

Pendekatan Numerik Berbasis Finite Elemen Modeling Dalam Investigasi Kekuatan Sambungan Las Titik (Spot Welding) untuk Material Tak Sejenis (Dissimilar)

I N Budiarsa^{1,*}, I N Gde Antara¹, NPG Suardana¹, IGN Nitya Santhiarsa¹

¹Teknik Mesin. Universitas Udayana. Kampus Bukit. Jimbaran. Badung. Bali. Indonesia,

*nyoman.budiarsa@unud.ac.id

Abstrak

Prilaku kegagalan sambungan las titik (spot welding) sangat penting untuk diketahui dalam rangka desain kekuatan sambungan material yang tak sejenis sebagai langkah signifikan untuk menurunkan berat kendaraan dalam pengembangan sistem transportasi perkotaan yang berwawasan lingkungan, yaitu melakukan upaya positif untuk mengurangi emisi gas CO₂ serta mengurangi konsumsi bahan bakar. Prilaku kegagalan material, parameter sifat plastik bahan dan fraktur bahan dapat dengan mudah ditentukan saat spesimen standar bahan tersedia seperti pada logam induk (base), namun untuk sambungan hasil las titik pengujian standar tidak berlaku untuk mengkarakterisasi HAZ dan nugget karena terkendala oleh struktur kompleks dan ukuran sampel kecil.

Salah satu pendekatan yang potensial untuk dikembangkan dalam prilaku kegagalan material, parameter sifat plastik bahan ini adalah dengan memadukan metode numerik-eksperimental. Dimana p-h curve indentasi hasil eksperimental dipadukan dengan pendekatan numerik melalui Finite Element (FE) modeling digunakan untuk menguji terbalik (inverse) terhadap ciri parameter hukum bahan konstitutif (tegangan luluh (σ_y), koefisien pengerasan regang (n)) untuk nugget, HAZ dan material induk (base). Dalam pendekatan ini, data beban-deformasi material yang digunakan sebagai input data untuk model elemen hingga (FE) yang mensimulasikan geometri dan kondisi batas dari eksperimen. Pendekatan berbasis Model FE yang dikembangkan, divalidasi yang selanjutnya digunakan untuk memprediksi pengaruh ukuran nugget dan ketebalan lembaran logam pada kekuatan sambungan las titik dengan material berbeda (dissimilar material)

Kata kunci : FE Modeling, dual indenter, tegangan luluh (σ_y), koefisien pengerasan regang (n)

Pendahuluan

Dalam studi pengaruh teknologi terhadap Penggunaan bahan bakar dan emisi CO₂ EPA 2010 [1] diketahui pengurangan berat body kendaraan adalah Inovasi teknologi yang paling signifikan memberikan dampak terhadap pengurangan terhadap penggunaan bahan bakar dan emisi CO₂. Pengurangan berat kendaraan juga menjadi solusi terbaik dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar tertentu maupun peningkatan kemampuan kendaraan yang justru meningkatkan emisi gas yang dihasilkan. Salah satu cara penurunan berat kendaraan adalah dengan menggabungan

bahan yang berbeda. Penggabungan bahan yang berbeda (dissimilar metal) ini telah diterapkan tidak hanya mengurangi berat badan mobil juga meningkatkan proteksi terhadap korosi serta meningkatkan crashworthiness[2]. Sampai saat ini penggabungan dengan logam yang berbeda diwujudkan dengan cara mekanis perakitan [3]. Penyambungan material tak sejenis masih secara intensif diteliti dan dikembangkan sebagai interaksi antara fenomena listrik, termal, metalurgi dan mekanik [4]. Sebagian penelitian dilakukan terhadap pengaruh ketebalan dan lama penekanan pada pengelasan titik terhadap

sifat fisis dan mekanis dengan variasi waktu pengelasan.[5]. Lainnya terhadap permasalahan ukuran diameter *nugget* [6]. Suatu bidang penelitian yang masih aktif adalah pada prediksi dimensi dan kekuatan sambungan las dengan mensimulasikan proses pengelasan dengan pemodelan elemen hingga [4],[7]. Bidang penelitian aktif lain yaitu pada studi mikrostruktur [4]. Karya sebelumnya menunjukkan kekerasan yang dapat berhubungan dengan tegangan representatif (σ_r), sesuai dengan regangan representatif (ϵ_r) yang merupakan regangan plastik rata-rata yang dihasilkan pada indentasi test [8],[9],[10]. Konsep ditambah dengan pemodelan elemen hingga (FE) telah berhasil digunakan dalam menganalisis indentor tajam (Vickers) di mana regangan dan tegangan representatif didefinisikan dengan baik dengan menggunakan sudut indentor tetap. Dalam kasus ini, hubungan yang dihasilkan antara parameter material dan kurva P-h akhirnya dapat digunakan untuk mengestimasi parameter bahan. Pendekatan telah dikembangkan komparatif untuk memprediksi set materi memiliki curvature indentasi sebenarnya. Melalui data tegangan (force) P vs kedalaman (h) indentasi yang dikaitkan dengan nilai kekerasan HV dan HRB. Simulasi dengan model yang telah tervalidasi dilakukan pada berbagai sifat material ($\sigma_y=100-900$ MPa, dan $n=0.0-0.3$) hubungan antara yield stress (σ_y), koefisien pengerasan regang (n), HV dan HRB dapat diketahui. Sehingga dengan input nilai kekerasan, maka sifat plastik (σ_y dan n) pada sebuah material kompleks seperti hasil pengelasan, dapat diprediksi lebih akurat.

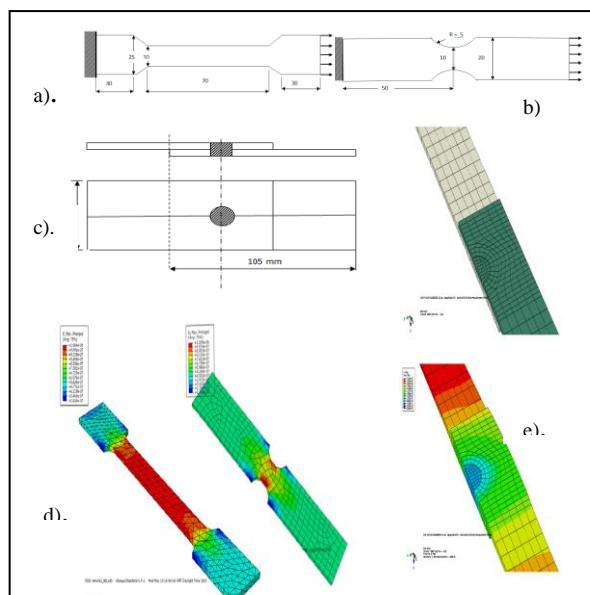
Material dan Experimental

Dua spesimen dengan bahan dan ketebalan yang berbeda (Stainless steel dan Mild steel) digunakan dalam penelitian ini. Seperti yang tercantum dalam Tabel.1.

TABEL 1. Komposisi kimia material spot welding test

Concentration	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
Stainless Steel G304	<0.08%	17.5-20%	8-11%	<2%	<1%	<0.045%	<0.03%
Mild steel	0.14%	0.01%	0.01%	0.32%	0.03%	0.2%	0.05%

Stainless steel yang digunakan adalah stainless steel grade 304 dengan lebar 25mm, dan ketebalan 0.8 mm, spesimen lain adalah Mild steel dengan lebar 25mm dan ketebalan 1.44mm. Sambungan las dari dua kombinasi bahan disiapkan dan diuji. Untuk pengujian kekerasan sampel Baja batang elips padat dengan diameter $\phi 5$ mm dan panjang 90 mm dan memiliki dudukan di tepi. Uji kekerasan Vickers dilakukan dengan menggunakan Duramin-1 Struers hardness Vickers. Mesin uji Duramin-1 Struers hardness Vickers menggunakan metode pembebanan langsung dengan berbagai beban dari 490.3mN sampai 19.61 N. indentor memiliki bentuk piramida yang tepat dengan dasar persegi dan sudut 136° antar sisi muka yang berlawanan [11]. Sambungan las dari dua kombinasi bahan disiapkan dan diuji. Tes tarik geser (shear tensile tests) dilakukan menggunakan Lloyd LR 30K Universal material testing machine yang dapat melakukan test tarik geser maupun kompresi. Mesin ini memiliki kapasitas maksimum 30 kN, dengan pembacaan yang akurat untuk 0.5% dari gaya. Mesin ini dihubungkan dengan microcomputer sehingga keluaran grafis hasil tes serta data uji dapat diperoleh dan disimpan. Spesimen dilakukan uji tarik geser dengan beban awal sekitar 50 N, dijepit dengan dua gasket untuk menghindari lentur selama pengujian. Uji tarik dilakukan pada loading rate 5 mm/menit. berdasarkan standar ASTM E 8-04. Dimensi Tensile Test, shear tensile test serta FE Modeling untuk specimen, dan Spesimen hasil las ditunjukkan dalam Gbr 1.



Gambar 1a) Tensile Test spesimen bentuk dog bone, b). Tensile Test spesimen dengan radius $R= 5$ mm, c). Spesimen Shear test untuk hasil las serta d) dan e). Finite Elemen Modeling

Material Model

Berdasarkan Hooke's law dan kriteria Von Misses, maka regangan sebenarnya (true strain, ε) tegangan sebenarnya (true stress, σ) umumnya dinyatakan sebagai Eq. (1).

$$\varepsilon = \begin{cases} \sigma/E & \text{for } \sigma \leq \sigma_y \\ \sigma_y/E \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^{1/n} & \text{for } \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (1)$$

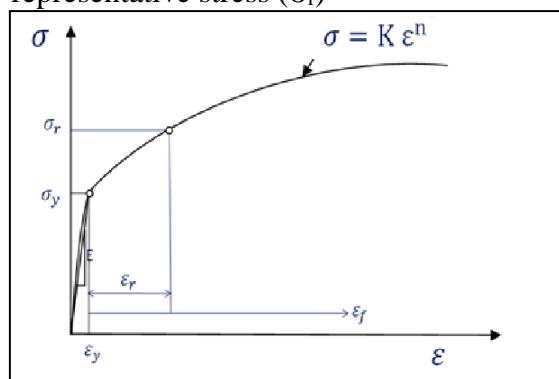
dimana E adalah modulus Young, n adalah koefisien pengerasan regang. Di wilayah plastik, regangan sebenarnya bisa diuraikan sebagai regangan lulu (σ_y) dan regangan plastik sebenarnya. Sedangkan untuk mengetahui prilaku kegagalan dan sifat fraktur sambungan las titik (spot welded joint) digunakan pendekatan Model Gurson. Model Gurson banyak digunakan dalam mekanika fraktur ulet, di mana fraktur bahan dianggap sebagai hasil dari pertumbuhan kekosongan (void) dalam volume material. Model Gurson yang paling umum digunakan dalam analisa

prilaku kegagalan disebut Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) Model [12] yang secara singkat dijelaskan di bawah, diasumsikan sifat plastik yang dihasilkan dari bahan ulet berpori, di mana permukaan yield adalah fungsi dari kekosongan (void) sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{3S_{jk}S_{jk}}{2\sigma_{ys}^2} + 2q_1f \cosh\left(\frac{3q_2\sigma_m}{2\sigma_{ys}}\right) - (1+q_3f^2) = 0 \quad (2)$$

dimana σ_y adalah tegangan lulu (yield stress) dari material, σ_m adalah mean stress, f adalah fraksi volume void. $f=0$ berarti bahwa materi adalah sepenuhnya padat, dan kondisi Gurson yield mengurangi von Mises; $f=1$ berarti bahwa bahan tersebut adalah full void dan tidak memiliki tegangan. S_{jk} adalah komponen stress deviator ($j, k = 1, 2, 3$), didefinisikan sebagai $S_{jk} = \sigma_{jk} - \sigma_m \delta_{jk}$ dan δ_{jk} adalah Kronecker delta $\delta_{jk} = 1$ jika $j = k$ dan $\delta_{jk} = 0$ jika $j \neq k$. Beberapa nilai parameter q_1, q_2, q_3 adalah konstanta material, nilai-nilai yang paling ditemui dalam sebagian besar literatur adalah sebagai $q_1=1.5, q_2=1, q_3=2.25$

Dalam power law elasto plastic bila representatif strain (ε_r) adalah sebuah titik regangan plastik refrensi, maka tegangan yang bersesuaian dengan (ε_r) adalah representatif stress (σ_r)



Gambar 2. Tipikal Tegangan regangan menurut Power law elasto plastic dengan titik regangan referensi

Representative strain (ε_r), mewakili mean regangan plastik didefinisikan oleh Tabor

(1948, 1951). Teknik untuk memperkirakan satu titik pada kurva true stress–true strain seperti gambar 2. Dalam hal ini representative stress (σ_r) dapat dinyatakan sebagai:

$$\sigma_r = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \varepsilon_r \right)^n \quad (3)$$

Pada Indentasi yang terjadi pada elasto plastic umumnya mengikuti Power law dimana beban P dapat dituliskan sebagai:[13]

$$P = P(h, E, v, E_i, v_i, \sigma_y, n) \quad (4)$$

Dimana E = modulus Young indentor, dan v = Poisson rasio. Dengan menggabungkan efek elastisitas sebuah indentor elastis dan elasto plastik solid dapat dituliskan :

$$P = P(h, E^*, \sigma_y, n) \quad (5)$$

Dimana E^*

$$E^* = \left[\frac{1-v^2}{E} + \frac{1-v_i^2}{E_i} \right]^{-1} \quad (6)$$

Pada penelitian ini sistem material yang diselidiki adalah baja, sehingga nilai E tetap pada 200 GPa nilai E^* (~ 187 GPa dengan E indenter = 1220 GPa dan E steel = 200 GPa) untuk menghindari ketidak pastian dengan nilai E^* dari sumber yang berbeda. Dengan mengaplikasikan Π theorem dalam analisa dimensi persamaan (5). Sehingga loading curvature C dapat dituliskan sebagai:

$$C = \frac{P}{h^2} = \sigma_y \Pi 1 \left(\frac{E^*}{\sigma_y}, \frac{\sigma_r}{\sigma_y} \right) \quad (7)$$

Bila fungsi dimensionless diberikan dalam persamaan (5), maka normalisasi diperlukan sehubungan dengan pendekatam terhadap σ_y atau σ_r . Dengan simulasi diketahui hubungan antara normalisasi C_v Vs properties bahan dan hubungan antara normalisasi C_s Vs sifat bahan (eksponen pengerasan regang (n) dan

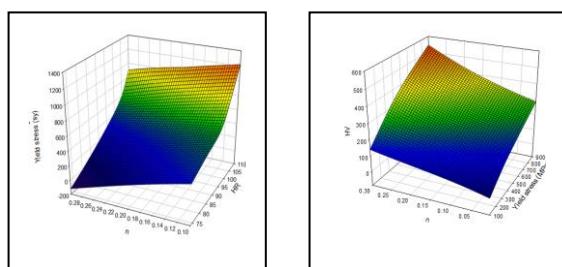
Yield stress (σ_y). Kurva P-h untuk kedua indentasi yaitu Vickers dan Spherical memiliki hubungan berikut:

$$C = P/h^2 \quad (8)$$

Dimana P dan beban dan kedalaman indentasi pada kurva beban masing-masing. C_v adalah koefisien curvature dengan kelengkungan untuk Vickers Indentasi dan indentor bola ditunjuk sebagai C_s dan Curvature adalah fungsi dari hubungan antara yield stress (σ_y) dan koefisien pengerasan kerja (n). Hal ini akan memberikan hubungan yang potensial memungkinkan prediksi parameter material dari indentasi test kontinyu.

Prediksi Sifat Plastis Spotweld dan Hasil

Metode untuk menentukan sifat plastik material dengan dual indenter dikembangkan melalui prediksi terbalik (inverse prediction) dengan menggunakan input nilai kekerasan material dikenal untuk mengidentifikasi constitutive material properties (σ_y , n). Pada tahap pertama, model FE secara sistematis dikembangkan untuk membentuk ruang simulasi meliputi berbagai potensi sifat material. Pada tahap berikutnya, kurva P-h yang dikembangkan digunakan dalam ruang batas simulasi (simulation space). Pendekatan telah dikembangkan komparatif untuk memprediksi set materi memiliki curvature indentasi sebenarnya. Melalui data tegangan (force) vs kedalaman indentasi yang dikaitkan dengan nilai kekerasan HV dan HRB. Simulasi dengan model yang telah tervalidasi dilakukan pada berbagai sifat material (σ_y : 100-900 MPa, dan n:0.0-0.5) hubungan antara yield stress (σ_y), koefisien pengerasan regang (n), HV dan HRB dapat diketahui.



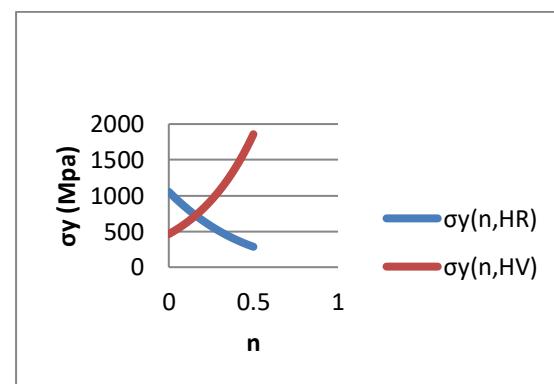
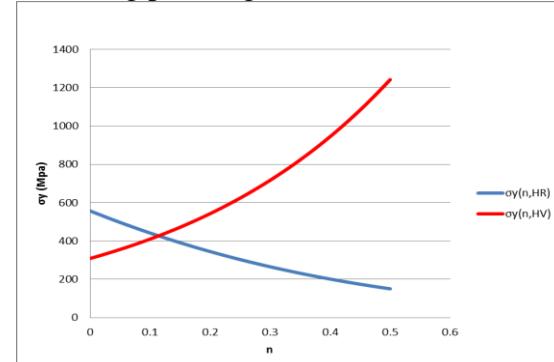
Gambar 3. Tipikal Surface plot 3D sebagai model hasil simulasi FE Model indentasi

Hasil simulasi FE Model dijelaskan menggunakan surface plot 3D pada Gbr.3 dengan menggunakan baja sebagai sistem model bahan diketahui berhubungan sangat baik antara yield (σ_y), koefisien pengerasan regang (n) terhadap HV ataupun HRB dengan koefisien korelasi = 0.97 yang didekati dengan menggunakan regresi nonlinear Gaussian 3D. Aplikasi pendekatan FE Model digunakan dalam prediksi parameter konstitutif material (σ_y , n) untuk material induk (base) sambungan las titik (Spotweld joint) berdasarkan nilai kekerasan diperoleh sebagai diuraikan dalam Tabel 1. Sedangkan interseksi kurva σ_y (n, HR) dan σ_y (n, HV) berdasarkan input nilai kekerasan hasil eksperimen ditampilkan dalam Gbr 4. dan prediksi sifat plastis daerah las sambungan las titik (Spotweld joint) pada Gbr 5.

Specimen Test	Properties		Hardness	
	σ_y , Mpa	n	HV	HR
CS- 0.1% C	405	0.14	131.05	53.767
Mild St-	700	0.17	239.92	72.533

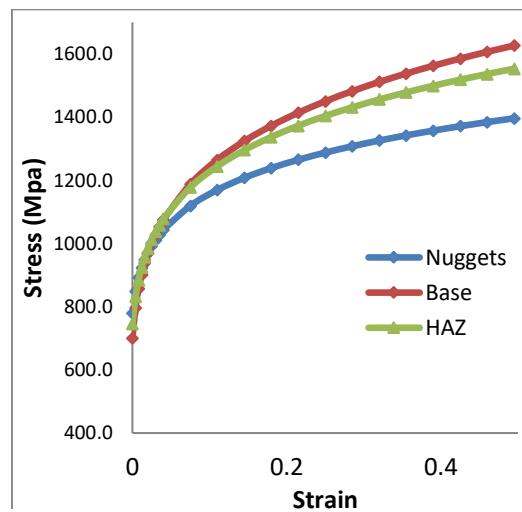
Specimen Test	Different		Accuracy (Error)	
	$\Delta \sigma_y$	Δn	$\Delta \sigma_y / \sigma_y$	$\Delta n / n$
CS- 0.1% C	-17.0	0.03	-0.042	0.172
Mild St-	-26.2	0.02	-0.037	0.118

Tabel 1. Tipikal nilai hasil eksperimen menggunakan dual indenter (HV-HRB) dan hasil prediksi dengan pendekatan FE Modeling pada logam induk (base)



Gambar 4 Tipikal interseksi kurva σ_y (n, HRB) dan σ_y (n, HV) dalam pendekatan FE

Modeling untuk prediksi parameter konstitutif material (σ_y , n) untuk logam induk (base)



Gambar 5. Tipikal prediksi sifat plastis untuk Nugget, HAZ dan logam induk (base metal) sebagai aplikasi FE Modeling dalam prediksi parameter konstitutif material (σ_y , n)

Identifikasi dan prediksi sifat plastik material dengan dual Indenter melalui FE model indentor tajam (Vickers) dan indentor tumpul (indentor Bulat) telah dikembangkan. Metode yang dikembangkan telah meletakkan dasar yang baik terhadap tujuan akhir dari penelitian ini dalam membangun efek parameter pengelasan pada sifat statis dan dinamis las titik (spot welding) sistem bahan yang berbeda.

Kesimpulan

Metode inverse menggunakan pendekatan numerik terhadap nilai konstitutif material (σ_y , n) berdasarkan indentasi statis telah dikembangkan dan divalidasi. Evaluasi berdasarkan data eksperimen numerik menunjukkan kesamaan yang akurat dengan pendekatan kurva indentasi kontinyu. Pendekatan yang dikembangkan telah berhasil digunakan untuk mengkarakterisasi sifat plastis zona yang berbeda pada hasil las spot welding.

(nuggets $\sigma_y = 780$ MPa, n= 0.12, HAZ $\sigma_y = 745$ MPa, n=0.15, Base $\sigma_y=700$ MPa, n=0.17). Parameter bahan plastis ini digunakan dalam pemodelan finite element untuk deformasi tarik geser sambungan las spot welding dan menunjukkan hubungan yang baik dengan hasil eksperimen. Model FE divalidasi yang selanjutnya digunakan untuk memprediksi pengaruh ukuran nugget dan ketebalan lembaran logam pada kekuatan sambungan las titik dengan material berbeda (dissimilar material)

Referensi

- [1] Todd Litman, Comprehensive Evaluation Of Energy Conservation And Emission Reduction Policies,"*Transportation Research A*, Vol. 47, January (2013), pp. 153-166
- [2] Anaraki A.G., et al., Experimental and numerical analysis of low cycle fatigue of spot welded joints under peel-tension loading, *Mechanical Computational*, vol 221, (2002) pp.786-804.
- [3] Irfan Dost, et all, Mechanical Evaluation of Joining Methodologies in Multi Material Car Body, International Journal of Advances in Engineering & Technology, ISSN: 2231-1963 Vol. 5, Issue 1, pp. 259-268 Nov. 2012.
- [4] Rahman M.M.,et al., An Investigation into the effects of spot diameter and sheets thickness on fatigue life of spot welded structure based on FEA, *Research Journal of Applied Science*, 3(1):10-15, 2008
- [5] Nachimani C., An Experimental Investigation on Spot Weld Growth on Dissimilar Joints of 304L Austenitic Stainless Steel and Medium Carbon Steel (Part1), *International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)* Vol. 2, No. 1, (2013), pp. 25~32
- [6] Aslanlar S.,The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical

- resistance spot welding of sheets used in automotive industry, *Materials and Design*, 27.125-131. 2006
- [7] Hou Z., et al., Finite element analysis for the mechanical features of RSW process, *Journal of materials and Processing Technology*, 185, 1-3, (2007)160-165
- [8] I. N. Budiarsa, M. Jamal, "P-h Curves and Hardness Value Prediction for Spherical Indentation Based on the Representative Stress Approach", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 493, pp. 628-633, 2014
- [9] N. Budiarsa, "Indentation Size Effect (ISE) of Vickers Hardness in Steels: Correlation with H/E", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 391, pp. 23-28, 2013
- [10] N. Budiarsa, A. Norbury, X. X. Su, G. Bradley, X. J. Ren, "Analysis of Indentation Size Effect of Vickers Hardness Tests of Steels", *Advanced Materials Research*, Vols. 652-654, pp. 1307-1310, 2013
- [11] Bucaille.J.L.,et al., Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using instrumented sharp indentation. *Acta Materialia*, Vol.49,(2003) pp. 3899-3918
- [12] G. Cricrì, et al., A consistent use of the Gurson-Tvergaard-Needleman damage model for the R-curve calculation 24 (2013) 161-174; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.17
- [13] Dao M., Chollacoop N., Van Vliet K. J., Venkatesh T. A. and Suresh S., Computational modelling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation, *Acta Materialia*, Vol. 49, 2001, pp. 3899–3918