



УДК 621.721.052:539.4.014

Прохоренко О.В., Перепічай А.О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Україна, м. Київ

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЗАВЯРУВАНИЯ ПОЗДОВЖНИХ ШВІВ ВУЗЛА ПЛИТИ ТРОТУАРНОЇ

Розглянуто вплив різних технологічних послідовностей заварювання поздовжніх швів на залишкові переміщення поздовжньої осі вузла плити тротуарної. Розв'язок задачі виконаний методом скінчених елементів. За результатами розв'язку з метою мінімізації переміщень поздовжньої осі зварного вузла запропоновані рекомендації для вибору оптимального варіанту послідовності виконання зварних швів під час зварювання.

Ключові слова: плита тротуарна; метод скінчених елементів; зварювальні переміщення

Вступ

В результаті нерівномірного нагрівання металу під час зварювання під дією швидкозмінного ви-

сокоградієнтного температурного поля зварювальної дуги в металі відбуваються нелінійні пружно-пластичні зміни об'єму металу зварюваних кон-

структивних елементів, внаслідок чого утворюються тимчасові напруження і деформації, які згодом переходять у залишкові.

Залишкові зварювальні напруження, деформації і переміщення змінюють проектну форму і розміри зварюваних конструктивних елементів, знижують точність і якість виготовлення в цілому зварної конструкції.

Під час зварювання недостатньо жорстких конструкцій, зазвичай, змінюються не тільки геометричні розміри, кути, а й утворюються такі переміщення як прогини, які унеможливають подальше використання виготовленої конструкції за призначенням.

Результатом експлуатації зварних вузлів з полем залишкових зварювальних напружень під дією зовнішніх навантажень є локальна або загальна втрата стійкості виробу, порушення нормальної роботи зварної конструкції і, як наслідок, її руйнування.

Проектування зварного виробу і розробку технології його виготовлення необхідно виконувати одночасно з урахуванням вимог забезпечення мінімальних зварювальних переміщень і працездатності конструкції.

Оптимальність технології виготовлення зварної конструкції може бути забезпечена лише за наявності знань про утворення і розвиток зварювальних напружень, деформацій і переміщень, оскільки на величину залишкових переміщень зварних конструкцій впливають не тільки спосіб і параметри режиму зварювання, але і послідовність та кількість одночасно зварених швів.

Отже, актуальною задачею є необхідність визначення величини очікуваних переміщень ще на стадії проектування технології виготовлення зварного виробу.

На сьогодні відомі інженерні аналітичні методи розрахунку залишкових напружень і переміщень [1, 2], засновані на визначенні об'єму відносного поздовжнього пластичного скорочення металу зварного з'єднання з обох боків шва, де вплив властивостей матеріалу врахований через співвідношення α/c_p , а тепловий вплив зварювальної дуги – через погонну енергію зварювання q_{noz} . Однак, метод Кузьміна [1] не враховує для конструкцій пониженої жорсткості початкові напруження від попередньо зварених швів, що обмежує номенклатуру одновимірних конструкцій лише тими, які мають один поздовжній шов, а в методі Гатовського [2] прийнята схематизована діаграма розтягу-стиснення, яка базується на припущенні про незмінність межі текучості і модуля пружності матеріалу в широкому діапазоні температур і тому може бути використана, головним чином, для низько вуглецевих сталей. Для багатьох інших металів і сплавів зменшення їх межі текучості і модуля пружності при збільшенні температури відбувається так стрімко, що згадане припущення стає неприйнят-

ним. Часто в початковий період деформування при відносно низьких температурах може мати місце зміцнення металу, тому бажано виконувати розрахунки безпосередньо за дослідними кривими без їх схематизації.

Пластичні деформації і великі переміщення під час зварювання призводять до нелінійності задачі, а отже розв'язування є можливим тільки за допомогою числових методів. Найбільшого поширення для визначення напружень і деформацій набув метод скінчених елементів, як такий, що дозволяє враховувати зміну теплофізичних властивостей з температурою, складну геометрію виробу, реальну схему навантажень. Значний розвиток обчислювальної техніки впродовж останніх років зумовив появу достатньо потужних обчислювальних машин, що дозволило розраховувати величину залишкових зварювальних напружень і переміщень з прийнятними витратами часу і високою точністю, хоча і з високими вимогами до рівня підготовки фахівця, який виконує такі обчислення.

У цій роботі розглянуто розв'язування деформаційної задачі для визначення переміщень, спричинених процесом зварювання у зварному вузлі плити тротуарної.

Мета і задачі роботи

Метою роботи є визначення методом скінчених елементів полів залишкових переміщень поздовжньої осі вузла плити тротуарної від заварювання поздовжніх швів за різними технологічними послідовностями.

Задачами роботи є розробка скінченно-елементної моделі вузла плити тротуарної на основі його геометричної моделі, вибір матеріалу виробу та вхідних параметрів для моделювання температурного навантаження від зварювання, вибір граничних умов по закріпленню зварюваного вузла в процесі зварювання, визначення переміщень зварного виробу, систематизація та візуалізація результатів розрахунку, обробка і аналіз результатів розрахунків, формулювання висновків і рекомендацій.

Основна частина

Задачу розв'язували методом скінчених елементів для зварного вузла плити тротуарної завдовжки – 8000 мм, який складається з плити-основи завтовшки 10 мм і трьох поздовжніх ребер завтовшки 8 мм з трапецеподібним поперечним перерізом, які приварені до плити-основи автоматичним зварюванням під флюсом шістьма поздовжніми кутувими швами. Поперечний переріз геометричної моделі зварного вузла показаний на рис. 1.

На основі геометричної моделі зварного вузла розроблена скінченно-елемента модель (рис. 2) зварного вузла, виготовленого з низько вуглецевої низьколегованої сталі St.52, хімічний склад і меха-

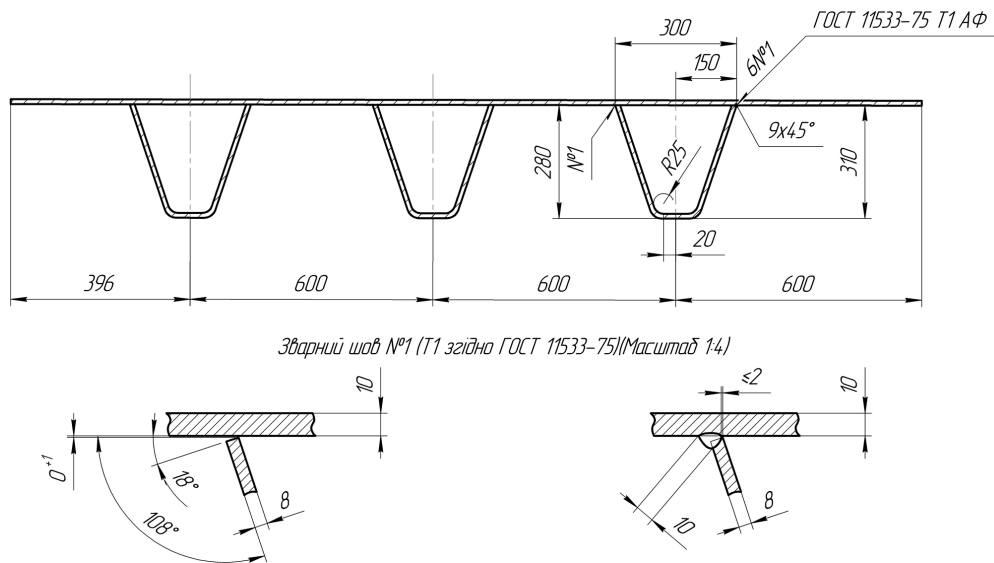


Рис. 1. Поперечний переріз зварного вузла плити тротуарної

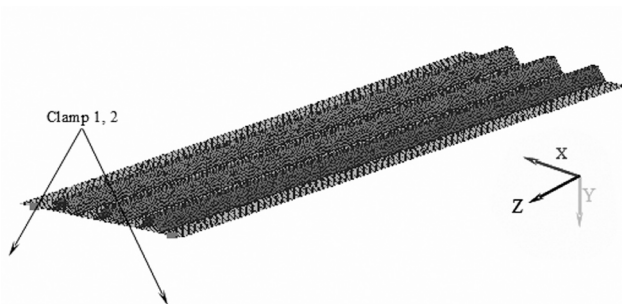


Рис. 2. Кінцево-елементна модель вузла плити тротуарної

нічні властивості якої наведені у табл. 1, 2. Кількість вузлових змінних 72823, сітка кінцевих елементів комбінована: нерегулярна в місцях віддалених від зварних швів і впорядковано-щільна в місцях зварювання. Для зменшення машинного розрахункового часу виріб моделювали в натуральному розмірі 2D – shell елементами. На торці моделі вибрані вузли, які жорстко закріплені по трьом осям для уникнення переміщень і моделювання граничних умов "Clamp 1, 2" закріплення моделі під час зварювання та охолодження.

Кінцево-елементне моделювання виконано у програмному комплексі «Weld Planner», заснованому на спрощеному підході до визначення переміщень виробу. Основою розрахунків є припущення, що еквівалентне навантаження має бути пропорційним величині переміщень вузлів виробу від зварювання. Переміщення вузлів виробу визначаються програмно за наступним рівнянням [4]:

$$x = k^{-1} \times F = k^{-1} \times (E \times q_{noz} \times \alpha) / c_p,$$

де x – «зона усадки» (мм), показана на рис. 3; F – еквівалент усадкової сили від зварювання (Н); k – еквівалент усадкової жорсткості зони термічного впливу (Н/мм); E – модуль пружності (Н/мм²); q_{noz} – погонна енергія (Дж/мм); α – коефіцієнт лінійного розширення (1/°C); c_p – об'ємна теплоємність (Дж/°C × мм³).

Погонна енергія зварювання безпосередньо впливає на такий параметр як "зона усадки" зварного шва, і охоплює зону розплавляемого під час зварювання металу і зону термічного впливу [5]. Тобто "зона усадки" – це зона пластичного навантаження, а напруження дорівнюють границі текучості матеріалу.

Таблиця 1.

Хімічний склад низьковуглецевої сталі St.52 [3]

Елемент	C	Mn	Si	S	P
Кількість, %	<0,2	<1,6	<0,55	<0,035	<0,035

Таблиця 2.

Механічні властивості низьковуглецевої сталі St.52 [3]

Модуль Юнга, МПа	Границя текучості, МПа	Коефіцієнт Пуассона
2,1×10 ⁵	355	0,33

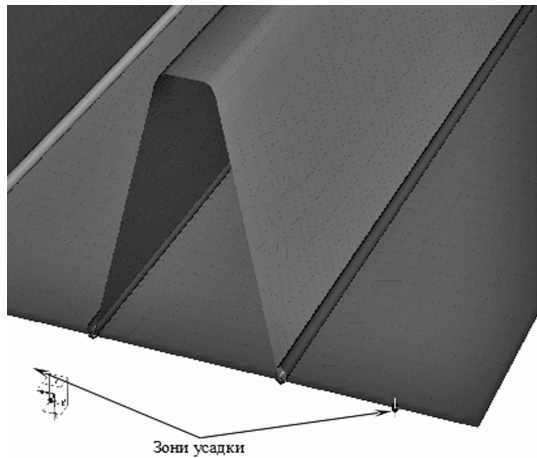


Рис. 3. «Зони усадки» зварних швів

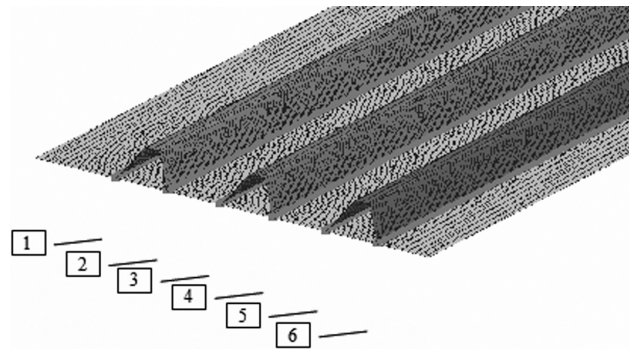


Рис. 4. Нумерація зварних швів

Таблиця 3.

Вхідні параметри для кінцево-елементної моделі

Конструктивний елемент	Плита-основа	Ребра
Спосіб зварювання	Дугове зварювання під шаром флюсу	
Матеріал	St.52	
Товщина, мм	10	8
Ширина «зони усадки», мм	10	
Погонна енергія зварювання, Дж/мм	5550	

Таблиця 4.

Варіанти послідовностей виконання зварних швів

Варіант	Послідовність виконання зварних швів					
1	всі шість швів заварені одночасно					
2	1	2	3	4	5	6
3	1, 2 одночасно		3, 4 одночасно		5, 6 одночасно	
4	1	2, 3 одночасно		4, 5 одночасно		6
5	4	3	2	5	1	6
6	1	6	2	5	3	4

Параметри, які необхідно задавати для визначення переміщень вузлів зварної конструкції у програмному комплексі «Weld Planner» наведені у табл. 3.

Окрім можливості задавати матеріал, реальну геометрію виробу і зварних швів перевагою даного програмного комплексу є можливість врахування різних варіантів закріплення під час зварювання і технологічної послідовності виконання зварних швів. В роботі виконано кінцево-елементне моделювання переміщень вузлів для таких послідовностей зварювання поздовжніх швів зварного вузла плити тротуарної (рис. 4, табл. 4).

Поля переміщень поздовжньої осі зварного виробу є типовими за характером деформування (рис. 5) і різняться лише числовими значеннями, тому для

різних послідовностей виконання зварних швів доцільно навести мінімальні і максимальні значення переміщень вздовж осей X, Y, Z (табл. 5).

За результатами кінцево-елементного моделювання для шести різних технологічних варіантів виконання зварних швів побудовані графічні залежності для поперечних (рис. 6) і поздовжніх (рис. 7) переміщень вузлів для поздовжньої центральної осі зварного виробу, а також показані прогини (рис. 8) зварного вузла.

Розподіл по довжині виробу максимальних значень складових вектора переміщень для різних варіантів заварювання швів показаний на рис. 9.

Аналіз графіків розподілу залишкових переміщень (рис. 6–9) зварного вузла плити тротуар-

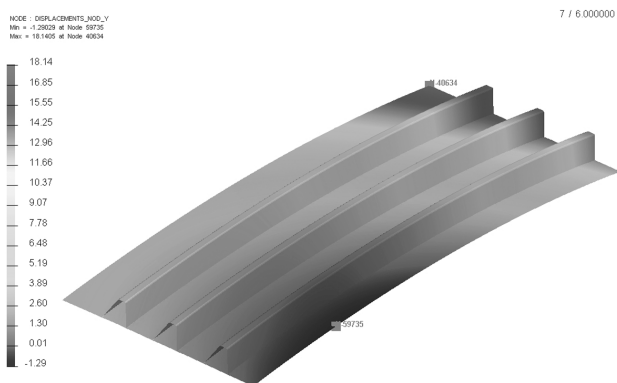


Рис. 5. Залишковий прогин поздовжньої осі для варіанту № 2: max – 18,14 мм; min – 1,29 мм

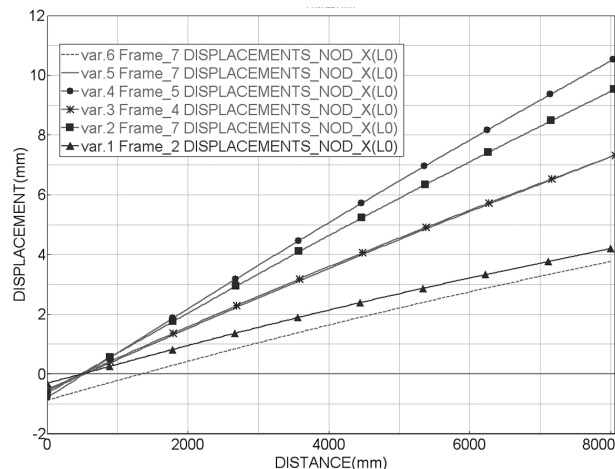


Рис. 6. Поперечні скорочення зварного вузла

Максимальні і мінімальні переміщення поздовжньої осі зварного вузла

Таблиця 5.

Варіант	Переміщення вузлів поздовжньої осі вузла плити тротуарної					
	Поперечне скорочення вздовж осі X, мм		Поздовжнє скорочення вздовж осі Z, мм		Прогин вздовж осі Y, мм	
	min	max	min	max	min	max
1	-0,31	4,21	0,82	1,21	-1,24	5,5
2	-0,65	9,52	1,09	1,49	1,45	15,04
3	-0,52	7,32	0,74	1,13	2,15	17,97
4	-0,79	10,53	1,4	1,79	-0,19	9,91
5	-0,56	7,27	1,12	1,51	-0,88	7,06
6	-0,88	3,77	0,79	1,18	-2,55	4,55

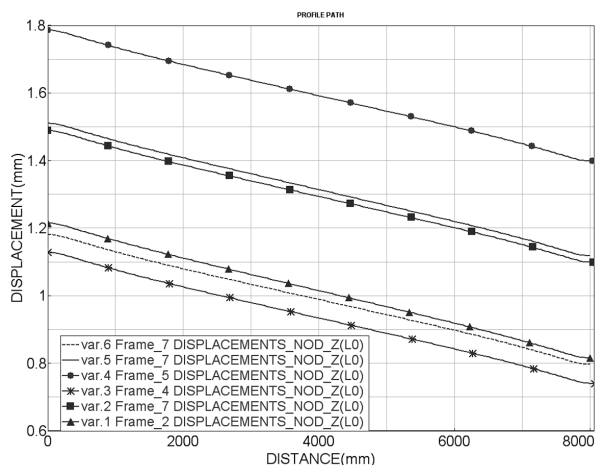


Рис. 7. Поздовжні скорочення зварного вузла

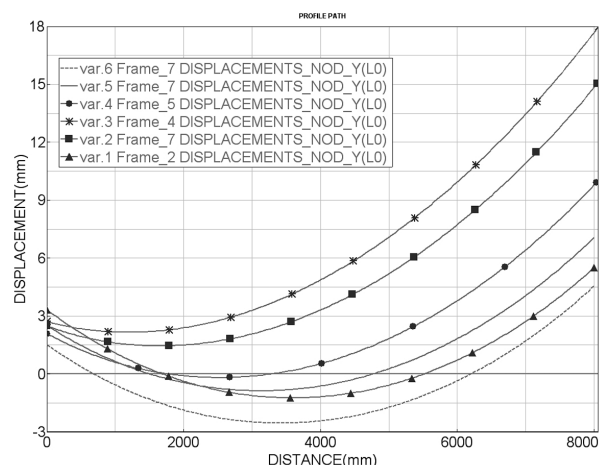


Рис. 8. Залишковий прогин поздовжньої осі зварного вузла

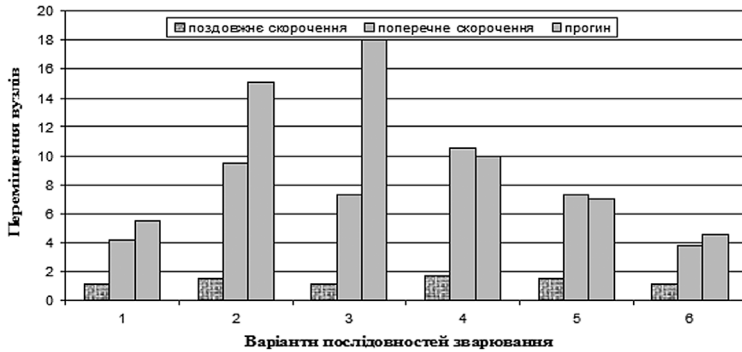


Рис. 9. Максимальні переміщення вузлів виробу по довжині

ної і зведених даних, представлених на рис. 9 показав, що:

– найменшим є прогин для варіанту зварювання поздовжніх швів № 6 – 4,55 мм (шви зварюють почергово ліворуч і праворуч від центральної поздовжньої осі починаючи із зварювання найвіддаленіших від центру), а найбільшим – 17,97 мм для варіанту зварювання № 3 (послідовне приварювання трьох ребер шляхом одночасного попарного зварювання швів для кожного ребра). Таку різницю (~3,9 рази) у величинах прогину можна пояснити меншими тепло вкладеннями за одну технологічну операцію і симетрією виконання зварних швів відносно центральної поздовжньої осі у варіанті № 6 на відміну від варіанту № 3.

– поперечні скорочення також є мінімальними – 3,77 мм для варіанту № 6, а максимальними – 10,53 мм для варіанту № 4 (одночасно по два шви зварюють тільки 4 з 6 швів, причому найвіддаленіші шви 1 і 6 зварюють першим і останнім відповідно). Незважаючи на симетричність виконання швів для варіанту № 4 (1, 2 і 3 одночасно – з одного боку від центральної поздовжньої осі, а потім 4 і 5 одночасно, 6 – з іншого) утворюються більші за величиною (у ~2,8 рази) поперечні скорочення від зварювання перших трьох швів, які неможливо компенсувати такою ж послідовністю зварювання інших трьох швів.

– поздовжнє скорочення зварного вузла плити тротуарної є найменшим – 1,13 мм для варіанту зварювання № 3, а найбільшим – 1,79 мм для варіанту № 4. Різниця у 1,6 рази пов'язана з перерозподілом об'ємів пластичних деформацій скорочення у двох інших напрямках.

– загальний характер розподілу всіх компонентів вектора переміщень по довжині є нерівномірним, що обумовлено наявністю закріплених вузлів на торці зварного вузла: поперечні скорочення і прогини збільшуються в напрямку вільного торця, а поздовжнє скорочення – зменшується.

– найменш сприятливими варіантами зварювання поздовжніх швів є технологічні

послідовності № 2 (почергове зварювання шести швів, яке викликає ефект кумулятивності сумарного прогину від кожного наступного звареного шва) і № 3, де приварювання ребер здійснюють одночасно двома швами, що призводить до максимального прогину з помірних усіх варіантів, обумовленого утворенням більших за величиною об'ємів пластичного скорочення, загальний центр ваги яких не співпадає з центром ваги поперечного перерізу зварного вузла.

Висновки

1. Найбільш сприятливим варіантом виконання зварних швів з точки зору мінімізації переміщень поздовжньої осі зварного вузла є варіант № 6.

2. Серед трьох компонент вектора переміщень для варіанту № 6 зварювання швів найбільше значення має компонента, яка показує прогин поздовжньої осі. Величина прогину перевищує поздовжні і поперечні переміщення у 3,85 і 1,2 рази відповідно.

3. Поперечні скорочення зварного вузла для оптимального варіанту № 6 у 3,2 рази більші за поздовжні, що свідчить про більшу жорсткість виробу у поздовжньому напрямку, а не у поперечному.

4. Технологічна послідовність зварювання № 1 є близькою (рис. 9) за результатами розрахунку переміщень, виконаних за варіантом № 6, що можна пояснити зменшенням жорсткості виробу під час одночасного зварювання шести швів і зближенням центрів ваги об'ємів пластичного скорочення і поперечного перерізу конструкції, але з економічних міркувань є недоцільною.

Література

- [1] Гатовский К. М., Кархин В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.
- [2] Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Изд. «Судостроение», 1974. – 286 с.
- [3] DIN 17100-1980 Steels for General Structural Purposes. Quality Standard.
- [4] Mohd Shahar Sulaiman et al., Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using WELD PLANNER, Journal of Mechanical Science and Technology 25 (10) (2011) 2641–2646.
- [5] WELD PLANNER USER'S GUIDE.



Prokhorenko D.V., Perepichay A.A.

National Technical University of Ukraine “Kyiv polytechnic institute“. Ukraine, Kyiv

OPTIMIZATION OF THE SEQUENCE OF WELDING LONGITUDINAL SEAMS NODE PAVING SLABS

The effect of various process sequences brewing longitudinal seams on the residual displacement of the longitudinal axis of the assembly sidewalk plate. Solution tasks performed by finite elements. As a result of the solution to minimize the displacement of the longitudinal axis of the weldment proposed guidelines for choosing the best variant sequence of welds during welding.

Keywords: sidewalk plate; finite element method; welding displacement

References

- [1] Gatovskij K. M., Karhin V. A. Teorija svarochnykh deformacij i naprjazhenij. Ucheb. pos. Leningr. korablestr. in-t, 1980. – 331 p.
- [2] Kuz'minov S. A. Svarochnye deformacii sudovykh korpusnykh konstrukcij. – L.: Izd. «Sudostroenie», 1974. – 286 p.
- [3] DIN 17100-1980 Steels for General Structural Purposes. Quality Standard.
- [4] Mohd Shahar Sulaiman et al., Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using WELD PLANNER, Journal of Mechanical Science and Technology 25 (10) (2011) 2641-2646.
- [5] WELD PLANNER USER'S GUIDE.