

Mesure des paramètres de contact à une interface de contact électrothermique imparfait

Hacène MOKRANI, Brahim BOUROUGA

Laboratoire de Thermocinétique, UMR CNRS 6607, E.P.U.N., rue Christian Pauc,
La Chantrerie, B.P. 90604, 44306 NANTES, Cedex 03, France
hacene.mokrani@univ-nantes.fr

Résumé - L'objet de la présente communication est l'étude expérimentale du contact électrothermique imparfait afin d'estimer les trois paramètres décrivant la condition de liaison thermique à l'interface de contact, à savoir, la résistance thermique de contact (R_{TC}), le flux généré à l'interface (φ_g) et la fraction de ce dernier (α) qui participe au saut de température. On s'intéresse plus particulièrement à α . Les expériences sont menées sur des contacts métalliques statiques en régimes stationnaire et transitoire. On étudie le comportement de α et de R_{TC} sous l'influence de la nature des matériaux, des conditions aux frontières extérieures, de la pression de contact ainsi que des états de surfaces en contact pour les deux régimes thermiques cités.

Nomenclature

T_i : température (K)

R_{TC} : résistance de contact ($m^2.K/W$)

L_i : longueur du cylindre i (m)

D : diamètre du cylindre i (m)

C_p : chaleur spécifique (J/KgK)

x_{ij} : position de thermocouple (m)

Ra : rugosité (μm)

cc : coefficient de corrélation

Symboles grecs

α : coefficient de partage du flux généré

φ_g : flux généré à l'interface (W/m^2)

σ : conductivité électrique ($\Omega^{-1}m^{-1}$)

ρ : masse volumique (Kg/m^3)

λ_i : conductivité thermique du matériau i (W/mK)

Indices :

$i=1,2$: indice relatif aux deux cylindres

1. Introduction

Dans le domaine des sciences de l'ingénieur, la simulation numérique est en plein essor et nécessite des données que fournissent naturellement des mesures appropriées ou des modèles représentatifs proposés. C'est le cas de nombreux problèmes de thermomécaniques où il convient de décrire correctement les conditions aux interfaces de contact et notamment la condition thermique (contact électrothermique, contact glissant, ...). La description de la condition de liaison thermique à une telle interface nécessite la connaissance de trois paramètres : la résistance thermique de contact ou RTC notée R_{TC} , le flux généré à l'interface noté φ_g ainsi que le coefficient de partage de flux généré à l'interface α . A ce jour, le paramètre α reste mal connu. Contrairement à la R_{TC} qui a fait l'objet de nombreuses études, il n'a pas bénéficié de l'intérêt qu'il mérite. Dans une étude récente, un modèle décrivant le coefficient α a été proposé [1]. Ce modèle dispose que le partage du flux reste indépendant de la structure de l'interface, de la nature du fluide interstitiel ainsi que des conditions thermiques extérieures. Il a été validé partiellement par voie expérimentale dans le cas du soudage par point [2, 3]. Cette validation s'est poursuivie par voie de simulation numérique dans le cas d'un tube de flux et de courant dans lequel on fait varier la géométrie de contact et la nature du fluide interstitiel [4]. Ce test numérique vient valider encore une fois le modèle en référence [1].

Toujours dans la perspective de validation du modèle de α ou de son amélioration, un dispositif expérimental permettant l'étude du contact électrothermique statique en régime

stationnaire et transitoire a été conçu et réalisé. On étudie le comportement de α sous l'influence des différents paramètres de contact en régime permanent et transitoire. Dans le présent papier, nous présentons le principe de mesure, le dispositif expérimental et les premiers résultats obtenus en régime stationnaire.

2. Principe de mesure

Les deux échantillons en contact imparfait ont une même géométrie cylindrique et sont montés alignés et serrés en appliquant un effort normal F . On dispose à leurs extrémités deux boîtes à eau portées à des températures différentes de manière à ce qu'un gradient thermique significatif s'établisse selon l'axe des cylindres, sans passage de courant ($\varphi_g=0$). La mesure du champ de température dans les deux cylindres permet d'estimer la RTC.

Dans la seconde étape, on fait circuler un courant électrique dans le dispositif en imposant une différence de potentiel entre les deux extrémités de cylindres. La résistance électrique de contact est à l'origine d'une dissipation par effet Joule de densité φ_g à l'interface ($x=0$). Les relevés de température permettent de déterminer le terme source φ_g et le paramètre α .

L'enregistrement de la réponse transitoire des cylindres à un passage de courant fort permet de déterminer également ces trois paramètres de manière simultanée. On a alors recours à une technique inverse faisant appel à l'algorithme de minimisation de Gauss-Newton [5]. On distinguera les résultats de l'estimation de R_{TC} et α au début de régime transitoire aux temps courts de ceux de l'estimation aux temps longs. La différence réside dans le fait qu'aux temps courts, l'interface n'est pas soumise aux sources thermiques appliquées aux frontières.

Cette démarche permet d'abord de vérifier la précision d'estimation de la R_{TC} dont la valeur devrait rester inchangée du fait de son caractère intrinsèque, la microstriction étant supposée pleinement développée à ces échelles de temps. Elle permet également d'étudier le comportement de α sous l'influence ou non des conditions aux frontières extérieures.

3. Le dispositif expérimental

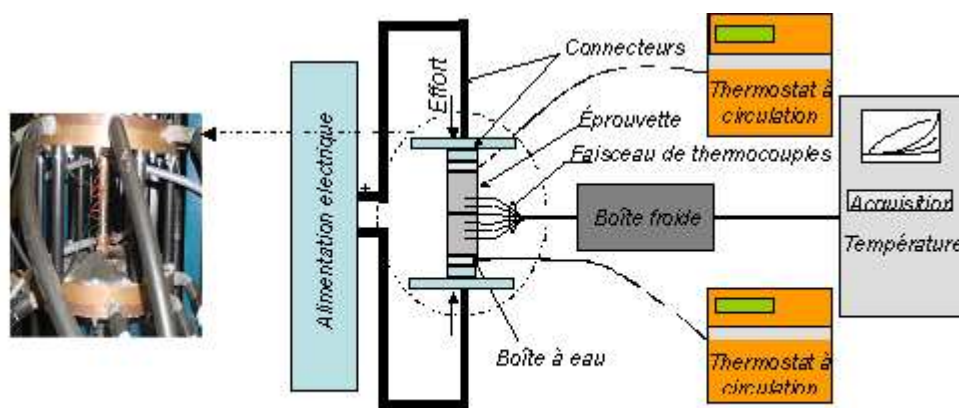


Figure 1 : Dispositif expérimental

Le dispositif de mesure se compose des éléments principaux suivants : deux échantillons cylindriques en contact imparfait compris entre deux boîtes à eau thermostatées. L'ensemble est en compression entre deux connecteurs en cuivre massif de très faible résistance électrique. L'effort de compression est appliqué par un bras de levier supportant des poids marqués. Le courant est fourni au connecteur par une alimentation électrique stabilisée faible

tension/haute intensité via des câbles électriques multibrins de diamètre 18 mm (voir photo détail). Les cylindres accueillent six thermocouples chacun, le long de leur axe. Une boîte froide abritent les soudures froides des thermocouples. Un multimètre convertisseur de grande précision et un scanner de type Keithley 2000 et 2001 assurent l'acquisition des données.

4. Résultats expérimentaux

4.1 Essais de reproductibilité

4.1.1 La reproductibilité de la mesure de température

Sur la figure 2 et 3 sont représentés les enregistrements en régime permanent des températures des six essais sans et avec passage du courant. Les 6 essais sont réalisés dans des conditions identiques avec une température froide (22°C) et une température chaude (40°C) imposées respectivement à la frontière extérieure gauche et droite des deux échantillons. Sont représentés les mesures réalisées par les 12 thermocouples implantés dans les deux échantillons en acier en contact imparfait maintenu à une pression égale à 3.72 MPa.

Les dispersions des températures avant et après le passage du courant présentent le même ordre de grandeur et ont une évolution comparable. L'écart moyen évolue de 0.04 à 0.14 K dans le premier cas et de 0.05 à 0.16 dans le second (passage du courant). Le niveau de valeur de la dispersion le plus élevé est situé naturellement dans la zone la plus froide de l'échantillon et reste tout à fait acceptable.

4.1.2 La reproductibilité de l'estimation des paramètres de contact

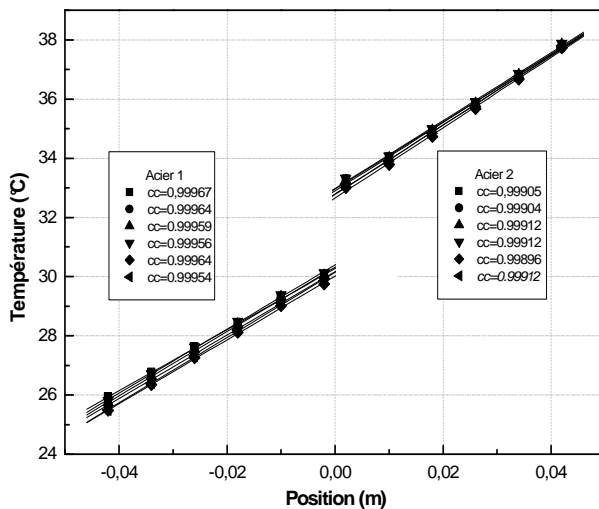


Figure 2 : Températures mesurées sans passage du courant

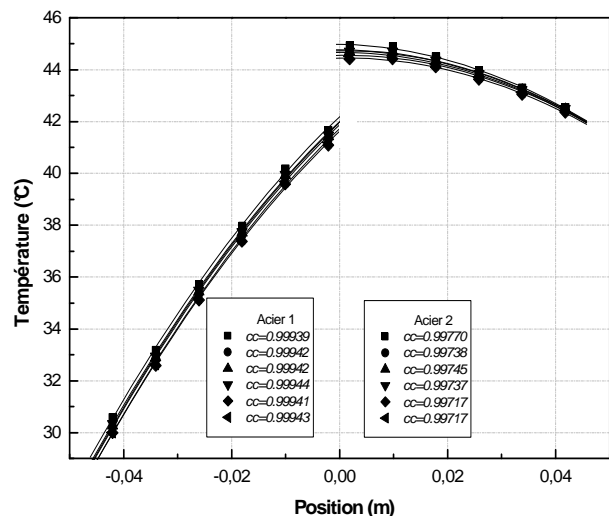


Figure 3 : Températures mesurées avec passage du courant

La reproductibilité des estimations a été vérifiée et étudiée en utilisant les mesures présentées sur les figures 2 et 3. Le tableau 1 regroupe les résultats de dépouillement des 6 essais de reproductibilité de chaque test. On retrouve les valeurs de R_{TC} , ϕ_g , α , leurs moyennes arithmétiques respectives ainsi que les écarts moyens qui les caractérisent.

A l'image de la reproductibilité des mesures, celles des estimations présentent de très faibles dispersions. R_{TC} , ϕ_g , et α estimés présentent respectivement 1.8, 0.6 et 0.9 % de dispersion. Ces valeurs très faibles des dispersions montrent une bonne fiabilité de l'expérience.

Essai N°	Essais sans passage de courant			Essais avec passage de courant					
	R_{TC} (Km^2/W)	\bar{R}_{TC} (Km^2/W)	dispersion (Km^2/W)	φ_g (W/m^2)	$\bar{\varphi}_g$ (W/m^2)	dispersion (W/m^2)	α	$\bar{\alpha}$	dispersion
1	$1.52 \cdot 10^{-3}$	$1.44 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-5}$ (1.8%)	3270	3211	20 (0.6%)	0.59	0.61	0.0055 (0.9%)
2	$1.44 \cdot 10^{-3}$			3215			0.61		
3	$1.42 \cdot 10^{-3}$			3207			0.61		
4	$1.42 \cdot 10^{-3}$			3209			0.61		
5	$1.43 \cdot 10^{-3}$			3185			0.61		
6	$1.42 \cdot 10^{-3}$			3184			0.61		

Tableau 1 : Paramètres estimés pour les 6 essais identiques Acier/Acier

Le calcul d'erreur est mené en supposant que toutes les sources d'erreur sont indépendantes les unes des autres. L'incertitude sur une estimation dépend de deux catégories de paramètres à savoir, les paramètres mesurés (positions des thermocouples et températures mesurées) et les paramètres d'entrées (conductivité thermique, chaleur spécifique,...).

5. Analyse des résultats expérimentaux

5.1 Estimation de R_{TC} en fonction de la charge et de la nature des matériaux

La figure 4 présente les courbes de résistance thermique de contact R_{TC} estimées en fonction de la pression de contact. La R_{TC} est estimée pour trois couples de matériaux différents lors du chargement et du déchargement. A partir des surfaces vierges, on obtient d'abord la courbe d'adaptation monotone décroissante présentant des variations importantes dues aux déformations à la fois plastiques et élastiques que subissent les aspérités au niveau du contact. La courbe de R_{TC} estimées lors du déchargement traduit la diminution des déformations élastiques réversibles. La différence entre les deux courbes relatives à un couple de matériaux exprime le caractère irréversible des déformations plastiques survenues au cours du premier chargement et qui ont modifié de façon permanente la structure de l'interface. Quel que soit le couple de matériaux, on retrouve la même évolution de la R_{TC} qui diminue en fonction de la pression de contact atteignant son minimum à $P_C = 16 MPa$.

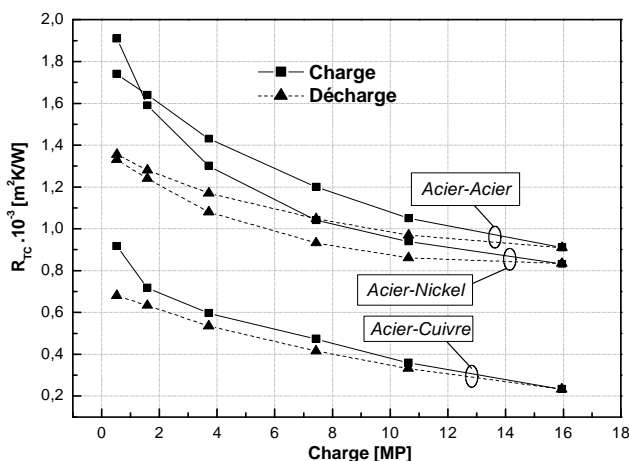


Figure 4 : Variation de R_{TC} en fonction de la charge

Echantillon	Acier	Nickel	Cuivre
λ (W/mK)	16.3	91	400
C_p (J/KgK)	500	444	385
ρ (Kg/m ³)	7960	8900	8960
R_a (μm)	10.7	13	7.5
Dureté Vickers	310	180	122

Tableau 2 : Caractéristiques des échantillons

L'interprétation de la disposition des courbes de R_{TC} sur le même graphe s'appuie sur les caractéristiques des différents contacts qu'on a regroupés sur le tableau 2. Il est évident que les

courbes relatives au couple acier/cuivre se situent dans une échelle de valeurs faibles en raison des valeurs de microdureté et de rugosité les plus faibles et celle de la conductivité harmonique la plus élevée. Par contre, les courbes relatives aux couples acier/acier et acier/nickel sont relativement proches et disposées de façon cohérente l'une par rapport à l'autre. Les courbes d'adaptation se croisent et révèlent la prédominance de la rugosité aux faibles pressions de contact. Aux fortes pressions, aussi bien sur la courbe d'adaptation que sur celle du déchargement, les valeurs de RTC sont gouvernées essentiellement par la microdureté et la conductivité harmonique. Ces premiers résultats en régime permanent, conformes à ceux de la littérature sur les résistances thermiques de contact, sont donc pertinents et confortent la fiabilité du dispositif réalisé.

5.2 Estimation de φ_g et α

Rappelons les équations de la condition de liaison thermique à une interface de contact siège d'une dissipation par effet Joule qui s'écrivent comme suit:

$$\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} \Big|_{x=0} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} \Big|_{x=0} = \varphi_g \tag{1}$$

$$-\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} \Big|_{x=0} + \alpha \varphi_g = \frac{T_1(x=0) - T_2(x=0)}{R_{TC}} \tag{2}$$

Sachant qu'il n'y a pas de formule consacrée à α , nous avons opté pour tester sa valeur en fonction de variation des sources thermiques extérieures assurées par les températures des circulations d'eau dans les boîtes à eau aux extrémités des deux cylindres. Les résultats peuvent permettre de se prononcer sur le caractère intrinsèque ou non du coefficient α du moins en régime permanent. Ainsi on choisit deux températures de circulation d'eau de 20 et 40 °C permettant trois combinaisons telles que cela est représenté sur la figure 5. Bien sûr φ_g et α ont été estimés également en fonction de la charge et de la nature des matériaux.

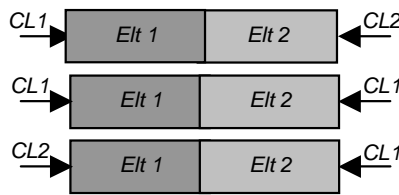


Figure 5 : Différentes températures imposées

5.2.1 Influence des conditions aux limites sur le paramètre α

Dans le cas de contact Acier/Acier avec deux températures identiques imposées, CL_1/CL_1 on obtient un système symétrique par rapport à l'interface, le flux généré à l'interface est divisé en deux fractions identiques ($\alpha=0.5$) ce résultat est vérifié expérimentalement avec une grande précision. Dans le cas où $CL_1 \neq CL_2$, φ_g n'est plus divisé en deux parts identiques. La valeur de α estimée est supérieure ou inférieure à 0.5 suivant que $CL_1 > CL_2$ ou $CL_1 < CL_2$. Dans le cas d'un déséquilibre thermique provoqué par CL_1 froide à gauche (20°C) et CL_2 chaude à droite (40 °C), on estime $\alpha=0.41$; c'est à dire que 40% du flux généré à l'interface s'écoule dans le cylindre de gauche. La part complémentaire de 60 % va à droite. On retrouve

le résultat inverse lorsqu'on inverse les deux températures imposées aux boîtes à eau. C'est le résultat de la dernière ligne du tableau 3. Ce résultat a été vérifié pour toutes les valeurs de la pression de contact et pour les trois couples de matériaux étudiés. On déduit que le paramètre α estimé en régime permanent est sensible aux conditions aux limites extérieures. De ce fait il apparaît comme un paramètre non intrinsèque à l'interface de contact.

CL	Acier/Acier			Acier/Nickel		
	R_{TC} (Km^2/W)	φ_g (W/m^2)	α	R_{TC} (Km^2/W)	φ_g (W/m^2)	α
CL1-CL2	1.44 10 ⁻³	3184	0.41	1.30 10 ⁻³	10209	0.20
CL1-CL1		-	0.50		10495	0.26
CL2-CL1		3148	0.59		10570	0.33

Tableau 3 : Résultats des estimations de φ_g et α

6. Conclusion

Un dispositif expérimental a été conçu et réalisé. Il permet l'étude du contact électrothermique statique en régime stationnaire et transitoire. Des essais de reproductibilité en régime stationnaire ont été menés afin de tester la fiabilité du dispositif. Les expériences ont donné lieu à des mesures de qualité et à des estimations de R_{TC} et α présentant une bonne reproductibilité.

Les premiers résultats expérimentaux montrent que l'évolution de la R_{TC} en fonction de la pression de contact est cohérente et conforme à la littérature sur le sujet.

Par ailleurs l'estimation de α montre que sa valeur dépend des conditions thermiques imposées aux frontières extérieures. Cela est vérifié systématiquement pour les trois couples de matériaux dans le cas du régime stationnaire. Cela montre le caractère non intrinsèque de α , du moins en régime permanent. Cette conclusion sera complétée par les résultats d'essais en régime transitoire qui seront dépouillés à deux échelles de temps : les temps courts, domaine de validité de l'hypothèse de milieux semi-infinis et temps longs du régime transitoire.

Références

- [1] G. Le Meur. Etude de la condition de liaison thermique à une interface de contact solide/solide siège d'une dissipation par effet Joule : application au soudage par résistance. *Thèse de Doctorat, Université de Nantes*, (2002).
- [2] G. Le Meur, B. Bourouga, J.P. Bardon. Microscopic analysis of interfacial electrothermal phenomena—definition of a heat generation factor. *Int. J. of Heat & Mass Transfer* 49 (2006) 387–401
- [3] G. Le Meur, B. Bourouga, T. Dupuy. Measurement of contact parameters at the electrode-sheet interface during spot welding process. *Sc. & Tech. of Welding and Joining*, vol. 8, issue 6, pp. 415-422 (2003).
- [4] H. Mokrani, B. Bourouga. Modèle de coefficient de partage du flux généré à une interface de contact électrothermique- approche microscopique en régime permanent. *JITH 2005- Tanger-Maroc* (15, 16 et 17 Novembre 2005).
- [5] G. Le Meur, B. Bourouga, Y. Jarny. Inverse analysis of heat flow at a solid - solid electro-thermal contact. *Int conf of inverse problems in engineering - Rio de Janeiro, Brazil* (2002).