Date de la confére	ence <u>24-26</u>	Sep. 2007	Lieu	st sauveur	, QC	
À paraître dans	Conference	proceedile	9	Date	Sep. 2	2007
Rapport –)			
	☐ Industriel de se	ervice				
☐ Autre (spécifiez)	_					
☐ Procès-verbaux Si un sommaire (ab veuillez indiquer les Paru dans (vol. pp	s numéros IMI o)	ns comité de lec s précédemmen 	ture t, 5411 - G	_CNRC <u>CNRC</u>		
Partenaires G/VI Déclaration d'invention		Date				
Demande de brevet dé		Pays				
	Non-Patente		urch resul	ts		
anneannachannachan Auteur (nom prénom) * <u>Eskandarian</u>	Mojtaba s e					Date 2/12/06
Papini Marce Spelt Jan K. Azari Shahrok			-	Spot	30	<u>////</u> 66
* Je certifie, en tant que p						
Approbations:			*******		101010101010101010101010101010	*********
Signature Chef de groupe	Date	Signatu Directeur de		e Signatu Directeur g		Date
Numé	ro IMI <u>2007</u>	- 115411	<u>- 6-</u> CNF	RC 48397		

Conseil national de National Research recherches Canada Council Canada

Industrial Materials

Institute

Institut des matériaux industriels

Fiche d'information et d'autorisation СТА pour documents internes, externes et conférences Auteurs Premier Auteur principal pour l'IMI auteur Date Commande Signature Prénom Centre Centre Nom publication sign. financ. de coût interne 859 08/14/2007 * 502305 Eskandarian M. 502300 **Autres auteurs** Externe nê Ryerson Univ. Papini Marcello Jan K. U. of Toronto Spelt Shahrokh U. of Toronto Azari -* Je certifie, en tant que premier auteur, que j'ai vérifié avec le(s) partenaire(s) qu'il(s) n'a (n'ont) pas d'objection à ce document. Document Ę, Titre Fracture load predictions for adhesive joints subject to quasi-static loads Statut de distribution Général Type O Sommaire (abstract) Écrit final à suivre : O Oui
 Non Si oui, date : O Rapport O Technique O Industriel de service O Autre Ocument soumis pour publication Si un sommaire (abstract) a été soumis précédemment, veuillez indiquer les numéros : IMI 2007-115411-G CNRC CNRC Light Metal Technology Conference 2007 À présenter dans le cadre de : Date de la conférence : 2007-09-24 Lieu : St. Sauveur, QC À paraître dans : Conference Proceedings 2007-09-24 Date : Statut de publication A être complèté par votre adjointe. Veuillez l'aviser torsque l'information sera disponible. \boxtimes Revue ou livre avec comité de lecture Date de Année cal. Procès-verbal de conférence avec comité de lecture publication publication 2007-09-24 2007 Procès-verbal de conférence sans comité de lecture C Autre Paru dans (vol. pp) :

Partenaires :	GM / UofT			· ·	
Déclaration d'invention :	Non	Date :	1999, 1997 Mar Inda Ager (1997 Mar Salariya Print Santasan Anadagan)	ingenyenne	
Demande de brevet déposée :	Non	Pays :	40-1987-000 Matching - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990	an Magazari ya wa sa	
Si non, explications :	Non-paten	table research result	ts		an canada na Falander ann an sin an
pprobations		A CARACTAR AND A CARACTAR			ter de la constante de la const La constante de la constante de
Signature	Date	Signature	Date	Signature	Date

Conseil national de recherches Canada

۷

a.

È.

National Research Council Canada

Institute

Industrial Materials

Institut des matériaux industriels

Fiche d'information et d'autorisation pour documents internes, externes et conférences **CTA**

uteur principa Nom	Prénom	Centre financ.	Centre de coût	Commande interne	Signature	Dai sig		uteur licatio
Eskandarian	М.	502300	502305	859		08/	14/2007	*
utres auteurs				Externe				,
Papini	Marcello	[Ryerson Univ.				
Spelt	Jan K.	34		U. of Toronte	A CONTRACTOR	/:		
Azari	Shahrokh	<u> </u>		U. of Toronto	Sh. Arau/	08	511610	7
							i di secon	
							···· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
				·		····	···· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
		1		See.		· .		
	-	1	· · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			- I
ocument itre Fracture load pre								
Statut de distr	ibution	Général						
						経営		
[ype								
-	stract)	Écrit	final à suivr	re:OOui O●N	lon Sioui, da	ate :		
O Sommaire (abs	i tract) O Technic				lon Si oui, da	ate :		
O Sommaire (abs	•				lon Si oui, da	ate :		
O Sommaire (abs O Rapport O Autre	O Technic	iue Oln	dustriel de		lon Si oui, da	at e :		
O Sommaire (abs O Rapport O Autre O Document sou Si un <u>somma</u>	O Technic mis pour pu ire (abstract	ue O In	dustriel de mis précéc	service Iemment, veuillez	lon Si oui, da indiquer les numéros :	ate :		
O Sommaire (abs O Rapport O Autre I Document sou	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G	ue O In Iblication	dustriel de imis précéc CNRC	service Iemment, veuillez	indiquer les numéros :	ate :		
Sommaire (abs Rapport Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de :	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G dans	ue O In Iblication) a été sou Light Met	dustriel de I <u>mi</u> s précéc CNRC tal Technol	service lemment, veuillez CNRC	indiquer les numéros :	ate :		
Sommaire (abs Rapport Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de :	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G	ue O In Iblication) a été sou Light Met	dustriel de I <u>mi</u> s précéc CNRC tal Technol	service lemment, veuillez CNRC ogy Conference 2	indiquer les numéros :	ate :		
Sommaire (abs Rapport Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de :	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence :	ue O In Iblication) a été sou Light Met 2007-09-	dustriel de I <u>mi</u> s précéc CNRC tal Technol	service lemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu	indiquer les numéros : 007		2007-09-24	
O Sommaire (abs O Rapport O Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G dans conférence : ns :	ue O In blication) a été sou Light Met 2007-09- Conferen	dustriel de Imis précéc CNRC Ral Technol 24 nce Proceet	service demment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings	indiquer les numéros : 007 : St. Sauveur, QC	Date : [
Sommaire (abs Rapport Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de publ	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication	ue O In blication) a été sou Light Met 2007-09- Conferen A	dustriel de imis précéc CNRC tal Technol 24 ace Proceet être complét	service demment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'int	Date : [disponible.	Į
O Sommaire (abs O Rapport O Autre Document sou Si un <u>somma</u> IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de pub	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication avec comité	ue O In blication) a été sou Light Met 2007-09- Conferen A de lecture	dustriel de mis précéc CNRC tal Technol 24 nce Proceec être complét e	service Iemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings ie par votre adjointe	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'int Date	Date : [D Cal.
O Sommaire (abs O Rapport O Autre ♥ Document sou Si un <u>somma</u> IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de publ □ Revue ou livre ⊠ Procès-verbal	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication avec comité de conféren	lue O In iblication) a été sou Light Met 2007-09- Conferen A de lecture ce avec co	dustriel de mis précéc CNRC al Technol 24 ace Proceec être complét e pomité de lec	service Iemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings ie par votre adjointe cture	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi	Date : [formation sera de	disponible. Année	cal. tion
O Sommaire (abs O Rapport O Autre Document sou Si un <u>somma</u> IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de pub	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication avec comité de conféren	lue O In iblication) a été sou Light Met 2007-09- Conferen A de lecture ce avec co	dustriel de mis précéc CNRC al Technol 24 ace Proceec être complét e pomité de lec	service Iemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings ie par votre adjointe cture	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi	Date : [formation sera de leation	disponible. Année publica	cal. tion
Sommaire (abs Rapport Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de publ Revue ou livre Procès-verbal Procès-verbal	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication avec comité de conféren de conféren	lue O In iblication) a été sou Light Met 2007-09- Conferen A de lecture ce avec co	dustriel de mis précéc CNRC al Technol 24 ace Proceec être complét e pomité de lec	service Iemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings ie par votre adjointe cture	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi	Date : [formation sera de leation	disponible. Année publica	cal. tion
O Sommaire (abs O Rapport O Autre ● Document sou Si un <u>somma</u> IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de publ □ Revue ou livre ⊠ Procès-verbal □ Procès-verbal □ Autre Paru dans (vol. pp	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication de conféren de conféren de conféren	lue O In iblication) a été sou Light Met 2007-09- Conferen A de lecture ce avec co	dustriel de mis précéc CNRC al Technol 24 ace Proceec être complét e pomité de lec	service Iemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings ie par votre adjointe cture	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi [2007	Date : [formation sera de leation	disponible. Année publica 200	cal. tion 7
Sommaire (abs Rapport Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 Å présenter c le cadre de : Date de la c Å paraître da tatut de publ Revue ou livre Procès-verbal Procès-verbal Autre Paru dans (vol. p	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication de conféren de conféren de conféren	Light Met 2007-09- Conferent à de lecture ce avec co ce sans co	dustriel de <u>umis précéc</u> CNRC tal Technol 24 ace Proceeu être complét e pomité de lec pomité de lec	service Iemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings ie par votre adjointe cture	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi	Date : [formation sera de lcation -09-24	disponible. Année publica	cal. tion 7
O Sommaire (abs O Rapport O Autre Ø Document sou Si un <u>somma</u> IMI 2007-1 Å présenter of le cadre de la of Å paraître da tatut de publ □ Revue ou livre Ø Procès-verbal □ Procès-verbal	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication avec comité de conféren de conféren de conféren	Light Met 2007-09- Conferen A de lecture ce avec co ce sans co	dustriel de mis précéc CNRC tal Technol- 24 ace Procees être complét e pomité de lec pomité de lec	service	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi [2007	Date : [formation sera de lcation -09-24	disponible. Année publica 200	cal. tion
Sommaire (abs Rapport Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 Å présenter c le cadre de : Date de la c Å paraître da tatut de publ Revue ou livre Procès-verbal Procès-verbal Autre Paru dans (vol. p	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G lans conférence : ns : lication avec comité de conféren de conféren de conféren	Light Met 2007-09- Conferent à de lecture ce avec co ce sans co	dustriel de mis précéc CNRC tal Technol- 24 ace Procees être complét e pomité de lec pomité de lec	service Iemment, veuillez CNRC ogy Conference 2 Lieu dings ie par votre adjointe cture	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi [2007	Date : [formation sera de lcation -09-24	disponible. Année publica 200	cal. tion 7
O Sommaire (abs O Rapport O Autre Ø Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter of le cadre de la of À paraître da tatut de publ □ Revue ou livre Ø Procès-verbal □ Procès-verbal	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G fans conférence : ns : lication avec comité de conféren de conféren de conféren de conféren	Light Met 2007-09- Conferen A de lecture ce avec co ce sans co GM / U No	dustriel de mis précéc CNRC 24 ace Procees être complét e pomité de lec pomité de lec pomité de lec pomité de lec	service	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi [2007	Date : [formation sera de lcation -09-24	disponible. Année publica 200	cal. tion 7
 O Sommaire (abs O Rapport O Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1° À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de publ Revue ou livre Procès-verbal Procès-verbal Procès-verbal Procès-verbal Procès-verbal Procès-verbal Procès-verbal Procès-terbal Procès-terbal Procès-verbal Procès-verbal Procès-terbal Procès-terbal	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G dans conférence : ns : lication avec comité de conféren de conféren de conféren p) : ations ention : vet déposée	Light Met 2007-09- Conferent A a de lecture ce avec co ce sans co GM / U Noi	dustriel de mis précéc CNRC tal Technol 24 ace Procees être complét e pomité de lec pomité de lec pomité de lec pomité de lec n Da n Pa	service	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi [2007	Date : [formation sera de lcation -09-24	disponible. Année publica 200	cal. tion 7
 O Sommaire (abs O Rapport O Autre Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de publ Revue ou livre Procès-verbal Procès-verbal Procès-verbal Autre Paru dans (vol. pi tutres inform Partenaires : Déclaration d'inve Demande de brev Si non, explication 	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G tans conférence : ns : lication avec comité de conféren de conféren p) : ations ations ations ations	Light Met 2007-09- Conferent A a de lecture ce avec co ce sans co GM / U Noi	dustriel de mis précéc CNRC lai Technol 24 ace Procees être compléi e omité de lec omité de lec omité de lec omité de lec omité de lec omité de lec omité de lec	service	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi [2007	Date : [formation sera de lcation -09-24	disponible. Année publica 200	cal. tion 7
Document sou Si un somma IMI 2007-1 À présenter c le cadre de : Date de la c À paraître da tatut de publ Revue ou livre Procès-verbal Procès-verbal Autre Paru dans (vol. pi sutres inform Partenaires : Déclaration d'inve Demande de brev	O Technic mis pour pu ire (abstract 15411-G fans conférence : ns : lication avec comité de conféren de conféren de conféren de conféren settions ations	In the second se	dustriel de mis précéc CNRC 24 ace Procees être complét e omité de lec omité de lec omité de lec omité de lec omité de lec omité de lec	service	indiquer les numéros : 007 : [St. Sauveur, QC Veuillez l'aviser lorsque l'in Date publi [2007	Date : [formation sera de ication -09-24	disponible. Année publica 200	cal. tion 7

FRACTURE LOAD PREDICTIONS FOR ADHESIVE JOINTS SUBJECT TO QUASI-STATIC LOADS

M. Eskandarian¹, S. Azari², M. Papini³, and J.K. Spelt^{2*}

1) Aluminium Technology Centre, Industrial Materials Institute, National Research Council Canada, 501 boul. de l'Univ., Chicoutimi, Québec, Canada G7H 8C3

2) Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 5 King's College Road, Toronto, Ontario, Canada M5S 3G8, spelt@mie.utoronto.ca

3) Department of Mechanical and Industrial Engineering, Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, Ontario, Canada M5B 2K3

* Corresponding author

Abstract

The applicability of the fracture envelope approach for fracture load predictions of adhesive joints was investigated by carrying out a series of quasi-static fracture tests on various adhesive specimens. The fracture envelopes of aluminum and steel adhesive systems were determined from the mixed-mode tests on double cantilever beam specimens (DCB). The results were then used to predict the ultimate strength of more practical adhesive joints such as cracked lap shear (CLS) and single lap shear (SLS) joints. Good agreement was observed between the predicted and experimental fracture loads of tested adhesive joints.

Introduction

For many years, lightweight materials for structural and functional applications have been of interest in various industries. Recent production of composite materials together with the advancement of light metal engineering motivated the development of new features for joining dissimilar materials. In such a situation, the traditional joining technologies such as welding, soldering, and mechanical fastening are either not applicable or increase the weight of the assemblies. The appropriate combination of the usage of lightweight materials such as aluminum or magnesium and light joining techniques such as adhesive bonding can optimize production cost, performance and energy consumption if the strength, durability and corrosion considerations are taken into account. In the transportation industries, aluminum has been widely used in non-structural assemblies. In recent years, the usage of high-strength aluminum alloys was extended to some structural parts, which causes 40% to 60% automobile mass reduction

when replacing steel or cast iron components [1]. The joining of aluminum parts was a challenging subject for many years. The use of adhesive joints for structural design has been considered as an alternative to traditional joints in aerospace and construction industries since the 1940s [2]. Adhesive jointing improves the fatigue vibration performance and damping in components; diminishes corrosion problems for dissimilar materials regardless of size and shape; reduces the stress concentrations in complex geometries while providing structural integrity. Adhesive bonds give a smoother appearance to designs and enable a reduction in material thicknesses in lighter materials when required. However, care must be taken for the design of adhesive joints especially in the presence of environmental degradation.

Analysis and formulation

A generalized engineering approach to fracture load predictions for adhesive joints was presented in Refs. [3], [4] and [5]. The approach is based on the premise that the strength of any adhesive system can be characterized by an experimentally measured fracture envelope. The term refers to the variation of critical energy release rate, G_c , as a function of the loading mode (mode ratio or phase angle ψ). The concept of a cracked adhesive sandwich is used in the calculation of strain energy release rate G for the adhesive joint. The bonded overlap is isolated from the surrounding structure as a free-body as shown in Figure 1. The von-Karman beam theory of large deformation was applied to determine the response of the joint as the reacting forces and moments on the boundary of the free body. The energy release rate, G, for the cracked adhesive sandwich was then calculated using a closed-form expression of *J*-integral assuming the materials undergoes the finite elastic deformations under the loading configuration. For planar adhesive joints, the mode ratio or phase angle ψ is analytically calculated from the ratio of the mode components G_{II} and G_I , which is related to joint geometry for any particular loading configuration.



Figure 1: The reacting forces and moments on the cracked adhesive sandwich element.

The calculated energy release rate and the phase angle for any adhesive joint system then represent an energy point on the plane of a fracture envelope. In a typical quasi-static loading condition, a joint can be considered safe, transient or unsafe if the corresponding energy point lies within, coincides or is above the fracture envelope of the adhesive system, respectively. The concept of a cracked adhesive sandwich element makes the approach applicable to a variety of adhesive joints including the standard double-cantilever-beam (DCB) joints or the more practical ones such as the single-lapshear (SLS) and cracked-lap-shear (CLS) joints. The detailed energy release rate formulations for DCB, CLS, and SLS joints can be found in Refs [3] to [5].

Experiments and results

In this work, the fracture envelopes of a heat-cured toughened epoxy adhesive system were measured by conducting a series of quasi-static fracture tests on aluminum and steel double cantilever beam (DCB) specimens. The results were then used to predict the quasi-static critical loads of CLS and SLS adhesive joints made of aluminum adherends. The sample sizes and materials were chosen carefully to ensure the adherends underwent only elastic deformation during the quasi-static tests. The DCB specimens used for the tests at lower mode ratios were fabricated from aluminum 6061-T651 and steel AISI 1018. Due to the elevated load levels at higher mode ratios, the CLS, SLS and some of the DCB specimens were made of the aluminum 7075-T651 and the steel AISI 4140 flat bars. The aluminum parts were abraded, degreased and then surface pretreated by following the P2etch surface preparation technique, ASTM D265101. The steel parts, however, were only abraded and degreased prior to bonding. The aluminum or steel flat bars were then bonded using a toughened epoxy adhesive and cured in the oven at 180°C. The bondline thickness of 0.4 mm was selected and controlled by placing two steel wires, one prior to precrack and another one close to the end of specimens. The bonded specimens were kept in the oven over night to be gradually cooled down to room temperature. The both sides of specimens were then milled using a four-blade carbide cutter to remove both the excess adhesive and the round edges of the flat bars. The typical final finished DCB and CLS specimens are shown in Figure 2. The schematic representations of different adhesive joints and the geometry of the tested DCB, CLS and SLS specimens can be found in Appendix A.



Figure 2: The finished aluminum and steel DCB (left) and aluminum CLS specimens (right) tested.

The DCB specimens were first tested using the load jig of Ref. [3] at different mode ratios to determine the fracture envelope of the adhesive systems. The cohesive fracture through the adhesive layer was observed for aluminum DCBs while some local interfacial failures occurred for steel specimens. During the test, the specimens were loaded with a constant crosshead speed of 1.5 mm/min up to the point of crack propagation and were then unloaded. The critical energy release rate G_c corresponding to this point was calculated from the crack length, fracture load, specimen geometry, and the mechanical properties of the adhesive and adherends. The analytical method based on large deformation beam theory was used for the energy calculations. The procedure was then repeated for different crack lengths up to the end of the DCB specimen. The typical R-curves resulting from the quasi-static fracture tests on aluminum and steel DCBs under mode-I loading are compared in Figure 3. The average value of G_c in the plateau region of each curve represents an energy point on the plane of the fracture envelope of the adhesive system for the corresponding mode ratio. The fracture envelope of adhesive system is then obtained by repeating the fracture tests at different mode ratios.

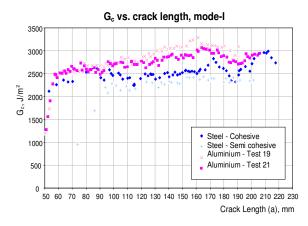
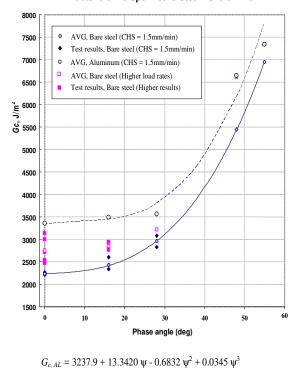


Figure 3: R-curves for aluminum and steel DCBs.

In Figure 4, the fracture envelopes of steel and aluminum adhesive systems are compared. The differences in G_c of aluminum and steel systems decreased at higher phase angles. The testing parameters such as the loading rate also contribute to this difference, especially when more viscoelastic adhesives are used. Higher values of G_c were measured for the tests at higher loading rates. The typical results are shown in Figure 5 for the steel adhesive system.



Fracture envelope - bare steel vs. aluminum

Figure 4: Fracture envelopes of aluminum and steel adhesive systems.

 $G_{c, ST} = 2357.5 + 0.3847 \ \psi + 0.1509 \ \psi^2 + 0.0209 \ \psi^3$

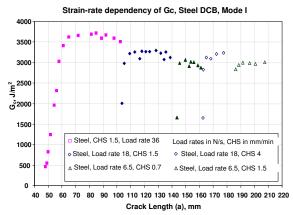


Figure 5: Strain-rate dependency of G_c measured with steel DCBs.

A third-order polynomial curve was fitted on the data, giving G_c as a function of ψ (fracture envelope) as shown at the bottom of Figure 4. To verify the accuracy of the model for fracture load predictions, six CLS and eight SLS joints of different geometries were made from 1"×3/4" aluminum 7075-T651 flat bars. The specimens were then loaded to ultimate fracture on a servohydraulic load frame under constant crosshead speed (CHS). A series of ANSYS[™] finite elements analyses have been conducted in order to find the appropriate CHS for CLS and SLS tests to provide similar strain rates in the adhesive layers of CLS, SLS and DCB specimens at the same mode ratio. The CHS of 0.25 mm/min was typically selected for the CLS tests based on the results of FE models to give strain rates equal to those in the DCB specimens tested at 1.5 mm/min, as typically shown in Figure 6.

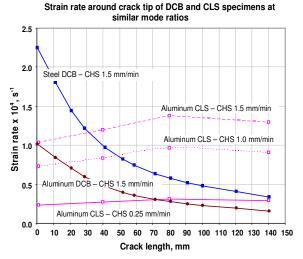


Figure 6: Strain-rate variation in adhesive layer of DCB and CLS specimens versus crack length.

The crack initiation and crack growth on both sides of the joint overlap were examined by using two CCD cameras. It was observed that the crack initiated at lower load levels, but the final catastrophic failure occurred after a subcritical crack of about 50 mm, which was almost equal to the length of the rising part of the DCB R-curve at a similar mode ratio as measured using the fracture envelope load jig. The CLS and SLS joint geometries were then modified by the length of the subcritical crack, which is 50 mm from the point of crack initiation. The initial and the ultimate fracture loads for the six CLS and eight SLS experiments are given in Table 1 and 2. Good agreement was observed between the predicted and experimental fracture loads.

Table 1: Predicted and experimental measurementof fracture loads for aluminum CLS specimens.

Specimen	P _{Initial} (kN)	P _{Exp} (kN)	P _{Pred} (kN)	Error % (P _{Exp} -P _{Pred}) / P _{Exp}
CLS 12A	46.5	66.0	61.3	-7
CLS 12B	41.0	65.0	61.1	-6
CLS 12 C	47.8	65.9	74.5	13
CLS 13A	42.0	64.2	63.8	-1
CLS 13B	53.4	65.2	56.6	-13
CLS 13C	40.7	71.3	68.9	-3

 Table 2: Predicted and experimental measurement

 of fracture loads for aluminum SLS specimens.

Specimen	P _{Initial} (kN)	P _{Exp} (kN)	P _{Pred} (kN)	Error % (P _{Exp} -P _{Pred}) / P _{Exp}
SLS 1A	34.0	38.4	41.0	-6.6
SLS 1B		39.7	39.6	0.2
SLS 2A	28.0	45.3	47.6	-5.8
SLS 2B		43.8	44.6	-1.9
SLS 3A		45.7	44.6	2.4
SLS 3B		50.6	49.8	1.6
SLS 4A	16.5	35.6	34.4	3.4
SLS 4B	30.2	38.5	38.2	0.8

Conclusions

The accuracy of the fracture envelope approach for fracture load predictions of adhesive joints was evaluated for a heat-cured toughened adhesive system by performing a series of quasi-static fracture tests on DCB and CLS specimens made of aluminum and steel. The loading rate was found to be an important parameter in joint behavior when a tough and viscoelastic adhesive is used. Good agreement was observed between the predicted and experimental fracture loads of CLS joints made of aluminum when tested at similar loading rate conditions.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge General Motors of Canada and the Aluminium Technology Centre of the National Research Council of Canada for their financial support.

References

[1] William F. Powers, Advanced Materials and Processes, May 2000, pp. 38 – 41

[2] K.L. Mittal, Adhesive joints: Formation, Characteristics and testing, 2, pp 159 – 199

[3] G. Fernlund and J.K. Spelt, Failure load prediction of structural adhesive joints, Int. J. Adhes. Adhes., 1991, 11, pp. 213 – 220

[4] G. Fernlund and. J.K. Spelt, Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints, Comp. Sci. Technol., 1994, 50, pp. 441–449

[5] G. Fernlund, M. Papini, D. McCammond and J.K. Spelt, Fracture load predictions for adhesive joints, Compos. Sci. Technol., 1994, 51, pp. 587 – 600

Appendix A

The DCB specimens were made of aluminum and steel $\frac{1}{2}$ " \times $\frac{3}{4}$ " flat bars, while the 1" \times $\frac{3}{4}$ " flat bars were used for the fabrication of CLS specimens due to higher load levels. The final finished geometry of tested DCB and CLS joints are given in Table A1 and A2. The schematic representations of the specimens are also shown in Figure A1 to A3.

Specimen	Initial Condition	Material	Width (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)
CLS 12A	Lump, pre	Alum.	17.9	125	101	-
CLS 12B	Lump	"	17.2	296	122	-
CLS 12 C	Fillet	"	17.4	288	160	-
CLS 13A	Fillet		17.5	180	120	-
CLS 13B	Fillet, pre		17.9	310	140	-
CLS 13C	Lump	"	17.6	300	100	-

Table A1: Geometry and initial condition of CLS

specimens

Table A2: Geometry and initial condition of SLS specimens

Specimen	Initial Condition	Material	Width (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)
SLS 1A	Fillet	"	16.8	197	99	120
SLS 1B	Fillet	"	16.7	159	108	82
SLS 2A	Precracked	"	17.4	172	121	143
SLS 2B	Lump	"	16.7	207	123	148
SLS 3A	Fillet	"	17.3	192	125	145
SLS 3B	Lump	"	17.5	158	153	122
SLS 4A	Fillet	"	17.7	217	87	93
SLS 4B	Lump	"	17.7	174	97	102



Figure A1: The schematic representations of DCB adhesive specimen

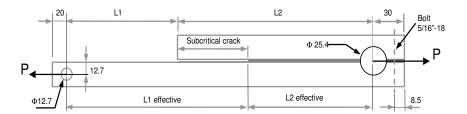


Figure A2: The schematic representations of CLS adhesive specimen

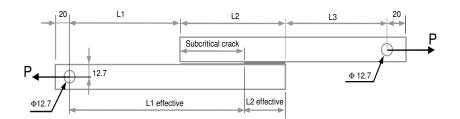


Figure A3: The schematic representations of SLS adhesive specimen