

Ketahanan terhadap Retak-Tegangan-Korosi Sambungan Las Dissimilar Baja ASTM A36 dengan Baja Stainless 316L Pada Berbagai Variasi Suhu

Djarot B. Darmadi^{a,1} and Slamet Prasetyo Utomo^{a,b}

^aDepartemen Teknik Mesin, Universitas Brawijaya – MALANG (65145)

^bDepartemen Teknik Mekatronika, Politeknik Kota Malang (65133)

¹b_darmadi_djarot@ub.ac.id

ABSTRACT

On many occasions, the Stress Corrosion Cracking (SCC) phenomenon was neglected which may cause catastrophic failures such as the blowout of three pipelines in Argentina, explosions in the pipelines that transport natural gas from central Australia to Sydney and the Trans-Canada pipeline that ruptured in Winnipeg. According to research, the root cause of those accidents was SCC aspects. For structures with welding joints, SCC considerations should be applied. In this study, we welded ASTM A36 steel and 316L Stainless Steel using Capacitive Discharge Welding (CDW). The welding parameters such as the gap between metals before welding, pressure, welding energy and surface parameters of those two metals were kept constant. While the specimens were exposed to the SCC load, the concentration of the corrosive solution of HCl was kept at 0.5 M. The independent variable, i.e. temperature, was maintained at 30°C, 40°C, and 50°C, respectively, while the concentration of the corrosive solution was maintained at 0.5 M. The Stress Corrosion Cracking resilience was evaluated based on the time to fail of the joint when exposed to certain dead loads and corrosive media. For the same load, the higher temperature decreases the time to fail of CDW joints. This increases the joint's susceptibility to SCC load. The experiment shows that 10°C increases the SCC threshold by 40%. The macro photos confirm the results of SCC susceptible measurement.

Keywords: SCC, SCC Threshold, Capacitive Discharge Welding, SCC Resilience.

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590650

PENDAHULUAN

Aplikasi pengelasan meningkat dengan sangat cepat selama perang dunia II ketika memasang plat lambung kapal Liberty. Karena merupakan penerapan secara masive untuk pertama kali, banyak masalah dan kegagalan yang ditemui dan hingga sekarang masih banyak publikasi tentang sambungan las. Salah satu aspek penting yang sering dilupakan dalam konstruksi dengan sambungan las adalah perilaku sambungan las terhadap fenomena retak-tegangan-korosi (*Stress Corrosion Cracking – SCC*) yang pada beberapa kasus terbukti merupakan akar masalah yang menyebabkan kegagalan.

Pada sisi lain, aplikasi pengelasan CDW mulai meningkat terutama untuk sambungan dissimilar. Dipahami bahwa proses pengelasan merupakan fenomena yang kompleks melibatkan berbagai disiplin ilmu dari perpindahan panas, termodinamika, ilmu bahan, mekanika fluida, mekanika kekuatan yang terjadi pada satu kejadian. Kompleksitas proses pengelasan akan semakin meningkat jika diaplikasikan pada penyambungan logam yang berbeda (dissimilar). Oleh karena itu, pada penelitian ini dievaluasi perilaku sambungan dissimilar CDW jika terpapar beban SCC.

REVIEW LITERATUR

Kotecki dan Mool menyimpulkan bahwa pembentukan ferrite dengan butir halus akan mengurangi ketangguhan sambungan [1]. Penambahan unsur besi, beryllium ataupun chromium diaplikasikan pada paduan 70-30 CuNi, terbukti bahwa paduan akan kehilangan kekuatannya pada daerah pengaruh panas proses pengelasan (*Heat Affected Zone – HAZ*) [2]. Olson mengembangkan sebuah metode untuk memprediksi struktur mikro yang terbentuk khususnya temperatur awal pembentukan martensite dari baja austenitic dengan kandungan mangan yang tinggi yang ditujukan untuk memperoleh perilaku sifat-sifat sambungan yang optimum [3]. Kou dan Le meneliti pengaruh asupan panas (*heat input*) dan kecepatan pengelasan ketika paduan aluminium disambung menggunakan GTAW [4]. Pada percobaan itu, temperatur dalam *weld pool* dimonitor dan pertumbuhan butir *equiaxed* dievaluasi menggunakan mikroskop optik dan elektron. Efek termodinamika dari asupan panas dan kecepatan pengelasan dievaluasi berdasarkan rasio G/R dimana keduanya akan meningkat disebabkan kecepatan pengelasan; tetapi peningkatan kecepatan pengelasan dan asupan panas akan mengurangi rasio G/R. Dari sudut pandang termodinamika, rasio G/R yang lebih rendah akan menghasilkan nukleasi yang heterogen

yang pada akhirnya memperhalus butiran kristal logam yang dihasilkan dari proses pengelasan. Parameter pengelasan dari pengelasan GTAW diteliti ketika diaplikasikan pada baja dengan kandungan sulfur [5]. Arus listrik dan asupan panas akan meningkatkan penetrasi pada baja dengan kandungan sulfur yang tinggi, tetapi tidak memiliki pengaruh signifikan untuk baja dengan kandungan sulfur rendah bahkan penambahan arus akan mengurangi penetrasi. Penetrasi akan turun dengan naiknya kecepatan pengelasan dan panjang busur baik untuk baja dengan kandungan sulfur rendah maupun tinggi. Adeyeye dan Oyawale mengajukan apa yang disebut dengan *mixture experiment*, sebuah model statistik untuk mengatasi banyaknya waktu dan tenaga dari eksperimen tradisional yang intensif dalam pengembangan flux [6]. Pozo *et al.* mengoptimasi parameter GMAW ketika digunakan untuk merepair bilah turbin Pelton [7]. Optimasi memanfaatkan Algoritma genetik menggunakan sampel dengan parameter terkontrol. Sampel-sampel tersebut dievaluasi setelah mengalami serangan kimia dan dilakukan observasi terhadap daerah lasan, delusi dan penetrasi. Hasil observasi menunjukkan Algoritma yang dikembangkan menghasilkan prediksi yang bagus dengan error dibawah 6%. Sonar *et al.* menelaah parameter pengelasan CA-TIG pada kekuatan tarik, kampuh las dan struktur mikro dari sambungan yang dihasilkan [8]. CA-TIG diaplikasikan pada bahan dengan dasar Nickel dari AMS-5596 yang biasa juga disebut dengan 718 superalloy. Parameter yang memiliki pengaruh signifikan pada struktur mikro yang terjadi adalah arus utama (MC) dan kecepatan melintang dari *constricted arc* (CATS). Keduanya memiliki pengaruh signifikan terhadap morfologi pertumbuhan kristal dendrite dan prosen volume dari endapan (*precipitates*) pada daerah fusi yang pada akhirnya menentukan kekuatan tarik dari sambungan. Geometri dari kampuh juga secara signifikan ditentukan oleh MC dan CATS.

Telah diketahui bahwa korosi sangat merugikan pada konstruksi logam [9, 10] dan setelah meledaknya jaringan pipa di Argentina [11] dan Winnipeg [12] timbul kesadaran peran penting faktor SCC pada sambungan las dan menarik para peneliti untuk menggali lebih dalam fenomena SCC. Asupan panas merupakan faktor penting pada proses pengelasan [13], dan peranan asupan panas pada perilaku SCC diteliti oleh Anita *et al.* [14]. SCC intergranular terbentuk ketika tegangan sisa berkembang pada proses pengelasan TIG dari baja stainless 316 LN yang dikenal sebagai *sensitization*. Endapan Cr₂₃C₆ ketika baja stainless austenitic terekpose pada temperatur 723-1123 K merupakan akar masalah dari

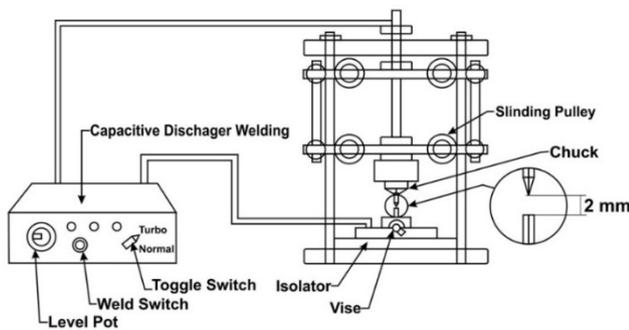
sensitization ini [15]. Umumnya, paduan aluminium seri 7 memiliki ketahanan yang lebih rendah terhadap SCC dibanding aluminium seri 5. Mungkin benar bahwa aluminium seri 7 memiliki ketahanan terhadap SCC pada arah longitudinal yang lebih baik tetapi rentan pada arah ketebalan. Keberadaan tegangan sisa memperburuk kerentanan aluminium seri 7 ini [16]. Asupan panas yang lebih tinggi atau laju pendinginan yang lebih rendah mereformasi autenite selama pendinginan dan pada akhirnya menurunkan ketahanan terhadap SCC secara signifikan dari baja stainless duplex [17]. Kerentanan dari struktur mikro HAZ dan pembentukan tegangan sisa ketika melakukan pengelasan GTA pada baja stainless austenitik super 304H mengurangi ketahanan terhadap SCC [18]. Data slope kurva sebelum transisi (tss), waktu patah (tf) diperoleh dari kurva perpanjangan korosi. Dari kurva perpanjangan korosi dapat disimpulkan, semakin tinggi tegangan akan mengurangi nilai tss/tf yang mengindikasikan waktu patah setelah retak cukup panjang dan iss meningkat yang berarti bahwa retak terinisiasi lebih cepat. Dalam banyak kegagalan dari baja stainless austenitik yang digunakan pada pembangkit nuklir, kegagalan terjadi pada daerah HAZ, khususnya jika terjadi fenomena SCC. Hal ini disebabkan perubahan struktur mikro yang terjadi selama proses pengelasan. Pentingnya peran struktur mikro (tipe dan ukuran) khususnya pada arah perambatan retak, juga ditekankan oleh Darmadi *et al.* [20]. Kumar dan Balasubramanian mengaplikasikan autogenous GTAW pada baja stainless super 304Hcu [21] ketika sambungan dipapar dalam larutan MgCl₂ yang mendidih. Beban diberikan pada 40%, 60%, 80% dan 100% dari kekuatan luluhnya. Sepe *et al.* mempelajari perilaku SCC dari plat S690Q HSS yang dilas [22]. Proses pengelasan dilakukan dengan las MIG. Ketika sambungan diekpos pada air laut dengan pH = 4, ketahanan terhadap SCC menurun disebabkan mekanisme korosi anodik dan pengetasan hidrogen.

Ide dari pengelasan kapasitif (*Capacitive Discharge Welding* – CDW) adalah laju penyimpanan energi yang lambat pada kapasitor yang kemudian dilepaskan dengan sangat cepat, menyebabkan arus yang tinggi pada rentang waktu yang pendek. Penggunaan CDW mulai meningkat, terutama untuk melakukan sambungan dissimilar [23]. Ketzal *et al.* mengevaluasi perkembangan penyambungan menggunakan CDW [24]. Terbukti bahwa penguapan logam terjadi pada daerah tepi sambungan disebabkan kerapatan arus yang tinggi. Diasumsikan bahwa kerapatan arus akan lebih tinggi pada daerah pusat penampang lintang disebabkan konduktifitas dari uap rendah. Kualitas dari sambungan dari sudut pandang SCC dapat

ditingkatkan dengan melakukan desain antar muka yang tepat [25]. Menimbang semua referensi diatas, pada artikel ini dievaluasi perilaku SCC pada sambungan menggunakan CDW dalam larutan HCl dengan temperatur yang divariasikan.

METODOLOGI

Sambungan dissimilar dihasilkan dari apparatus CDW dengan menggunakan jig khusus (Gambar 1) untuk mendapatkan kondisi pengelasan yang konstan. Proses CDW secara detail bisa dilihat pada artikel yang pernah dipublikasikan oleh penulis [25]. Parameter konstan dari proses CDW adalah jarak antar spesimen: 2mm, tekanan = 40N dan energi yang tersimpan dalam kapasitor: 220 J. Material yang disambung adalah baja stainless 316L dan baja ASTM A36. Untuk mendapatkan peleburan yang bagus pada interface, baja stainless diruncingkan dengan sudut 30° sementara baja A36 dibiarkan rata. Komposisi dan sifat mekanik dari kedua logam dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.



Gambar 1. Skema pengelasan CDW

Table 1. Parts of working fluid filler

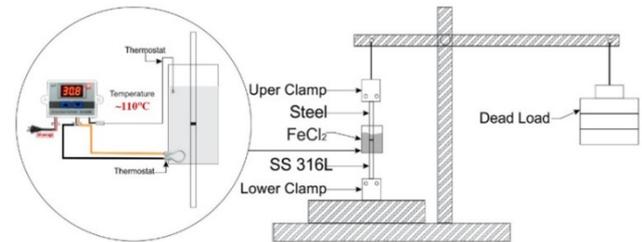
ASTM A36 Steel						
Fe	C	Al	S	Cr	Si	Ni
Bal.	0.148	0.001	0.02	0.046	0.0015	0.092
P	Cr	Mn	W			
0.008	0.103	0.555	0.04			
316L Stainless Steel						
Fe	C	Al	S	Cr	Si	Ni
Bal.	0.025	-	0.01	16.38	0.41	9.60
P	Cr	Mn	W	Mo	Cu	Co
0.04	17.9	1.60	-	3.15	0.51	0.28

Table 2. Sifat mekanik

	Melting Point (°C)	UTS (MPa)	Hardness BHN	Density (g/cm ³)
ASTM A36 Steel	1450	440	120	7.87
316L Stainless Steel	2540	515	149	8.00

Setelah diperoleh sambungan dengan sifat-sifat yang bisa dianggap sama, karena dihasilkan dari parameter yang terkontrol, sambungan kemudian dipapar pada beban SCC dengan hanya temperatur yang merupakan kondisi yang divariasikan. Skema apparatus uji SCC

ditunjukkan pada Gambar 2. Temperatur kontrol dengan siklus tertutup digunakan untuk menjaga temperatur larutan korosif (HCl 0,5M) tetap pada temperatur 30°C, 40°C, 50°C selama proses pengujian. Untuk beban berat dan temperatur tertentu maka variabel terikat yang dicari adalah waktu patah dan dicatat untuk mendapatkan data ambang SCC (SCC threshold). Foto makro dari patahan diambil untuk memperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang fenomena patahnya sambungan akibat beban SCC.



Gambar 2. Skema pengujian SCC

HASIL DAN PEMBAHASAN

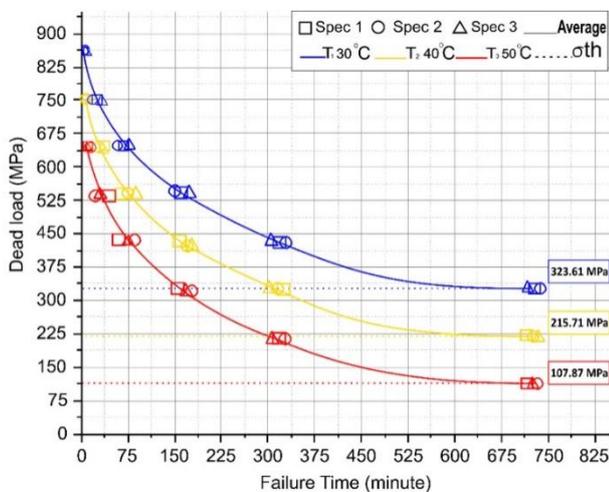
Ketahanan terhadap beban SCC dari sambungan diperoleh dengan mengevaluasi waktu patah ketika sambungan dipapar dalam larutan korosif dengan variasi temperatur dan beban. Beban divariasikan dari 5 hingga 45kg dengan selang 5kg yang jika dihitung secara berurutan bertepatan dengan tegangan 107,87; 245,74; 326,61; 431,87; 539,35; 647,22; 755,09; 862,95 dan 970,83 Mpa sedangkan temperatur larutan korosif dijaga tetap pada 30°C, 40°C dan 50°C selama proses pengujian. Untuk tiap kondisi pengujian diambil 3 data waktu patah dan hasilnya ditampilkan seperti terlihat pada Tabel 3. Ketika spesimen beban 970,83 Mpa; sambungan langsung putus dalam berbagai variasi larutan korosif karena tegangan diatas kekuatan ultimate dari sambungan (sekitar 862,96 Mpa). Ketika tegangan yang diberikan sedikit di bawah tegangan ultimatenya, pada larutan korosif dengan suhu 30°C sambungan hanya bertahan rata-rata selama 7 menit sedangkan ketika dipapar pada larutan korosif dengan suhu 40°C dan 50°C sambungan langsung patah.

Untuk mendapatkan gambaran yang menyeluruh dari data yang disajikan pada Tabel 3, data-data tersebut disajikan dalam bentuk grafik seperti terlihat pada Gambar 3. Perlu diingat untuk tiap variasi kondisi pengujian (beban dan suhu tertentu) ditarik 3 data dan garis regresi diperoleh dari rata-ratanya. Garis biru, kuning dan merah mewakili larutan korosif secara berturutan 30°C, 40°C dan 50°C. Untuk menginterpretasikan Gambar 3, bisa dievaluasi waktu patah (sumbu horizontal – x) yang sama atau dilakukan evaluasi pada beban (sumbu vertikal – y)

yang sama. Sebagai contoh, jika dilakukan evaluasi pada waktu patah yang sama yaitu 450 menit maka ketika sambungan dipapar pada suhu 30°C, 40°C dan

Table 3. Data pengujian SCC.

Beban (Kg)	Tegangan (MPa)	T1 (30 °C)		T2 (40 °C)		T3 (50 °C)	
		Waktu Patah (Minute)	Rata-rata (Minute)	Waktu Patah (Minute)	Rata-rat (Minute)	Waktu Patah (Minute)	Mean (Minute)
5	107,87	2500	2517,66	1630	1535,33	726	725,33
		2521		1625		723	
		2531		1653		727	
10	215,74	1631	1659,66	724	724,33	316	318,33
		1695		728		319	
		1653		721		320	
15	323,61	726	722,66	310	315,33	168	169,33
		723		320		165	
		719		316		175	
20	431,87	310	316,66	179	170,66	78	75,33
		315		168		73	
		325		165		75	
25	539,35	175	170,33	75	72,33	28	27,33
		165		69		25	
		168		73		29	
30	647,22	66	68,33	24	25,33	10	10,66
		68		25		14	
		71		27		8	
35	755,09	23	25,33	6	5	2	1,66
		27		5		2	
		27		4		1	
40	862,96	5	6,66	0	0,00	0	0,00
		9		0		0	
		6		0		0	
45	970,83	0	0,00	0	0,00	0	0,00
		0		0		0	
		0		0		0	



Gambar 3. Waktu patah

50°C bersesuaian secara berturut-turut dengan beban 365 Mpa, 252 Mpa dan 150 Mpa. Hal ini berarti jika sambungan dipapar dalam suhu yang lebih tinggi bisa

bertahan dalam waktu yang sama jika bebannya lebih rendah. Penjelasan yang lebih mudah diterima jika tinjauan dilakukan pada tegangan yang sama untuk berbagai variasi suhu. Semisal diterapkan beban 450 Mpa pada sambungan, kemudian sambungan dipapar pada larutan korosif dengan suhu 30°C, 40°C dan 50°C maka waktu patah secara berturut-turut 270, 140 dan 70 menit sehingga bisa dikatakan kenaikan temperatur dari larutan korosif akan menurunkan waktu sambungan bisa bertahan dalam kondisi SCC. Metode interpretasi ini bisa diulang untuk berbagai macam tegangan dan akan menghasilkan kesimpulan yang sama.

Ketika garis singgung korva mendekati garis horizontal, maka dianggap bahwa sambungan mendekati nilai ambang tegangan SCCnya (K_{ISCC}), yaitu jika tegangan di bawah tegangan ambang sambungan tidak akan pernah patah disebabkan oleh fenomena SCC. Secara praktis, ketika beban di bawah nilai tegangan ambang; spesimen belum patah hingga

5 jam dan percobaan dihentikan untuk menghemat waktu. Dari Gambar 3 dapat dikatakan tegangan ambangnya adalah 323,61 Mpa; 215,71 Mpa dan 107,87 Mpa ketika sambungan dipapar pada larutan korosif dengan temperatur secara berturutan 30°C, 40°C dan 50°C. Sehingga dapat dikatakan tegangan ambang dari sambungan akan berkurang dengan kenaikan temperatur.

Permukaan patah dari spesimen hasil uji SCC dengan beban mendekati tegangan ambangnya bisa dilihat pada Gambar 4. Permukaan patahan diperoleh dari spesimen yang dipapar pada suhu 30°C, 40°C dan 50°C. Dari gambar terlihat patahan dimana fenomena korosi mendominasi dan patahan dimana faktor utamanya adalah SCC. Dari Gambar 4, terlihat luasan daerah dimana korosi mendominasi akan lebih luas saat temperatur lebih tinggi hal ini berarti korosi akan lebih kuat dengan bertambahnya temperatur yang mendukung hasil uji SCC yang ditunjukkan pada Gambar 3.

KESIMPULAN

Dengan kenaikan temperatur larutan korosif akan menurunkan waktu patah dari sambungan dissimilar CDW. Tegangan ambang SCC dari sambungan yang terpapar larutan korosif dengan suhu 30°C adalah 323,61 Mpa; sedangkan untuk larutan korosif dengan suhu 40°C adalah 215,71 Mpa dan untuk larutan korosif dengan suhu 50°C adalah 107,87 Mpa. Evaluasi terhadap permukaan patahan mendukung hasil pengujian SCC yakni bahwa fenomena SCC akan semakin berbahaya untuk sambungan dissimilar CDW antara baja ASTM A36 dan baja stainless 316L jika larutan korosif (HCl) memiliki suhu yang lebih tinggi.

KONTRIBUSI PENULIS

Djarot B. Darmadi: konsep, mendesain metode riset, menganalisa data, menulis artikel.

Slamet Prasetyo Utomo: melaksanakan eksperimen, mendapatkan data eksperimen.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini didukung dana penelitian Hibah Professor Universitas Brawijaya tahun 2024.

DAFTAR PUSTAKA

[1] D.J. Kotechi and R.A. Moll, A Toughness Study of Steel Weld Metal from Self-Shielded Flux-Cored Electrodes – Part I, *Welding Journal*, Vol. 04, pp. 157s – 165s, 1970.

[2] Paul W. Holsberg, *Weldability Studies of Modified 70-30 CuNi Alloys*, *Welding Journal*, Vol. 12, pp. 554s – 558s, 1970.

[3] D.L. Olson, Prediction of Austenitic Weld Metal Microstructure and Properties, *Welding Journal*, Vol. 10, pp. 281s – 295s, 1985.

[4] S. Kou and Y. Le, Welding Parameters and the Grain Structure of Weld Metal – A Thermodynamic Consideration, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 19A, pp. 1075 – 1082, 1988.

[5] A.A. Shirali and K.C. Mills, The Effect of Welding Parameters on Penetration in GTA Welds, *Welding Journal*, vol. 07, pp. 347s – 353s, 1993.

[6] Ademola David Adeyeye and Festus A. Oyawale, Mixture Experiments and their Application in Welding Flux Design, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*, Vol. XXX, No.4, pp. 319 – 326, 2008.

[7] Luis Perez Pozo, Fernando Olvares Z., and Orlando Duran A., Optimization of Welding Parameters Using a Genetic Algorithm: A Robotic Arm-assisted Implementation for Recovery of Pelton Turbin Blades, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 7, no 11, 17 pages, 2015.

[8] Tushar Sonar, Visvalingam Balasubramanian, Sudersanan Malarvizhi, Thiruvenkatam Venkateswaran, and Dhenuvakonda Sivakumar, Effect of Welding Parameters on Microstructure and Tensile Properties of CA-TIG Welded AMS-5596 Grade Thin High Temperature Alloy Sheets for Gas Turbine Engine Applications, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, No. 2, 13 pages, 2021.

[9] Siti Noor Fritriani, Putu Hadi Setyarini, Victor Yuardi Risonarta, The Influence of Homogenization on Corrosion Rate of Zinc as Sacrificial Anode for API 5L X65 Steel, *International Journal of Mechanical Engineering Technoloties and Applications*, vol. 1, no.1, pp. 7 – 14, 2020. <https://doi.org/10.21776/mechta.2020.001.01.1>

[10] Dekrit H. Akbar, Purnami, Sugeng P. Budio, Influence of Surface Roughness and Paint Coating on Corrosion Rate, *International Journal of Mechanical Engineering*

- Technologies and Applications, vol. 1, no.1, pp. 15 – 19, 2020.
<https://doi.org/10.21776/mechta.2020.001.01.3>
- [11] C. Manfredi and J.L. Otegui; Failures by SCC in buried pipelines, *Engineering Failure Analysis*, Vol.9, pp. 495-509, 2002.
- [12] J. Wang and A. Atrens; Microstructure and grain boundary microanalysis of X70 pipeline steel, *Journal of Material Science*, vol.38, pp.323-330, 2003.
- [13] Djarot B. Darmadi, Lingga P. Setiawan, Sahrudin Mahzan, Evaluating the GMAW Joint with a Constant Heat Input, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol.54, no.2, pp.142-149, 2019.
- [14] T. Anita, H. Shaikh, H.S. Khatak, and G. Amarendra, Effect of Heat Input on the Stress Corrosion Cracking Behavior of Weld Metal of Nitrogen-Added AISI Type 316 Stainless Steel, *Corrosion*, vol. 60, no. 9, pp. 873 – 880, 2004.
- [15] D. Harish Kumar and A Somi Reddy, Study of [Mechanical Behavior in Austenitic Stainless Steel 316 LN Welded Joints, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotic Research*, vol. 2, no.1, pp. 37 – 56, 2013.
- [16] K.S. Pujari and D.V. Patil, A Review on GTAW Technique for High Strength Aluminium Alloys (AA 7xxx series), *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, No.8, pp 2477 – 2490, 2013.
- [17] Kai Wang Chan and Sie Chin Tjong, Effect of Secondary Phase Precipitation on The Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steels, *Materials*, vol. 7, pp. 5268-5304, 2014.
- [18] M. Vinoth Kumar, V. Balasubramanian, S. Rajakumar, Shaju K. Albert, Stress Corrosion Cracking Behaviour of Gas Tungsten Arc Welded Super Austenitic Stainless-Steel Joints, *Defence Technology*, vol. 11, pp. 282 – 291, 2015.
- [19] Hong-Liang Ming, Zhi-Ming Zhang, Peng-Yuan Xiu, Jian-Qiu Wang, En-Hou Han, Wei Ke, Ming-Xing Su, Microstructure, Residual Strain and Stress Corrosion Cracking Behavior in 316L Heat-Affected Zone, *Acta Metallurgica Sinica*, vol. 29, no.9, pp. 848-858, 2016.
- [20] Djarot B. Darmadi, Natanael Ardi Sugiarto, Femiana Gapsari, Stress Corrosion Cracking at ASTM A36 Plate with Varied Grain Orientation, *International Review of Mechanical Engineering*, vol.12, no. 12, pp. 987-991, 2018.
- [21] M. Vinoth Kumar and V. Balasubramanian, Hot Tensile Properties and Constant Load Stress Corrosion Cracking Test Data of Autogenous Weld Joint of Super 304HCu Stainless Steel in Boiling MgCl₂ solution, *Data in Brief*, vol. 18, pp 102-110, 2018.
- [22] R Sepe, F Bollino, F Caiazzo and F Berto, Stress Corrosion Cracking Behavior of Welding Joint of High Strength Steel, *IoP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1038, 012055, 2021.
- [23] Nigel Scotchmer, The Current Rise in the Use of Capacitor Discharge Welding, *Welding Journal*, February 2015.
- [24] Max-Martin Ketzler, Martin Hertel, Jorg Zschetzsche, Uwe Fussel, Heat Development of the Contact Area During Capacitor Discharge Welding, *Welding in the World*, vol. 63, pp. 1195-1203, 2019.
- [25] Djarot B. Darmadi, Femiana Gapsari, Osmar Buntu Lobo, and Firman Mangasa Simanjuntak, Stress Corrosion Cracking Threshold for Dissimilar Capacitive Discharge Welding Joint with Varied Surface Geometry, *Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, 12 pages, 2020.