

Identification d'une loi de comportement plastique pour la Zone Affectée Thermiquement des soudures des aciers AHSS de 3ème génération

E. Champolivier¹, D. Brancherie¹, P. Feissel¹, S. Gaied²

¹ Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne, elise.champolivier@utc.fr

² ArcelorMittal Global R&D Montataire, France

Résumé — Le travail présenté propose une stratégie pour identifier la loi de comportement des Zones Affectées Thermiquement des soudures laser. Cette méthode s'appuie sur des essais de traction sur éprouvettes à encoches instrumentés avec un système de mesure de champs par corrélation d'images numériques adapté aux petites échelles. La loi de comportement dans la zone d'intérêt sera déterminée par approche inverse à partir des données expérimentales.

Mots clés — Soudures laser, aciers de 3ème génération, identification, stéréo-corrélation d'images numériques

1 Introduction

Les constructeurs automobiles font face à un nombre croissant de défis impliquant d'alléger leurs véhicules tout en veillant à conserver leurs performances de sécurité. Pour répondre à ces objectifs, plusieurs méthodes peuvent être appliquées dont l'adaptation locale des matériaux dans la caisse en blanc des véhicules.

C'est dans ce contexte qu'ArcelorMittal développe de nouvelles solutions basées sur la combinaison de 2 technologies :

- la technologie des flans raboutés laser (LWB "Laser Welded Blanks") qui consiste à assembler, avant emboutissage, des tôles d'aciers de nuances, d'épaisseurs ou de revêtements différents pour optimiser localement le comportement mécanique des pièces ;
- les aciers à Très Haute Résistance (AHSS pour "Advanced High Strength Steels") de 3ème génération aux propriétés de formabilité équivalentes aux aciers AHSS conventionnels mais avec une meilleure résistance mécanique permettant ainsi un allègement supplémentaire des pièces.

Le développement de ces nouvelles solutions conduit à devoir valider les modèles de prévision de la formabilité. L'outil principalement utilisé par les industriels pour prédire le comportement de formabilité des tôles lors de l'emboutissage est la Courbe Limite de Formage (CLF). Cette courbe donne les déformations maximales admissibles par une tôle de nuance et d'épaisseur données en fonction du trajet de chargement. Cependant, dans le cas d'un assemblage soudé, l'expérience montre que la CLF du matériau le plus faible de l'assemblage ne permet pas de prédire les casses du fait de phénomènes particuliers induits par la présence de la soudure [1, 3, 7, 10]. L'emploi des aciers de 3ème génération ajoute un défi supplémentaire pour la prédiction de la formabilité des assemblages. Le procédé de soudage induit un gradient de micro-dureté dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) des soudures laissant envisager un gradient de propriétés mécaniques. Plus particulièrement, une chute de dureté ou zone d'adoucissement apparaît. De précédents travaux ont montré que cet adoucissement pouvait affecter la formabilité des assemblages soudés dans certains cas de chargement [2, 4, 5, 6, 7].

De nouveaux critères de prédiction de la formabilité des LWB composés d'aciers AHSS de 3ème génération doivent donc être développés. Ce travail commence par la compréhension fine des comportements locaux dans la soudure, en particulier dans la ZAT des soudures.

La méthode présentée s'inscrit dans un cadre plus large d'étude des assemblages à différentes échelles et propose d'identifier une loi de comportement équivalente dans la ZAT d'une soudure laser par approche inverse à partir de mesures par stéréo-corrélation d'images numériques (CIN) effectuées lors

d'un essai de traction sur éprouvette à encoches.

2 Assemblage étudié

L'objectif de ce travail est de caractériser le comportement matériau de la ZAT des aciers AHSS de 3ème génération. L'assemblage utilisé dans cet étude est un assemblage iso-matériau et iso-épaisseur soudé au laser. Dans cette configuration, le comportement de la Zone de Fusion n'est pas affecté par une différence de composition chimique des aciers assemblés. Son comportement matériau pourra donc être plus facilement déduit de celui de l'acier de base de l'assemblage (voir paragraphe 4.2).

Le matériau utilisé est un acier à Très Haute Résistance de 3ème génération fourni par ArcelorMittal. Sa dénomination commerciale est : Fortiform® 1180. La figure 1 présente le gradient de micro-dureté dans la soudure de l'assemblage Fortiform® 1180-Fortiform® 1180 et la zone d'adoucissement dans la ZAT évoquée dans l'introduction.

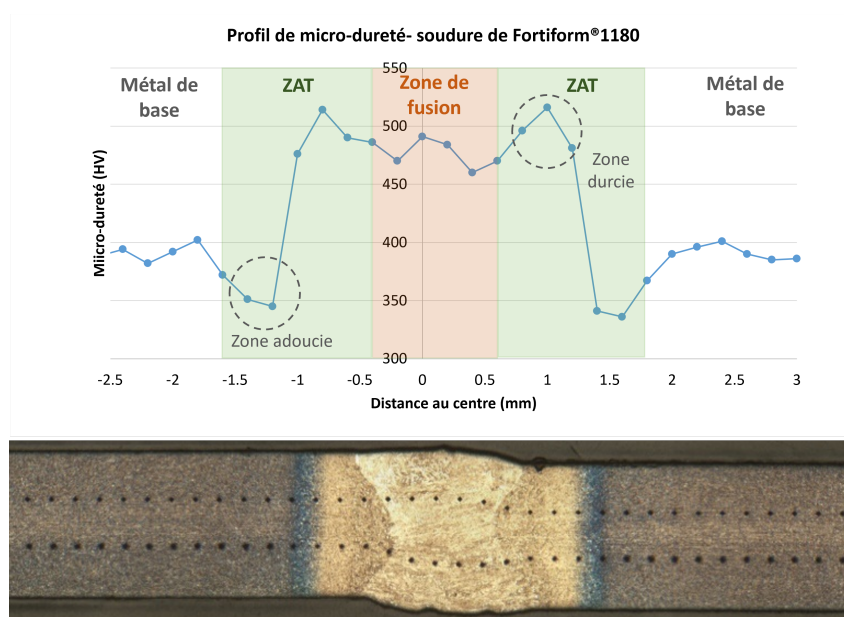


FIGURE 1 – Mesures de micro-duretés dans la soudure

La démarche générale présentée peut être adaptée aux cas d'assemblages dissimilaires.

3 Démarche expérimentale : essais de traction sur éprouvettes à géométrie spécifique

3.1 Géométrie des éprouvettes de traction

A partir d'un plan d'expérience numérique, deux géométries d'éprouvettes (figure 2) ont été sélectionnées afin de solliciter la ZAT des soudures selon des trajets de déformation différents jusqu'à rupture :

- La première géométrie comporte des encoches étroites centrées sur la ZAT pour solliciter cette zone en traction plane. Ce trajet de chargement correspond généralement au point le plus bas des CLF donc aux conditions de formabilité les plus critiques.
- La deuxième géométrie comporte des encoches larges centrées sur la ZAT pour solliciter les bords de la zone utile en traction uniaxiale et son centre en traction plane.

Avec ces différentes éprouvettes, une loi de comportement pour décrire les différents cas de chargement pourra être obtenue. Un critère de rupture pourra ensuite être défini en explorant la frontière des différents états de chargement.



(a) Eprouvette à encoches étroites



(b) Eprouvette à encoches larges

FIGURE 2 – Géométrie des encoches des éprouvettes de traction utilisées (largeur hors encoches : 10mm)

3.2 Montage expérimental et plan d'expérience

Les essais de traction ont été réalisés avec une machine INSTRON 4505 équipée d'une cellule de force de 100kN. 2 types de chargements ont été appliqués :

- un chargement de type "charge-décharge" avec une vitesse de déplacement de traverse constante de $0,2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Le premier chargement est effectué jusqu'à 3000N. Il est ensuite suivi d'une série de charges-décharges, la décharge s'effectuant jusqu'à un palier de 1500N et les charges avec un incrément de 500N par rapport à la charge maximale du cycle précédent.
- un chargement monotone avec une vitesse de déplacement de traverse de $0,2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

Au cours de l'essai, les champs de déplacements sont mesurés par stéréo-corrélation d'images numériques au moyen d'un stéréo-microscope "3D-Micro-DIC ISI-SYS" et du logiciel VIC-3D de Correlated Solutions. Ce système est adapté aux petites échelles et permet d'observer avec le jeu d'objectifs à notre disposition une zone de dimensions $8,4 \times 7 \text{ mm}$. Le mouchetis des éprouvettes a été réalisé à l'aérographe pour permettre d'atteindre une résolution spatiale en déplacement de $0,1 \text{ mm}$ suffisante pour obtenir plusieurs points de mesures dans la ZAT de la soudure. La figure 3 illustre le montage final de l'essai.



FIGURE 3 – Montage expérimental

4 Identification de propriétés matériaux

4.1 Premiers résultats obtenus à partir de l'exploitation directe des données expérimentales

Afin d'illustrer la diversité des comportement matériaux dans la soudure, une première exploitation simplifiée est proposée en s'appuyant sur la déformation moyenne au cours de l'essai extraite le long de plusieurs lignes transversales dans la zone de mesure. Différentes zones sont identifiables dans une soudure : la Zone de Fusion et les Zones Affectées Thermiquement se situant de part et d'autre de cette dernière (figure 4).

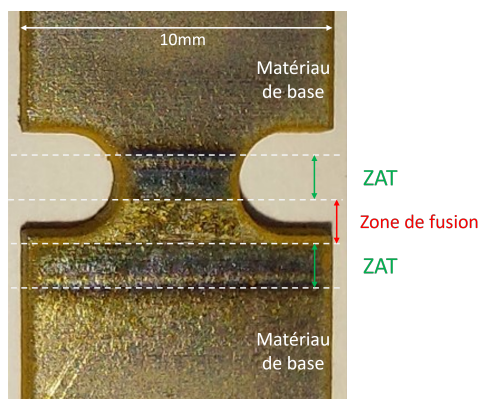


FIGURE 4 – Les différentes zones de la soudure

La figure 5b illustre les courbes de comportement liant contraintes nominales en fonction des déformations locales obtenues sur différentes lignes dans la soudure, dont les emplacements sont illustrés figure 5a, au cours d'un essai de charge-décharge. Pour le calcul de la contrainte, il est supposé que l'épaisseur de l'éprouvette reste constante au cours de l'essai. La largeur de la zone utile est déduite des mesures CIN de la géométrie.

On observe que le niveau de déformation varie en fonction de la ligne d'extraction considérée. La Zone de Fusion à un comportement plus rigide que la ZAT ou le matériau de base. Cela correspond aux attentes au vu des valeurs de dureté élevées dans cette zone de la soudure. L'inclinaison des pentes de décharges de la ligne 1 et 2 est similaire laissant envisagé un comportement élastique équivalent dans la ZAT et le matériau de base. Cependant, le comportement d'écrouissage dans les 2 zones semble différent.

Pour analyser le comportement de la ZAT, nous avons comparé le niveau de déformation dans plusieurs zones. La figure 6 illustre les lois de comportement obtenues à différentes positions dans la largeur de la ZAT.

On observe que le comportement plastique varie car les coefficients d'écrouissage sont différents d'une courbe à l'autre. Il sera ainsi peut-être intéressant de déterminer une loi de comportement équivalente en tenant compte du gradient de propriété dans la ZAT.

4.2 Stratégie de dialogue essais-calculs pour l'identification des propriétés matériaux de la ZAT

Dans un second temps, une stratégie de dialogue essais-calculs est mise en place afin d'identifier une loi de comportement équivalent dans la ZAT de la soudure par approche inverse. Le modèle numérique et le problème des moindres carrés à la base de la méthode sont présentés ci-après.

4.2.1 Modélisation par éléments finis de l'essai

La modélisation 3D par éléments finis de l'essai a été effectuée avec le logiciel commercial Abaqus. Les éprouvettes de traction utilisées admettent deux plans de symétrie. Ainsi, seul un quart des éprouvettes est modélisé. Les conditions limites et les dimensions du modèle pour l'éprouvette à encoches larges sont présentées sur la figure 7.

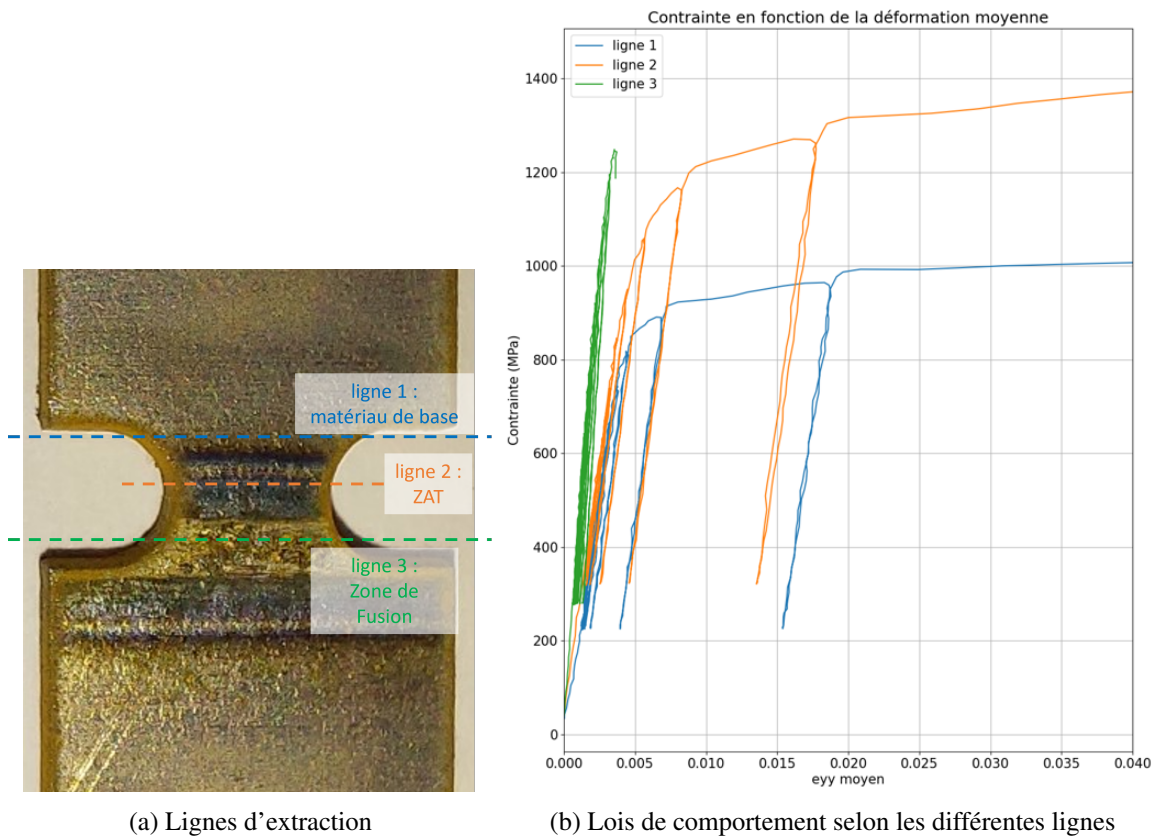


FIGURE 5 – Lois de comportement des différentes zones de la soudure - éprouvettes à encoches larges avec soudure

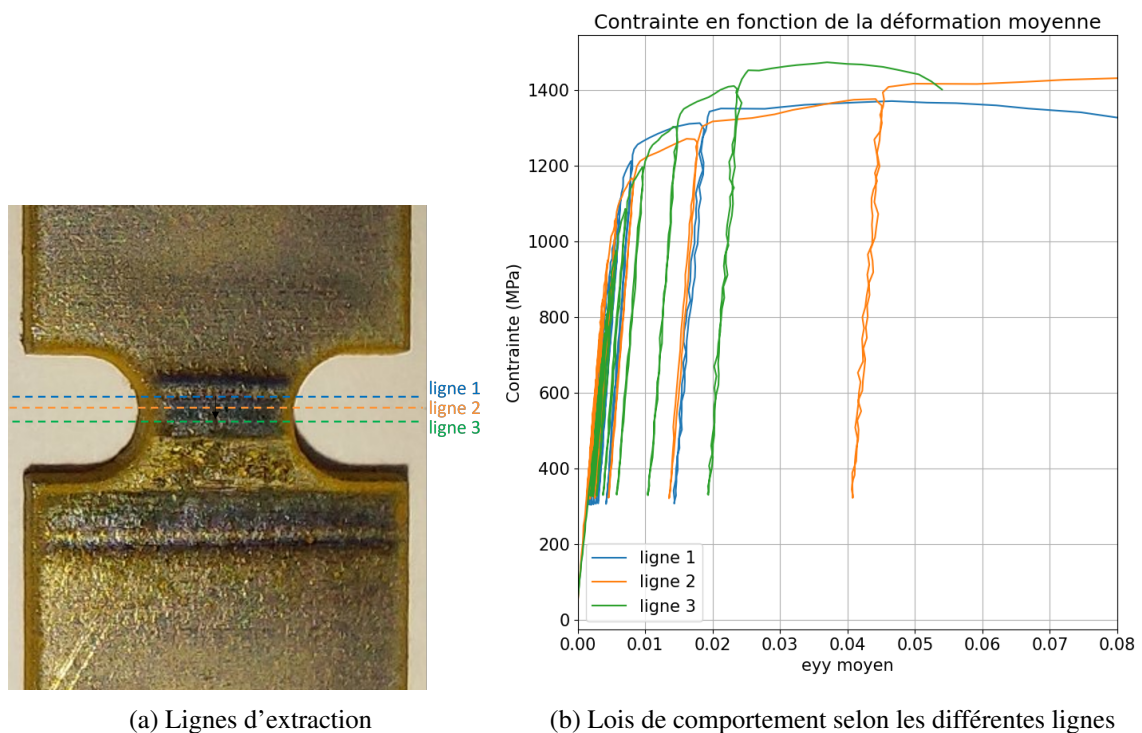


FIGURE 6 – Lois de comportement dans la largeur de la ZAT - éprouvettes à encoches larges avec soudure

Les dimensions de la zone de fusion et des ZAT de la soudure ont été évaluées à partir de mesures de micro-dureté effectuées transversalement à la soudure (figure 1). Les propriétés des matériaux assemblés par soudage laser sont connues. La loi de comportement matériau de la zone de fusion est quand-à elle

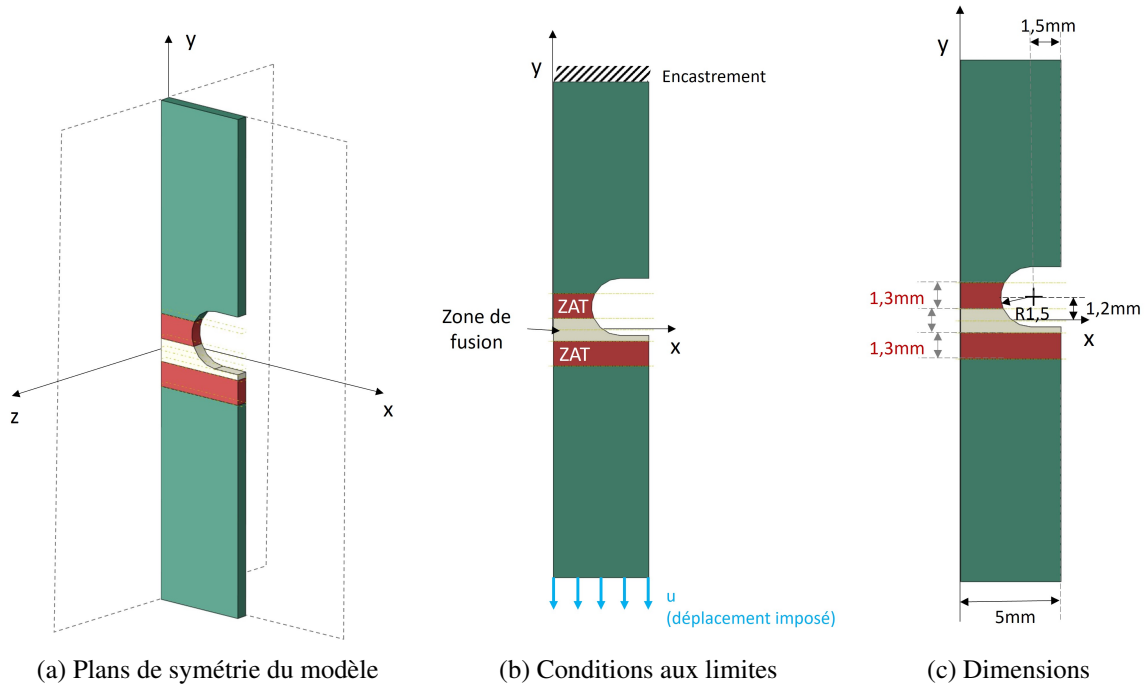


FIGURE 7 – Description du modèle numérique pour l'éprouvette à encoche large

approximée par une mise à l'échelle de la courbe contraintes/déformations des matériaux constituant l'assemblage à partir de la valeur de dureté moyenne dans la zone [6, 8, 9]. Pour la ZAT dont on veut déterminer la loi de comportement plastique équivalente, on suppose que son comportement plastique suit une loi de Swift de la forme :

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (1)$$

Avec :

σ : la contrainte (en MPa).

ε : la déformation.

K , ε_0 et n : les 3 paramètres de la loi de Swift.

Les comportements matériaux sont supposés isotropes.

Le maillage se compose d'éléments C3D8R (éléments quadrangles linéaires à 8 noeuds à intégration réduite) de taille 0,1mm dans la Zone Fondue et les ZAT avec 6 éléments dans l'épaisseur. La résolution du calcul est effectuée avec un solveur implicite.

4.3 Problème des moindres carrés

On définit $\theta = (K, \varepsilon_0, n)$ le jeu de paramètres regroupant les 3 paramètres de la loi de Swift implémentée dans la ZAT de la soudure. Soit $J(\theta)$, la fonction coût qui estime la différence entre les déplacements mesurés et les déplacements calculés par méthode EF pour un groupe de paramètres θ donné.

$J(\theta)$ est défini par :

$$J(\theta) = \|\tilde{U} - \Pi U^{EF}(\theta)\|^2 \quad (2)$$

Avec :

\tilde{U} : le déplacement mesuré (en mm).

$U^{EF}(\theta)$: le déplacement calculé par méthode EF pour le groupe de paramètres matériaux θ renseigné en entrée de la fonction J (en mm).

Π : le projecteur des déplacements EF sur la grille de mesure. La projection est effectuée à partir des fonctions de forme des éléments du maillage.

L'objectif de la démarche est de déterminer le jeu de paramètres $\theta = (K, \varepsilon_0, n)$ qui minimise l'écart entre le champ de déplacements mesuré et le champ de déplacements numérique :

$$\theta_0 = \underset{\theta}{\text{Arg}}(\min(J(\theta))) \quad (3)$$

Pour cela, un algorithme d'optimisation est mis en œuvre pour estimer la solution de (3). Les résultats d'identification associés à cette approche seront présentés et analysés lors de la présentation.

5 Conclusion

Une méthode pour l'identification d'une loi de comportement dans la ZAT des soudures laser d'aciers AHSS de 3ème génération est proposée. Elle s'appuie sur des essais de traction sur éprouvettes à géométrie spécifique instrumentés avec un système de mesure de champs par stéréo-corrélation d'images numériques. Les premiers résultats issus de l'exploitation directe des mesures montrent le comportement hétérogène des différentes zones des soudures étudiées et même au sein de la ZAT. Une stratégie de dialogue essai-calcul pour identifier par approche inverse une loi de comportement équivalent dans la zone d'intérêt est en développement. Elle servira à développer un critère de formabilité adapté au cas des LWB constitués d'aciers AHSS de 3ème génération.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du laboratoire commun FuseMetal (ArcelorMittal France, UTC). Ce laboratoire est cofinancé par le Fonds Européen de Développement Economique Régional (FEDER) via le Conseil Régional des Hauts-de-France.

Références

- [1] M. Abbasi, M. Ketabchi, A. Ramazani, M. Abbasi, U. Prahl. *Investigation into the effects of weld zone and geometric discontinuity on the formability reduction of tailor welded blanks*, Computational Materials Science, 158-164, 2012.
- [2] K. Bandyopadhyay, S. K. Panda, P. Saha, V. H. Baltazar-Hernandez, Y. N. Zhou, *Microstructures and failure analyses of DP980 laser welded blanks in formability context*, Mater. Sci. Eng. A, 250-63, 2016.
- [3] J. K. Baysore, M. S. Williamson, Y. Adonyi, J. L. Milian *Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks*, Welding Research Supplement, 8, 1995.
- [4] N. Farabi, D. L. Chen, J. Li, Y. Zhou, S. J. Dong. *Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints*, Mater. Sci. Eng. A, 1215-22, 2010.
- [5] H. Gong, S. Wang, P. Knysh, Y. P. Korkolis. *Experimental investigation of the mechanical response of laser-welded dissimilar blanks from advanced- and ultra-high-strength steels*, Mater. Des., 1115-23, 2016.
- [6] Q. Jia, W. Guo, W. Li, Y. Zhu, P. Peng, G. Zou. *Microstructure and tensile behavior of fiber laser-welded blanks of DP600 and DP980 steels*, J. Mater. Process. Technol., 73-83, 2016.
- [7] M. Ono, A. Yoshitake, M. Ohmura. *Laser weldability of high strength steel sheets in fabrication of tailor welded blanks*, NKK TECHNICAL REVIEW, 3-8, 2002.
- [8] E. J. Pavlina, C. J. Van Tyne. *Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels*, J. of Materi Eng and Perform, 888-893, 2008.
- [9] J. Rojek, M. Hycza-Michalska, A. Bokota, W. Piekarska. *Determination of mechanical properties of the weld zone in tailor-welded blanks*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 156-162, 2012.
- [10] F. I. Saunders, R. H. Wagoner. *Forming of tailor-welded blanks*, Metallurgical and Materials Transactions A, 2605-2616, 1996.