

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
ім. Є.О. Патона

Кафедра смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Ігор СМІРНОВ

«___» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Технологічні системи інженерії з'єднань
і поверхонь»

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Перспективи застосування технологій зварювання для
нестандартних конструкцій в екстремальних умовах»

Виконав (-ла):
студент (-ка) VI курсу, групи ЗС-01мн
Кобзар Наталія Павлівна _____

Керівник:
Доцент, к.т.н.,
Чвертко Євгенія Петрівна _____

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:
Доктор технічних наук, професор
Левченко Олег Григорович _____

Рецензент:
Доцент кафедри зварювального виробництва, к.т.н.
Стріленко Наталія Михайлівна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
ім. Є.О. Патона

Кафедра смарт технологій з'єднань та інженерії поверхонь

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 “Прикладна механіка”

Освітньо-наукова програма «Технологічні системи інженерії з'єднань і поверхонь»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ігор СМІРНОВ

«__» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Кобзар Наталії Павлівні

1. Тема дисертації «Перспективи застосування процесів зварювання в екстремальних умовах», керівник дисертації Чвертко Євгенія Петрівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «__» _____ 2022 р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації 6 червня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження — зварні з'єднання, виготовлені у нестандартних екстремальних умовах
4. Предмет дослідження — термічні цикли зварювання джерелами теплоти з різними характеристиками
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - дослідити сучасний стан технологій зварювання з точки зору обов'язкових умов отримання нероз'ємних з'єднань заданої якості;
 - проаналізувати сучасні підходи до компонування комплексів обладнання з урахуванням обов'язкових систем забезпечення;
 - провести моделювання циклів нагрівання-охолодження деталей з авіаційного сплаву 2024 в екстремальних умовах різними джерелами нагрівання;

-Представити результати моделювання термічних циклів з точки зору можливості прямого перенесення сучасних технологічних прийомів на екстремальні умови

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

- Сучасний стан проблем застосування технологій зварювання в позаземних умовах
- Узагальнена характеристика комплексів обладнання
- Методика проведення моделювання
- Аналіз результатів моделювання термічних циклів

7. Орієнтовний перелік публікацій

Тези конференцій — 2 шт.

Стаття у фаховому журналі — 1 шт.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
охорона праці	д.т.н. Левченко О.Г.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз сучасних технологій зварювання	Січень 2021 р.	
2	Аналіз сучасних комплексів обладнання	Травень 2021 р.	
3	Розробка моделі	Січень 2022 р.	
4	Моделювання процесів для різних умов, аналіз результатів моделювання	Квітень 2022 р.	
5	Огляд питань охорони праці	Травень 2022	
6	Оформлення роботи	До 6 червня 2022 р.	

Студент

Наталія КОБЗАР

Науковий керівник

Євгенія ЧВЕРТКО

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Людство все більше пізнає простори космосу, для вдалого подальшого вивчення без повернення на Землю стає актуальне питання колонізації планет і створення орбітальних станцій. При адаптації цих умов під Земні-зручні для людини. В перспективі самостійного виконання всіх запитів без залучання ресурсів з Землі Всі процеси, які використовують в земних умовах повинні бути адаптовані або створенні нові. Ремонтні роботи не виключення. Процес освоєння зварювання в космосі відносно новий і має велику перспективу вивчення.

Мета і завдання дослідження. Проаналізувати вхідні дані чотирьох умов для експериментального зварювання, а саме - Земля, Марс, Місяць, орбітальна станція. Використовуючи отриманні дані змодельовати і проаналізувати три види зварювання - плавким електродом, електронно-променеве зварювання, високотемпературна паяння.

Об'єкти дослідження. Зварні з'єднання, виготовлені у нестандартних екстремальних умовах

Предмет дослідження. Термічні цикли зварювання джерелами теплоти з різними характеристиками

Методи дослідження. Аналіз даних із інтернету, моделювання процесів зварювання у програмному забезпеченні Simufact.Welding 0.6

Наукова новизна отриманих результатів. Проведений унікальний дослід по протіканню фізико-хімічних процесів під час зварювання плавким електродом, високотемпературною пайкою і електронно-променевим зварюванням в земних умовах, на Марсі, на Місяці і в умовах орбітальної станції.

Практичне значення отриманих результатів. Отриманні результати можливо використовувати у плануванні космічних місій з виконанням ремонтних-зварювальних робіт.

Магістерська дисертація представлена: пояснювальною запискою форматом А4, обсягом 102 сторінки, включає в себе 7 частин, 27 посилань, 75 графічних зображень, 5 таблиць.

Ключові слова: зварювання, космос, Місяць, Марс, Земля, орбітальна станція, плавкий електрод, електронно-променеве зварювання, високотемпературне паяння.

ABSTRACT

Actuality of theme. Mankind is increasingly learning about space, for successful further study without returning to Earth, the issue of colonization of planets and the creation of orbital stations is becoming relevant. When adapting these conditions to Earth, they are convenient for humans. In the perspective of self-fulfillment of all requests without the involvement of resources from the Earth All processes used in the earth's environment must be adapted or create new ones. Repair work is no exception. The process of mastering welding in space is relatively new and has great potential for study.

The purpose and objectives of the study. Analyze the input data of four conditions for experimental welding, namely - Earth, Mars, Moon, orbital station. Using the obtained data to model and analyze three types of welding - fusible electrode, electron beam welding, high temperature soldering.

Objects of research. Welded joints made in non-standard extreme conditions

Subject of study. Thermal cycles of welding with heat sources with different characteristics

Research methods. Analysis of data from the Internet, modeling of welding processes in Simufact.Welding 0.6 software

Scientific novelty of the obtained results. A unique experiment on the course of physicochemical processes during fusion electrode welding, high-temperature soldering and electron-beam welding in terrestrial conditions, on Mars, on the Moon and in the conditions of the orbital station.

The practical significance of the results obtained. The obtained results can be used in the planning of space missions with the performance of repair and welding works.

The master's dissertation is presented by: an explanatory note in A4 format, volume 102 pages, includes 7 parts, 27 references, 75 graphic images, 5 tables.

Key words: welding, space, Moon, Mars, Earth, orbital station, fusible electrode, electron beam welding, high temperature soldering.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ КОСМОСУ	10
1.1. Сучасний стан	10
2 СТАН СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ	13
2.1. Зварювання плавким електродом.....	17
2.2. Плазмове зварювання.....	20
2.3. Електронно-променеве зварювання	22
3 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ	24
3.1. Обладнання для зварювання плавким електродом	24
3.2. Обладнання для електронно-променевого зварювання.....	27
3.3. Обладнання для плазмового зварювання	33
3.4. Аналіз адаптації зварювальних установок під умови відмінні від земних	36
4 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПРОЦЕСІВ, ЯКІ ПРОТІКАЮТЬ ПРИ ЗВАРЮВАННІ В УМОВАХ ВІДМІННИХ ВІД ЗЕМНИХ.....	38
4.1 Нагрівання та охолодження	38
4.2. Пластична деформація	41
4.3. Видалення поверхневих плівок	44
5 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ І ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК.....	47
5.1.Моделювання зварювання плавким електродом на Землі і на Марсі	47
5.2. Моделювання зварювання плавким електродом на Землі і на Місяці....	54
5.3.Моделювання зварювання плавким електродом на Землі і на орбітальній станції	58
5.4. Моделювання електронно - променевого зварювання	66
5.4.1.Моделювання електронно-променевого зварювання.	67
5.5. Моделювання високотемпературного паяння	77
5.5.1.Моделювання паяння на Марсі	77
5.5.2. Моделювання паяння на Місяці.....	80
5.5.3.Моделювання високотемпературної паяння в умовах відкритого космосу, на орбітальній станції.....	82
5.5.4.Моделювання високотемпературної паяння в умовах Землі.....	85
6 АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ	

У ПОЗАЗЕМНИХ УМОВАХ.....	87
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	90
7.1. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ).....	90
7.2. Забезпечення допомоги в разі виникнення космічної аварії.....	92
7.3. Спеціальний одяг для астронавтів-зварювальників.....	95
ВИСНОВКИ	100
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	101

ВСТУП

В цій магістерській дисертації проводиться моделювання і аналізу протікаючих процесів у конструкції для зварювання в неземних умовах.

Для моделювання зварного процесу було побудовано збірну конструкцію із пластини (150X150X50)мм на яку кріпиться труба з зовнішнім діаметром 400мм, товщиною 20мм, висота 400мм. Матеріалом деталей був вибраний аналог сплаву 2024-AlCuMg2.

За мету взято аналіз циклів нагрівання та охолодження при зварюванні для умов Земних умов, на Марсі, на Місяці, на орбітальній станції(в середині судна і поза його межами). При моделюванні звичайну зварні електрод або лазер буде замінено на три види джерел теплоти: високотемпературне з підвищеною концентрацією енергії, високотемпературне та з температурою нижче температури солідус,що для обрано матеріалу буде дорівнювати 640°C.

Проаналізуємо розповсюдження теплоти в деталі після завершення зварювання і високотемпературного паяння.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ КОСМОСУ

Перші вивчення космічного простору почались з елементарного - розміри нашої планети, форма, розташування. Про те, що Земля має форму круга люди дізнались спостерігаючи за кораблями з пірса, корпус зникав раніше ніж щогли. Древні вчені Аристотель та Евдокс Книдский спостерігали за тінями, які відкидає земля при місячних затемненнях. Допомогли і мандрівники, які розповідали про різні сузір'я на небі, що не можливо при рівній поверхні Землі. Прямі докази про те, що Земля крутиться навколо Сонця, а не навпаки були лише в 1727р. Земля розташована в комічному просторі в Сонячній системі, яка складається з восьми планет (Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун), більше сотні їх супутників, пояс астероїдів, пояс Койпера, комети, метеороїди та космічний пил. Головним тілом в цій системі є Сонце.

Єдиним супутником Землі - Місяць, яку люди з початку її вивчення розглядають як потенційну модель для колонізації але вона не має ні води(є виключенням заморожена вода на поверхні), ні їжі, яку потрібно буде доставляти із Землі.

Що до колонізації планет Сонячної системи, було виділено список тіл які теоретично можуть бути колонізовані людьми, це -Марс, Меркурій, Венера, Екзопланета, Астероїди, Супутники Юпітера, Супутники Сатурна та окремим але дуже близьким за місією є ідея Орбітальної колонії.

Проблеми які стають на шляху дуже схожі, наявність води, можливість пристосувати поверхню бід ґрунт для вирощування рослин, наявність або відсутність атмосфери, атмосферний тиск та інші.[1]

1.1. Сучасний стан

На сьогоднішній день проведено багато досліджень, які науковим шляхом виділили три найбільш актуальні варіанти для освоєння людиною: космічні станції на навколоземній орбіті, Місяць та Марс. У Табл.1.1. перераховані основні

характеристики, які будуть використовуватись у П.5.

Таблиця 1.1 – Чисельні характеристики Місяця, Марса і орбітальної колонії

	Місяць	Марс	Орбітальні колонії
Наявність гравітації	$(10^{-6} \text{ м/с}^2)/6 = \text{гравітація Землі} / 6$	0,38г	Рівна Земній
Наявність атмосфери	Практично не впливає на Місяць і не сприяє життю людей на супутнику.	Орієнтовна товщина атмосфери — 110 км. Приблизна маса атмосфери — $2,5 \times 10^{16} \text{ кг}$	Станцію планувалося забезпечувати атмосферою з тиском, рівним половині земного.
Діапазон температур	На екваторі 390K(116,8°C), вночі 100K(-173.1°C)	Максимальна становить +30 °C (опівдні на екваторі), мінімальна — -123 °C (взимку на полюсах).	В середині +23-+27. За бортом: за планетою(тінь) - 150°C; під прямим сонячним промінням, становить полярне значення, але вже зі знаком плюс: +150°C.
Склад атмосфери	В десять трильйонів разів менш щільна (тиск на поверхні приблизно 10 нПа) у порівнянні з земною атмосферою, яка складається в основному з водню, гелію, неону та аргону та менша кількість іонів натрію та калію.[1]	Атмосфера складається переважно з вуглекислого газу (95 %) з домішками азоту, аргону, кисню та інших газів. Є, зокрема, і домішка водяної пари. Варто відзначити, що, попри розрідженість марсіанської атмосфери, концентрація вуглекислого газу в ній приблизно в 23 рази більша, ніж у земній. Її склад і тиск унеможливають дихання земних організмів.	Складається з 40 % кисню і 60 % азоту. Такий тиск дозволяв би зберегти повітря і зменшити навантаження на стіни.

Не менш важливими факторами в урахуванні умов в цих трьох випадках є:

Гравітація на Марсі приблизно в 2,63 рази менша (0,38 г), ніж на Землі. Чи достатньо цього, щоб уникнути проблем невагомості, поки невідомо. Значно відрізняється від атмосфери Землі як за хімічним складом, так і за фізичними параметрами.[2] Тиск на поверхні 0,7-1,155 кПа (1/110 тиску в атмосфері Землі на рівні моря, що дорівнює тиску в атмосфері Землі на висоті понад тридцять кілометрів). Марс має дуже слабе магнітне поле (порівняно з Землею), і в результаті сонячний вітер поступово «виносить» атмосферу в космос зі швидкістю

300 ± 200 тонн на добу, залежно від поточної сонячної активності та відстані від Сонця. Через конденсацію великої кількості вуглекислого газу в полярних льодах взимку та його випаровування влітку.

Гравітація на Місяці в шість разів слабша за земну. Через це Місяць навіть не здатен утримати гази, які випаровуються з його надр, і вони летять у космос. Це і є причиною того, що у Місяця немає щільної атмосфери. Атмосфера на Місяці значно менша за своєю щільністю у порівнянні з Земною. Основні її складові: гелій, водень, неон та аргон. Радіо випромінення. Астронавт після 100 годин на поверхні Місяця з імовірністю 10 % отримає небезпечну для здоров'я дозу (0,1 Грея). У разі ж сонячного спалаху небезпечну дозу можна отримати протягом декількох хвилин. Місячний пил - складається з гострих частинок (оскільки немає згладжувального впливу ерозії), а також має електростатичний заряд. Внаслідок цього проникає скрізь і абразивним зношуванням зменшує термін роботи механізмів. Потрапляючи в легені він стає загрозою для здоров'я людини.

Що до орбітальної станції, циліндри обертаються, створюючи штучну гравітацію на їх внутрішніх поверхнях. При великому радіусі циліндр буде робити 40 обертів на годину, імітуючи звичайне земне тяжіння. Центральна вісь може бути зоною невагомості, і вона була передбачена для засобів обслуговування і відновлення. Створення подібних колоній-баз сприяло б і освоєнню Місяця, і більш далеких об'єктів Сонячної системи.

2 СТАН СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ

Розвиток зварювання у відкритому космосі є потенціальною темою для вивчення, оскільки це один із методів адаптації людей в неземному середовищі. Мета освоєння такої технології зробити ремонтні, і не тільки, роботи не залежними від умов, що є нормальними на поверхні Землі.

Зварювання у відкритому космосі вважається відносно новою індустрією. Перші експерименти були проведені у 1965 році з використанням лабораторії встановленої на борту літака ТУ. Це були перші випробування для закриття питання - чи можливе зварювання в умовах невагомості? Інші суперечливі моменти такі, як необмежена швидкість дифузії газоподібних речовин із зони зварювання та значні зміни температури (від мінус 150 до плюс 130 градусів за Цельсієм) були протестовані в умовах реального процесу зварювання у відкритому космосі.

Першопрохідцем було судно “Союз-6” в 1969 році, для якого було розроблено унікальну зварювальну станцію “Вулкан”. На цій установці можна було проекспериментувати одразу три типи зварювання, а саме: електро-променеве зварювання, плазмове, дугове зварювання. В результаті з'ясувалося, що метод зварювання із застосуванням стислої дуги низького тиску не підходить для робіт в невагомості. У той же час електронно-променева технологія виявилася найбільш ефективною і дозволила забезпечити міцне з'єднання деталей високої якості.

Після першої вдалої спроби перед радянськими вченими з'явилися нові задачі:

- зниження ваги устаткування;
- зменшення споживаної електроенергії;
- виготовлення універсального пристрою, різання, паяння, зварювання;
- простота у використанні в умовах доступних для космонавтів.

В 1984 році за допомогою апарата “УРІ” розробки Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона було виконане перше зварювання у відкритому

космосі.

В наш час проведення космічного зварювання дозволяє вирішувати завдання пов'язані з ремонтом космічних апаратів, а також монтажем складанням металевих конструкцій. Найбільшого поширення набув метод електронно-променевого зварювання. Найперші пристрої зараз набувають максимальної модернізації, поліпшення, що дозволяє підвищувати їх коефіцієнт корисної дії.[3]

Враховуючи, те, що космічний простір є повністю відкритим, застосування способів зварювання, в яких використовуються пари або гази є проблематичним.

Сучасні види зварювання в космосі слабо відрізняються від такого в земних умовах. Для цих цілей використовується електронний промінь зі стиснутою дугою низького тиску з використанням електрода, що плавиться. Саме для точкового зварювання навіть не довелося розробляти нові моделі апаратів: процес зводився лише в мінімізації ваги і підвищенні ККД. Для цього було використано жорстку трубчасту конструкцію у формі ранця, що забезпечувала космонавту максимальну рухливість. Приклад зовнішнього вигляду такого ранця зображений на рис.2.1.

Єдина складність полягає лише в контролі за температурою деталей, що зварюються: в умовах вакууму формування оксидної плівки (втеченості) просто неможливо. Для контролю використовують інфрачервоні температурні датчики. В табл.2.1. зазначені види зварювання, які з фізичної сторони дослідів можливі в умовах відкритого космосу. Зараз NASA використовує ряд інноваційних методів зварювання, які дозволяють космічним кораблям витримувати суворі космічні подорожі, а також дозволяють проводити деякі ремонти в космосі:

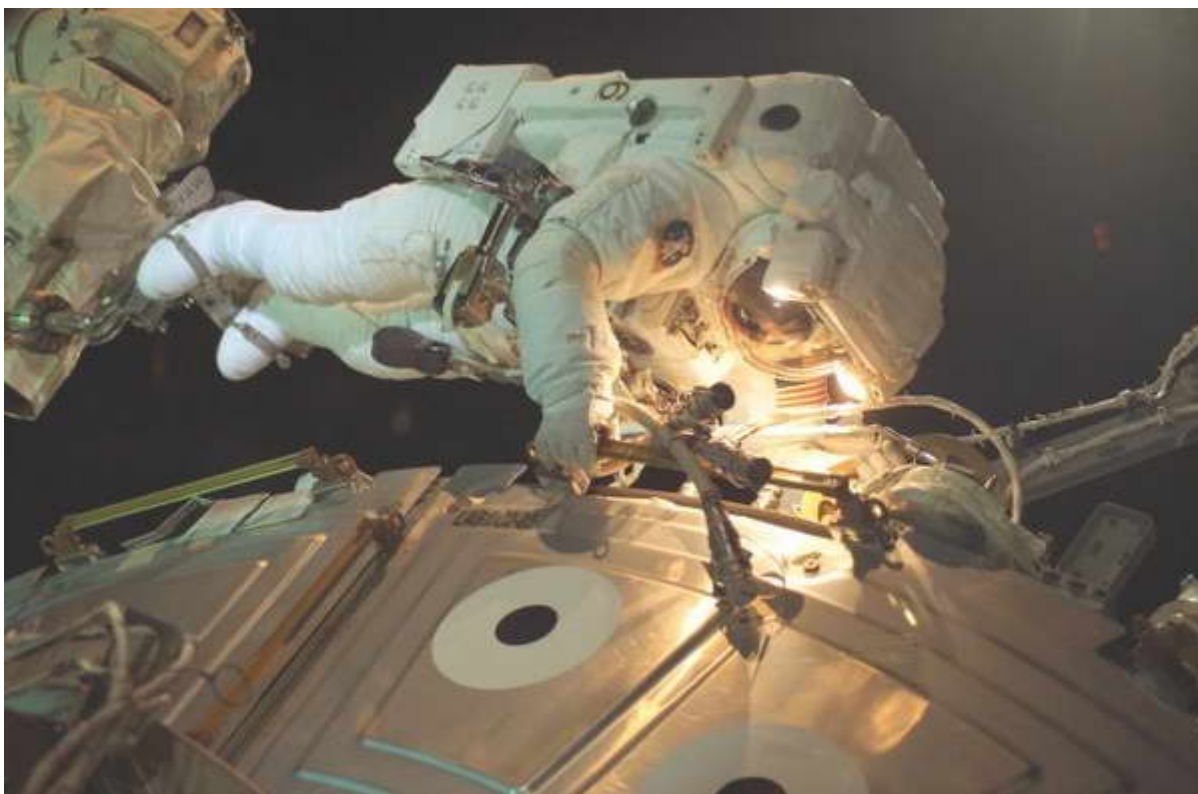


Рисунок 2.1 – Космонавт з переносним зварювальним пристроєм у вигляді ранця. Одним із них є зварювання тертям з перемішуванням – це техніка, яка використовує нагрівання тертям з тиском кутання для отримання високоміцних з'єднань, які практично не мають дефектів. Шпильковий інструмент, що обертається, розм'якшує, переміщує та створює зв'язок між двома металевими пластинами, утворюючи зварне з'єднання. NASA розробило абсолютно новий дизайн інструменту для зварювання тертям з перемішуванням.

Ультразвукове зварювання з перемішуванням - інший розроблений NASA процес зварювання, використовує стрижень для перемішування пластифікованих поверхонь двох металевих сплавів для формування зварного з'єднання. Тепло виробляється за допомогою індукційної котушки. Ультразвукова енергія зменшує небажані сили, збільшує швидкість переміщення та зменшує знос мішалки.

Таблиця 2.1 – Можливі способи зварювання у космосі.

Види зварювання	Можливість їх проведення у космосі
Ручне дугове	-
Під шаром флюсу	-
Плавким електродом	+
Неплавким електродом	-
Газополуменеве	-
Електрошлакове	-
Плазмове	+
Електронно-променеве	+
Лазерне	-
Термітне	-
Газове	-
Контактне точкове	+
Контактне шовне	+
Контактне стикове	+
Дифузійне	+
Ковальське	-
Вибухом	+
Тертям	+
Ультрозвукове	+

Ручний лазер - для невеликих зварювальних робіт, особливо в тісних місцях, NASA розробило портативний лазер. Він корисний завдяки своїй точності, здібностям і маневреності. Цей інструмент спочатку був розроблений для ремонту частин двигуна човника, але з тих пір отримав ліцензію NASA для використання в багатьох інших промислових процесах.

При використанні земних технологій у зварюванні та споріднених процесах потрібно враховувати особливі умови відкритого космосу\космічного середовища.

Найбільший вплив робить на технологічні процеси та на умови функціонування пристроїв та діяльності космонавтів-зварників: невагомість, вона ж мікрогравітація; вакуум в умовах космосу; різкі світло-тінові границі; підвищенна агресивність космічного середовища, що виникає в умовах високої концентрації атомарного та іонізованого кисню; вакуумне ультрафіолетове

випромінювання Сонця; вплив на матеріали разом з їх з'єднання протонів і електронів радіоційних поясів Землі; вплив мікротеоритних частинок природного та штучного походження. У зв'язку зі впливом градієнта гравітаційного поля Землі, функціонуванням різноманітних агрегатів, нерівномірним розподілом маси космічного корабля, обертанням його навколо центра мас тощо на космічному кораблі ніколи не реалізується стан, коли сили, що діють на об'єкт, дорівнюють нулю. Тому звичайно застосовується термін "мікрогравітація", що характеризує стан об'єкта, при якому сума усіх сил, діючих на об'єкт, набагато менша, ніж на Землі.

Мікрогравітація є впливовим фактором не лише на діяльність космонавта-оператора. Під її дією істотно змінюється характер фізичних процесів у рідких і газових середовищах та багатофазних системах, які мають газову фазу, рідку фазу та тверду фазу. При цьому істотно зменшується гравітаційна конвекція та різко збільшується роль хімічної і термокапілярної конвекції, практично повністю відсутній розподіл фаз за рахунок різниці густини речовин, значно зростає вплив сил поверхневого натягу та адгезії. Тепло та масообмін в умовах мікрогравітації визначаються процесами теплопровідності та дифузії.

Космічний вакуум відрізняється тим, що видавлення газів, які утворюються у ході процесу відбувається миттєво, та відмінністю є склад газового середовища. Насамперед, у космічному вакуумі дуже великий вміст атомарного та іонізованого кисню. Наприклад, при висоті польоту близько 260 км в 1 см³ космічної атмосфери сумарна кількість атомів та іонів кисню дорівнює $(2,1-2,5) \cdot 10^9$, а при зростанні висоти польоту до 500 км – $(0,39-1,7) \cdot 10^8$.

2.1. Зварювання плавким електродом

При зварюванні плавким електродом нагрів та розплавлення зварювальної ділянки відбувається електричною дугою. До електроду і зварювального виробу від зварювального трансформатора \ агрегату \ перетворювача \ інвентора підводиться електроенергія для утворення і подальшої підтримки електричної дуги. При механічному контакті електрода і виробу протікає зварювальний струм. Під дією

теплоти(до 7000°C), що утворюється в електричній дузі , електродний метал та кромки деталі розплавляються утворюючи зварювальну ванну. При рідкій фазі ванни основний метал переміщується з компонентами електрода, після чого метал починає застигати, на верхній шар зварного з'єднання спливає шлак. Розрізняють електрозварювання змінним струмом і електрозварювання постійним струмом. При зварюванні постійним струмом шов виходить із меншою кількістю бризок металу, оскільки немає переходу через нуль та зміни полярності струму.

В апаратах для електрозварювання постійним струмом застосовуються випрямлячі.

Можливе керування положенням зварювальної дуги при зварюванні постійним струмом. Дуга є провідником струму і як звичайний провідник відхиляється в магнітному полі відповідно до закону Ампера.

Параметри, що настраюються:

- струм зварювання (або швидкість подачі електродного дроту);
- напруга дуги (або довжина дуги);
- полярність струму зварювання;
- швидкість зварювання;
- довжина вильоту електродного дроту;
- нахил електрода (пальника);
- становище зварювання;
- діаметр електрода;
- склад захисного газу;
- витрата захисного газу/флюсу [4].

Процеси плавким електродом підходять для зварювання всіх звичайних металів, таких як нелеговані та низьколеговані сталі, нержавіючі сталі, алюміній та деякі інші кольорові метали. Більше того, цей процес зварювання може бути використаний у всіх просторових положеннях.

Для захисту від окиснення металу зварного шва застосовують захисні гази (аргон, гелій, вуглекислий газ та їх суміші), вони подаються зі зварювального сопла.

Засоби створення захисного середовища розрізняють на:

- дугове зварювання без захисту (голим електродом, електродом зі стабілізуючим покриттям);
- дугове зварювання зі шлаковим захистом (товсто покритими електродами, під флюсом);
- дугове зварювання зі шлакогазовим захистом (товсто покритими електродами);
- дугове зварювання з газовим захистом (в середовищі захисних газів) (TIG, MIG/MAG);
- дугове зварювання з комбінованим захистом (газове середовище та покриття або флюс).

Дослідження показали, що при електродуговому зварюванні в космосі тиск парів металу недостатній для існування локалізованого розряду. Дуга характеризується наявністю великих активних плям, які блукають на поверхнях електродів, та низькою проплавляючою дією. В умовах мікрогравітації краплі металу на плавкому електроді можуть досягати великих розмірів. Найбільш ефективним способом керування переносом електродного металу є зварювання модульованим струмом у вигляді окремих імпульсів. Що до залежності цього виду зварювання від атмосфери, конкретні різновиди цього зварювання, які виконуються з використанням захисного газу не можливі у вакуумі тому, що це унеможливорює направлення потоку газу.

Як і при всіх видах зварювання є найбільш розповсюдженні види дефектів. До зовнішніх дефектів відносять: напливи, подрізи, непровари, тріщини і пори. До внутрішніх - приховані пори, тріщини, непровари, шлакові включення. Щоб уникнути дефектів потрібно деталь забезпечувати попереднім контролем матеріалів та заготовок, також потрібен поточний контроль з приймальним контролем вже зварних виробів. Вид контролю, руйнівний чи не руйнівний залежить від даних, які потрібно отримати як результат.

2.2. Плазмове зварювання

Для одержання зварювальної плазми застосовуються плазмові пальники, вони складаються з вольфрамового електрода, труб для водяного охолодження, подача газу та сопло плазми. Температури у плазмовій дузі сягають $30\,000^{\circ}\text{C}$, що значно вище звичайної електричної дуги ($5000\text{--}7000^{\circ}\text{C}$). Газ який підводять до плазмової дуги утворює плазму. Він нагрівається дугою та іонізується. Основними джерелами енергії для зварювання є кінетична енергія іонізованих частинок газу та теплова енергія.

Залежно від величини струму в плазмі розрізняють такі види плазмового зварювання: мікроплазмове ($0,1\text{--}50\text{ A}$); на середніх струмах ($50\text{--}150\text{ A}$); на великих струмах (струм понад 150 A).

Мікроплазмове зварювання дозволяє уникнути пропалів у металі. Зварювання великих струмах відбувається з повним проплавленням металу. Можливе зварювання товщини до $10\text{--}15\text{ мм}$ за один прохід, без обробки кромek, що дозволяє економити виробничий час, що витрачається на підготовку кромek і час, що витрачається на кілька проходів. Матеріалами для зварювання є нержавіючі сталі, вольфрам, молібден, сплави нікелю в авіаційній промисловості, приладобудуванні.

При зварюванні плазмою газ виконує не тільки роль потрібного матеріала для виконання робіт але і захищає від окиснення, охолоджує і захищає сопло та вольфрамовий електрод. Під час зварювального процесу забезпечує хорошу і ефективну теплопередачу до заготовки, яка на даний момент є робочою деталлю. Також, газова середa забезпечує нормальними умовами для виконання всього процесу, тобто- стабільна плазмова струя, нормальна стабільна температура і швидкість подачі.

У цьому процесі часто гази розподіляють на дві категорії - плазмоутворювальні та захисні\транспортні. Якщо пристрій для зварювання з роздільною подачею, плазмоутворювальний газ подають в зону дії катода, а захисні гази, подають в зону де діє стовп чи факел плазми. У кожного газу є свій рівень впливу, переваги і недоліки, проте широкої популярності набрав спосіб змішування

газів.

У зварюванні цю методику можна помітити, наприклад, при MIG/MAG зварюванні. Щоб захистити катодну ділянку і сопло від руйнування і перегрів використовують саме аргон-інертний газ, не взаємодіє з катодом і має не велику теплопровідність. Як і в будь-якому способі зварюванні так і в газах є свої недоліки, так для аргону - це неможливість перетворювати достатню кількість електричної енергії у теплову.

Так, напруженість поля стовпа, із застосуванням аргону, набагато менша, ніж ця ж напруженість, наприклад, у водні або азоті. Тому при однаковому струмі аргонна дуга має довжину на 1 мм менше, ніж при використанні інших газів. Також, ентальпія аргону при певній температурі набагато менше, ніж знову-таки в інших газів. Однак слід відзначити одну істотну перевагу аргону, наприклад, перед азотом. Якщо ми розглянемо приклад з вольфрамовим електродом і його поведінку в двох умовах, аргонне середовище і азотне то, у першому його стан буде набагато стабільніше і стійкіше, а у другому збільшується швидкість руйнування і швидше зношується. Крім аргону, часто використовується і гелій або водень. Ці гази мають високий рівень теплопровідності, і у разі їх застосування, нагрівання відбувається набагато швидше. Однак, нагрівання і руйнування сопла при цьому також відбувається швидше, тому для зниження ступеня теплопровідності, використовують суміш гелію і аргону, або суміш водню і аргону.

Для зварювання хімічно активних і тугоплавких металів (Ti, Zr, Nb, Ta, Mo, W) розроблено спосіб плазмового зварювання у вакуумі ($133 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-4}$) Па, який забезпечує добру якість з'єднань металу завтовшки від 0,1 до 1 мм.[5]

При плазмовому зварюванні внаслідок високої концентрації енергії і силового впливу стислої дуги на зварювальну ванну зростає роль потоків рідкого металу зварювальної ванни у формуванні шва, високі швидкості зварювання й охолодження металу шва викликають утворення дефектів у вигляді підрізів. Щоб уникнути цих дефектів зварного з'єднання, доводиться знижувати швидкість зварювання, а також витрата плазмоутворюючого газу, що сприяє утворенню подвійної дуги і нестабільності формування шва і проплавлення металу.

2.3. Електронно-променеве зварювання

В земних умовах зварювання проходить в вакуумній камері електронним променем. Плавлення металу при зварюванні та утворення зони проплавлення обумовлено тиском потоку електронів в електронно-променевій гарматі, виділенням теплоти в обсязі твердого металу, реактивним тиском металу, що випаровується, вторинних і теплових електронів і випромінюванням.

Електронний промінь використовується для зварювання великих товщин 200-500мм. Основними параметрами режиму є сила струму, напруга променю, швидкість зварювання. Використовується для зварювання тугоплавких, високоактивних металів у космічній, авіаційній промисловості, приладобудуванні. При електронно-променевому зварюванні джерелом енергії є кінетична енергія електронів в електронному пучку, сформованою електронною гарматою. Зварювання проводиться безперервним чи імпульсним електронним променем. Імпульсні промені з великою щільністю енергії і частотою імпульсів 100-500 Гц використовуються при зварюванні металів, що легко випаровуються, таких як алюміній, магній. У цьому підвищується глибина проплавлення металу. Використання імпульсного проміння дозволяє зварювати тонкі металеві листи. У камері, що формує електронний промінь, відкачується повітря до тисків 1—10 Па. Це призводить до високого захисту металу розплавленого від газів повітря.

Оскільки зварювання відбувається у вакуумній камері розміри робочих поверхонь та робочих деталей є обмежені в залежності від розмірів камери. Також умови вакууму є найсприятливішими умовами для зменшення газонасиченості металу шва. Обов'язковою умовою для проведення зварювання у вакуумній камері є вакуум не нижче 10⁻⁴ мм рт. ст., тому що в противному випадку велика частина енергії електронів буде витрачатися на нагрів і іонізацію газів навколишньої атмосфери. Відома також технологія зварювання електронним променем у атмосфері нормального тиску, коли електронний промінь залишає область вакууму безпосередньо перед зварювальними деталями. Цей спосіб зварювання є

універсальним для зварювання у вакуумі або в захисних газах і на повітрі. Однак важливим фактом є те, що при зварюванні променем у відкритих умовах метал у фазі розплавлення контактує з навколишньою атмосферою, що може призвести до розвитку небажаних металургійних взаємодій, зниження властивостей металу шва і утворення в ньому дефектів, а саме: непропалення і порожнини в корені шва на металах з великою теплопровідністю і швах з великим співвідношенням ширини до глибини.[6]

3 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ

3.1. Обладнання для зварювання плавким електродом

Зварювання плавким електродом займає дуже широку нішу використання, включає в себе широку класифікацію.

Основними показниками при виборі потрібного обладнання є такі фактори:

1. Рівень механізації - РДЗ (ручне дугове зварювання), механізоване, автоматичне;
2. Рід струму-постійний струм прямої полярності, постійний струм зворотної полярності, змінний струм;
3. Рід дуги-прямої дії, непрямої дії;
4. Процес горіння дуги - відкрита, закрита, напіввідкрита;

Рід захисту зони зварювання від навколишнього повітря - без захисту, зі шлаковим захистом, зі шлаковогазовим захистом, з газовим захистом, з комбінованим захистом.

Під час зварювання методом ручного дугового зварювання проходить контакт між деталлю і електродом це запалює дугу. Цей процес називається КЗ-коротке замикання, воно проходить між двома полюсами і дає змогу для струму проходити. Зварювання відбувається за допомогою дуги, що горить між деталлю та електродом і під час цього процесу генерується тепло, за допомогою якого і відбувається плавлення. В залежності від хімічного складу електрода, під час плавлення у зварну ванну подається захисний шлак і газова оболонка. Для цього типу зварювання потрібна низка напруга та висока сила струму. В залежності від обраного обладнання відбувається різні етапи перетворення наруги із мережі в меншу напругу потрібну для процесу зварювання. Також ці системи надають змогу врегулювати силу струму , а потім налаштувати джерело струму. У випадку РДЗ сила струму є основним параметром, від якого на пряму залежить якість зварного з'єднання. Через це налаштування роблять таким, щоб сила струму була

максимально не змінна навіть при зміні довжини дуги. Щоб забезпечити такий ефект, джерело живлення завжди мають спадні характеристики. На рис.3.1. зображений типовий зварювальний апарат для зварювання покритим електродом.

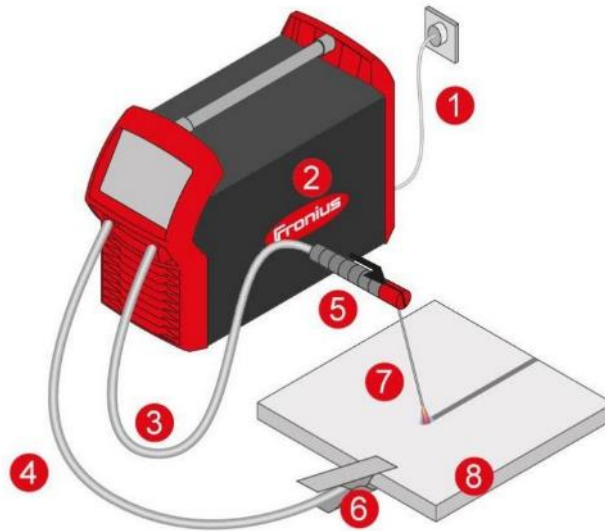


Рисунок 3.1 - Структура системи зварювання електродом; 1-підключення до електромережі, 2-джерело живлення, 3-зварювальний кабель (електрод), 4-кабель заземлення (деталь), 5-електродотримач, 6-клемма заземлення, 7- стержневий електрод, 8- деталь.

Переваги ММА:

- легкість у освоєнні;
- простота у використанні;
- універсальність у використанні(положення,навколишнє середовище) ;
- низька ціна;
- низький рівень шуму(порівняння з біль механізованими видами зварювання) ;
- автоматичне формування захисного шлаку;
- стійкість до забруднення;
- універсальність у підборі матеріалу для зварювання;
- при хорошому володінні техніки зварювання висока якість зварних швів.

Недоліки ММА:

- великий викид шкідливих парів у навколишнє середовище;

- низька швидкість зварювання;
- відхилення дуги;
- індивідуальність підбору електродів під товщину матеріалу та положення при зварюванні;
- довге і індивідуальне налаштування;
- монтаж електродів, усунення залишкового матеріалу, шлаку та бризок;
- відсутня можливість механізації процесу.

При ручному дуговому зварюванні комплектація “базис” для зварювання є індивідуальною і підбирається під потреби зварника. Якщо розглядати електродотримачі вони є двох видів, відрізняються зовнішнім виглядом: гвинтового типу та з затисками.

- гвинтового типу, складається із ручного тримача, для уникнення прослизання у руці і верхня поворотна частина, має отвір, яка відповідає за утримання електрода.

- з затиском, зручний тримач для руки та затискач в який вставляється електрод.

Що до джерел живлення, вони залежать від технологічного призначення. Класифікують їх в залежності від роду струму і принципу дії. При потребі забезпечити змінний струм використовують трансформатори і гібридні установки на їх основі, а для підтримання постійного струму - зварювальні випрямлячі, перетворювачі і агрегати і також гібридні джерела на базі випрямлячів.

Головна ціль трансформаторів перетворювати змінну напругу із мережі в постійну, необхідну при зварюванні. Це найбільш дешеві джерела через свою простоту, їх використовують при РДЗ покритим електродом або автоматичному зварюванні під флюсом. Також установки на основі трансформаторів застосовують при зварюванні алюмінію і алюмінієвих сплавів неплавким електродом в захисних газах.

Постійний струм забезпечує більш стійку характеристику дуги у порівнянні з дугою змінного струму, а це є впливовим фактором на якість зварювання.

Найбільш досконалими вважаються зварювальні випрямлячі, в них більший

ККД-коефіцієнт корисної дії, кращі технологічні властивості, менша маса, більш зручні як у виготовленні так і у використанні. Їх можна використовувати як універсальні джерела або для ручного, напівавтоматичного, автоматичного зварювання.

Зварювальний перетворювач складається з комбінації електродвигуна зі змінним струмом та зварювального генератора з постійним струмом. Електрична енергія мережі змінного струму перетворюється в механічну енергію електродвигуна, обертає вал генератора і перетворюється в електричну енергію, постійного зварювального струму. Тому ККД перетворювача невеликий, частини що обертаються вони не такі надійні і зручні в експлуатації, якщо порівнювати з випрямлячами.

Складова зварювального агрегату: двигун внутрішнього згоряння, генератор постійного струму. Із хімічної енергії, що виділяється при роботі двигуна відбувається перетворення в механічну енергію, а потім в електричну енергію. Агрегати використовують в РДЗ при монтажній і польових умовах, де відсутня постійна електрична мережа.

3.2. Обладнання для електронно-променевого зварювання

Електронно-променеві установки складаються з вакуумної камери з люками завантаження і вивантаження виробів, влаштованими вікнами для огляду процесу та механізми переміщення виробів, система контролю та створення вакууму, електронними гарматами(одна або більше) і їх системи електроживлення, апаратури для вимірювання і контролю. Поділяються на спеціалізовані та універсальні.

Прискорення електронів залежить від напруги, яка розділяє гармати на :

- низьковольтні (20...30 кВ),
- високовольтні (100...200 кВ) ,
- проміжною напругою (30...100 кВ).

Також залежно від призначення можна забезпечити різну локалізацію нагрівання. Стаціонарні або з можливістю переміщення у вакуумній камері.

Розміри вакуумних камер залежать від розмірів робочих деталей.

Для отримання фокусування електронного променя мінімальних розмірів при великій потужності необхідно, щоб розштовхування електронів у промені, їх розсіювання в газах і парах, теплові швидкості, а також погіршеності електронної оптики не перешкоджали збиранню електронів. Перші гармати формували пучок тільки при використанні прикладного електрода без додаткових фокусуючих систем (Рис.3.2а). Анодом в такій гарматі виступала сама деталь. Електростатичне фокусування не дозволяє одержати високу густину енергії в промені. Ця система має незначний недолік, а саме - між гарматою і деталлю мала відстань.

На початку шістдесятих років минулого століття були виготовлені гармати з прискорювальним електродом під потенціалом деталі (рис. 3.2, б). При використанні такого електрода з'являється можливість збільшити відстань катода гармати від заготовки, уникнути електричних поломок і полегшити контроль за процесом зварювання. Показано ще більш інноваційну та актуальну гармату з електростатичним та електромагнітним фокусуванням, що забезпечується за допомогою системи електромагнітного фокусування (рис. 3.2, в). Збільшенню напруги електронно-променевої гармати та енергії електронів запобігає недостатня стабільність електричної ізоляції вакууму. розрив. Щоб уникнути можливих електричних пробоя між анодом і катодом при напругах вище 50 кВ, при отриманні високоенергетичного електронного пучка застосовуються електронно-оптичні системи за принципом прискорення електронів в прискорювальній трубці з однорідним електричним полем вздовж осі. використовуються. Низько енергетичний електронний промінь, що виходить з катода, утворюється і поступово прискорюється в трубці, досягаючи максимальної енергії на виході. Схема електронно-оптичної градієнтної гармати показана на рис. 3.2, г.

Електронний промінь фокусується однією або двома магнітними лінзами. Для інструментів з лінзою для зменшення діаметра променя на деталі необхідно зменшити відношення $M = b / a$ (рис. 3.2, б), тобто розташувати лінзу далеко від анода і близько до частини . Якщо лінз дві, то вони розташовуються в такому порядку, перша з них розміщується біля анода і заготовки, це зменшує діаметр

електронного променя в основній лінзі. Лінзи виконані у вигляді котушок з великою кількістю витків у залізній сітці спеціальної форми.

Магнітні системи використовуються для переміщення та вирівнювання електронного променя уздовж з'єднання. Системи з кутовим відхиленням променя підходять для зварювання металів товщиною 3 ... 5 мм. При зварюванні великої товщини така система може спотворити шов відносно вертикальної площини контакту. Тому для такої товщини доцільно використовувати дві пари систем, розташованих на різній висоті, що допускає паралельну передачу променя. Система відхилення зазвичай складається з чотирьох котушок, з'єднаних попарно послідовно і розташованих під кутом 180° один до одного. Це плоскі котушки діаметром d умовного циліндра. Змінюючи струм в котушках, можна встановити промінь в будь-якій точці і забезпечити його рух по складних траєкторіях. [7]

У промисловості використовується автоматична система направлення балки вздовж стику. Для цього в інституті електрозварювання ім. Е. О. Патон заклали і почав використовувати ефект вторинної електронної емісії при проходженні зондуєчого електронного пучка через крайовий з'єднання.

Основну роль у формуванні електронного променя відіграє прикатодна електронно-оптична система - прожектор гармати. Частіше, ніж в інших випадках, у фарах зварювальних апаратів використовуються триелектродні системи. Вони складаються з катода, керованого електрода з отвором і прискорювального анода. Керованого електрода також відомий як фокусований або катодний електрод і рідше як модулятор. Катодний вузол гармати встановлений на високовольтному ізоляторі. Харчування прожектора гармати здійснюється від броньованого високовольтного кабелю. Інтенсивність струму променя регулюють шляхом подачі негативного керованого потенціалу на катодний електрод фари, зміною прискорювальної напруги або, рідше, зміною інтенсивності струму розжарювання катода. У режимі зварювання з імпульсною модуляцією на катодний електрод подають негативні квадратичні імпульси модельованої напруги.

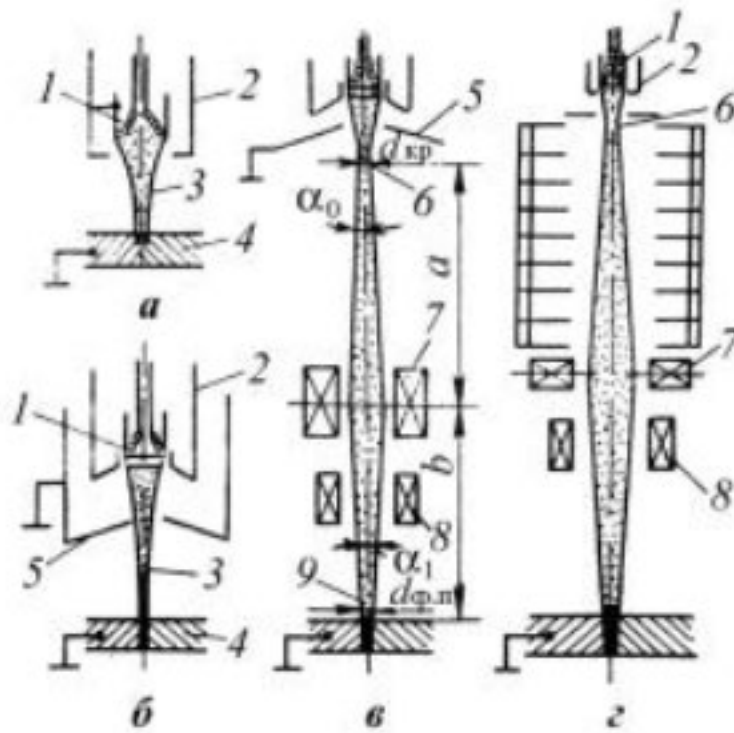


Рисунок 3.2 – Електронно-оптичні системи зварювальних гармат: а – однокаскадна без електрода, який прискорює електрони; б – однокаскадна з анодом для прискорення електронів; в – комбінована з електростатичним і електромагнітним фокусуванням; г – з прискорювальною трубкою; 1 – катод; 2 – прикатодний електрод; 3 – траєкторія електронів; 4 – деталь; 5 – анод для прискорення електронів; 6 – кросовер (мінімальний переріз променя); 7 – фокусуюча магнітна лінза; 8 – електромагнітна система, що відхиляє промінь; 9 – фокусна пляма; α_0 – половинний кут розходження променя після кросовера; α_1 – половинний кут сходження променя на деталі; $d_{кр}$ – діаметр кросовера $d_{ф.п}$ – діаметр плями у фокус

Катоди електронних пістолетів працюють у важких умовах через високотемпературний нагрів, іонне бомбардування, окислення та забруднення від зварюваних парів металу. При виготовленні катодів використовуються вольфрам, тантал та інші тугоплавкі метали з низькою функцією виходу електронів. Використовуються катоди з бориду лантану (LaB6), які мають високу випромінювальну здатність при відносно низькій робочій температурі (1600 °C). Оскільки поверхня катода металізована легкоплавкими сплавами, для збільшення

емісії його робочу температуру необхідно підвищити до 1900–2000 °С. Конструктивно катоди виготовляють з прямим або непрямим нагріванням. Катоди непрямого нагріву мають більш рівномірну щільність випромінювання по всій поверхні і екіпотенціальні. Катоди з бориду лантану виготовляють з непрямим нагріванням. Катоди можуть бути у вигляді плоскої спіралі, штифта, площини тощо. При використанні гармати з плоским катодом досягаються високі потужності в пучку.

Одним із способів випромінювання променя в газове середовище є створення електронних гармат зі ступінчастою накачкою. У зброї є кілька камер, з яких здійснюється автономне відкачування газів. У міжелектродному проміжку створюється вакуум до 10–2 Па, але із силою струменя тиск зростає. Є й інші способи доставки електронного променя в атмосферу, напр. В. закриття вихідного отвору надзвуковим струменем газу або використання вікна з танталової фольги, яке пропускає електрони, але не пропускає газ.

У промисловості функціонує велика кількість універсальних і спеціальних систем, зовнішній вигляд яких між собою дуже подібний, один з представників зображений на Рис.3.4. В установках типу ЕЛУ (ЕЛУ-1, ЕЛУ-13 та ін.) електронні гармати ЕП-60, ЕП-60М, ЕП-60/2,5, ЕП-60/1 ОМ з напругою прискорення 60 кВ і потужністю в використовується промінь 2,0...10,0 кВт. Ці установки конструкційно подібні, але відрізняються габаритами вакуумних камер, конструкцією зварювальних маніпуляторів і допоміжних механізмів, а також параметрами електронно-оптичних систем. Якщо універсальна система ЕЛУ-2 має вакуумну камеру діаметром 500 мм і довжиною 400 мм, то система ЕЛУ-13 має камеру з розмірами 10000 × 3400 × 5400 мм.

Загальний вигляд універсальної установки У-570 наведено на рис. 3.3.

Вакуумна камера системи складається з нержавіючої сталі товщиною 25 мм. Його розміри 1200 х 1200 х 1200 мм. У верхній частині патронника виконано вікно діаметром 1020 мм, закрите поворотною пластиною 1, на напрямних якої встановлений механізм переміщення рушниці. Універсальний зварювальний маніпулятор являє собою каретку з приводом і опорним рівнем для зварювання

виробів з горизонтальною віссю обертання і торцевою пластиною для зварювання плоских виробів з вертикальною віссю обертання.

Установка У-570 має електронний пістолет УЛ-141 з блоком живлення (блок живлення) У-843 ЕЛА-60/60. Блоки живлення оснащені регуляторами для автоматичного контролю основних параметрів ЕПЗ. Блок живлення ЕЛА-60/60 має номінальну потужність променя 60 кВт, напругу прискорення 60 кВ, нестабільність напруги прискорення 1%, струм променя 1000 мА, нестабільність струму +1%, фокус струм 0 кВт [5].

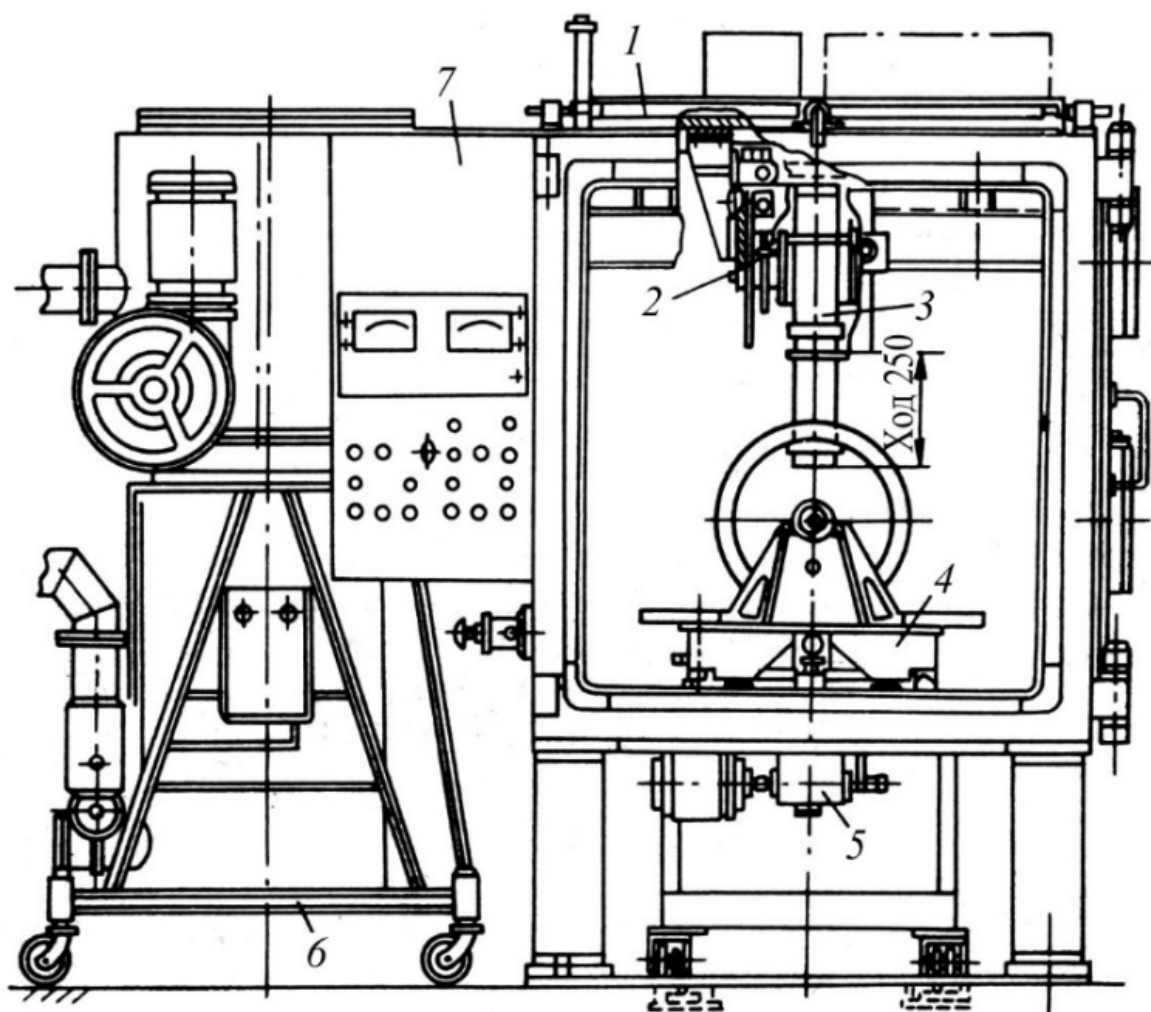


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд універсальної електронно-променевої установки У-570: 1 – поворотна плита; 2 – механізм переміщення гармати; 3 – електронна гармата; 4 – універсальний зварювальний маніпулятор; 5 – привід маніпулятора; 6 – вакуумна система; 7 – пульт керування



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд електронно-променевої установки для зварювання з пультом керування

3.3. Обладнання для плазмового зварювання

Обладнання для плазмового зварювання поділяється на професійне та непрофесійне.

До непрофесійних належать вітчизняні апарати «ПЛАЗАР» (універсальний, мобільний плазмовий апарат), Мультіплаз, Горинич. Призначені для зварювання невеликих об'ємів металу та товщин, застосовуються для ручного зварювання. Як правило, плазмовий струмінь виходить при використанні спиртових розчинів або води.

До професійних, призначених для постійного застосування на виробництві, що працюють у середовищі захисних газів (аргон), для зварювання великих обсягів металу, для автоматичного зварювання – SBI (Австрія), Migatronіc (Данія), EWM (Німеччина) та інші.

Для укомплектування устаткування для плазмового зварювання потрібні: плазмотрон, пристрій для охолодження і переміщення, джерела струму, балони\компресора, що утворюють захисне середовище. Схематична відмінність плазмотроні зображена на рис.3.5.

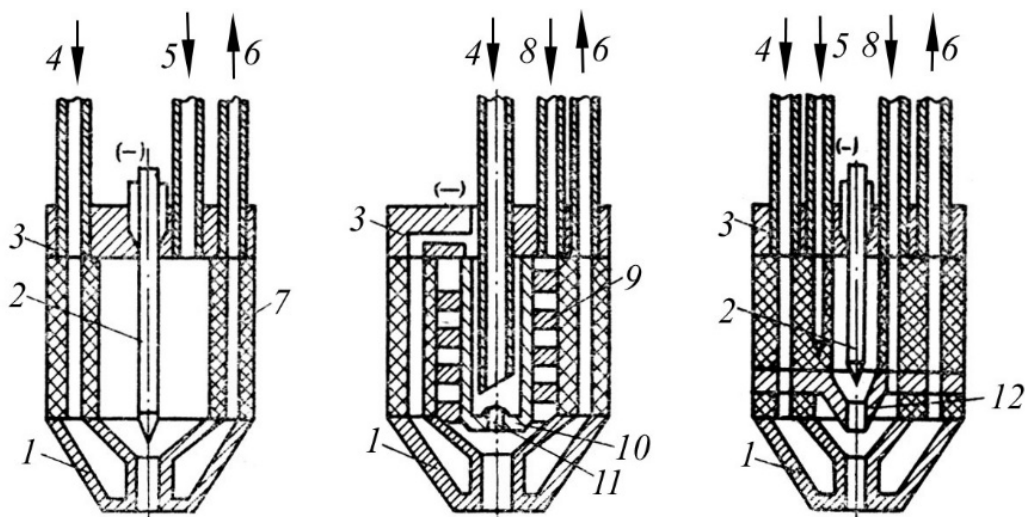


Рисунок 3.5 – Схеми плазмотронів: а – нейтрально-газового з осьовою стабілізацією дуги; б – машинного з вихровою стабілізацією дуги; в – двопотокового; 1,3– сопловий та катодний вузли відповідно; 2–вольфрамовий катод; 4,6–вхід і вихід охолодної води відповідно; 5–захисний газ; 7–корпус плазмотрона; 8–стиснене повітря; 9–завихрювач; 10–катодоутримувач; 11–гільзовий катод; 12–внутрішнє сопло захисного газу;

Конструкція плазмотрона не є сталою, її видозмінення залежить від робочого середовища, способи подачі газу в камеру (при зварювання у відкритому космосі враховується вплив зовнішнього середовища на стабільну подачу газу, якщо це є можливим), запалювання дуги та системи, що охолоджує. Найбільш простою конструкцією вважають плазмотрони, які працюють на нейтральних газових середовищах, такі як на першому кресленні (рис. 3.5). Для підвищення емісійних характеристик і стабільності в робочому середовищі в камері дуги, яка складається з ізованих катодних і анодних блоків, встановлений вольфрамовий катод, стабілізований оксидами торію, ітрію та лантану. Газ подається коаксіально до катодів. Для того щоб закріпити катодну пляму дуги на електроді, вольфрамовий стрижень заточують. Другий варіант (рис. 3.5, другий рисунок) — верстатний плазмотрон для різання металу середньої товщини з гільзовими катодами та стабілізацією дуги. Гільзові катода складаються з катодоутримуючої втулки, в яку запресований катод. Гільза виготовлена з міді та інтенсивно охолоджується для збільшення терміну служби катодної вставки. Катодні вставки виготовляються з

вольфраму, цирконію або гафнію. Консервовані катоди мають плоский кінець, тому дуга стабілізується закрученим газовим потоком, який фіксує катодну частину дуги в центрі катодного кінця вставки. При повітряно-плазмовому різанні використовуються гільзові катоди. Тут цирконієві та гафнієві катодні вставки утворюють легкоплавкі та термостійкі оксиди. Такі катоди називають плівковими. Під час їх роботи утворюється розплавлена плівка, яка містить оксиди і нітриди матеріалу катода. Для тангенціального газоутворення встановлені завихрювальні диски з термостійкої кераміки.

На рис. 3.5 на третьому кресленні зображений двопотоковий плазмотрон, робочим газом якого є кисень або повітря. Вольфрамовий катод захищений аргонном. Якщо вольфрамовий електрод знаходиться в порожнині внутрішнього сопла, аргон все більше перетворюється в плазму і робочий газ використовується для стабілізації дуги. Якщо вольфрамовий електрод розташований між внутрішнім і зовнішнім соплом, то в плазмі можна отримати значну кількість робочого газу.

Плазменно-дугове зварювання використовується при виготовленні деталей з нержавіючої сталі, титану, нікелевих сплавів, молібдену, вольфраму та ін. в аерокосмічній, електронній, суднобудівній, нафтохімічній та інших галузях промисловості. Зазвичай використовується пряме дугове зварювання. Завдяки циліндричній формі стовпа дуги, процес зварювання характеризується стабільним проплавленням металу. Спеціальні насадки дозволяють регулювати форму місця нагріву. Зварювання можна виконувати в будь-якому просторовому положенні. Заміна аргоннодугового зварювання труб з нержавіючої сталі на плазмо-дугове зварювання з товщиною стінки 2,3 ... 7,0 мм дозволяє збільшити швидкість зварювання на 50 ... 200%. Мікроплазмове зварювання використовується в радіоелектроніці та приладобудуванні для з'єднання фольги, дроту і тонкостінних деталей товщиною 0,025 ... 1,0 мм при силі струму 0,1 ... 10 А. Плазмове зварювання плавним електродом дозволяє з'єднати зварювання плавким електродом в інертному газі. Для живлення дуги між витратним електродом і виробом використовується окреме джерело з жорстким зовнішнім властивістю.

Плазмове струменеве зварювання використовується рідко через низьку

продуктивність. [6] Приклад зовнішнього вигляду установки для плазмового зварювання зображені на рис.3.6.



Рисунок 3.6 – Фото реального процесу плазмового зварювання труби на стаціонарній установці Fronius

3.4. Аналіз адаптації зварювальних установок під умови відмінні від земних

Зварювання в космосі має багато труднощів, таких як: швидкість дифузії газів і відсутність сили тяжіння.

У такому середовищі перепади температур сполучуваних матеріалів можуть досягати кількох сотень градусів, швидкість дифузії газів надзвичайно висока, а головне — повна відсутність сили тяжіння. Варто було врахувати й інші нюанси: майбутні зварювальні апарати довелося адаптувати для використання в тісному скафандрі, в якому дрібна моторика космонавта була практично зведена до нуля. Велику увагу слід приділяти і техніці безпеки на роботі, адже пошкодження захисного панцира космонавта поставило під загрозу його життя та місію. Аналізуючи труднощі при проведенні експериментальної роботи, було зроблено ряд висновків: експерименти показали, що електронно-променеве зварювання має найбільшу ефективність у невагомих умовах. Це вимагало від інженерів розробити ефективні інвертори - пристрої, які перетворюють постійний струм із сонячних панелей і батарей в змінний. З огляду на майбутнє, ці розробки потім успішно

використовувалися для підвищення ефективності сонячних панелей і для розробки альтернативних джерел енергії. Основним недоліком використання такої схеми було значне падіння напруги, тому до цілі додали трансформатори. Також була проведена велика робота по зменшенню габаритів і ваги установки – кожен додатковий кілограм значно підвищував пускову вартість. Тому згодом замість магнітного (як у традиційних зварювальних апаратах) почали використовувати електростатичне фокусування.

Сучасні види зварювання в космосі мало чим відрізняються від земних. Для цих цілей використовується багато адаптованих методів, наприклад, електронний промінь зі стиснутою дугою низького тиску з використанням витратного електрода. Спеціально для точкового зварювання навіть не потрібно було розробляти нові моделі обладнання: процес зводився лише до мінімізації ваги та підвищення ефективності. Для цього була використана жорстка трубчаста конструкція у вигляді рюкзака, що дозволяло космонавту бути максимально мобільним. Єдина складність полягає в відпуску зварюваних деталей: в умовах вакууму утворення оксидного шару (відпуск) просто неможливо. Для моніторингу використовуються інфрачервоні датчики температури.[22]

4 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПРОЦЕСІВ, ЯКІ ПРОТІКАЮТЬ ПРИ ЗВАРЮВАННІ В УМОВАХ ВІДМІННИХ ВІД ЗЕМНИХ

Для порівняльного аналізу процесів, що протікають під час зварювання потрібно аналізувати детально всі процеси в земних умов і в умовах, які відмінні від земних.

4.1 Нагрівання та охолодження

В дільниці основного металу, прилегла до зварювального шва, температура наближується до температури ліквідусу. При віддалені від шва температура інтенсивно зменшується, наближується до середньої температури зварного виробу. Таким чином, у навколошовній зоні метал піддається своєрідній термообробці. Звідси ця зона називається зоною термічного впливу. Структура металу в зоні термічного впливу змінюється відповідно до термічного циклу нагрівання та охолодження, залежить від хімічного складу металу, попередньої термічної та механічної обробки. Далі розглянемо які структурні перетворення проходять в ЗТВ при зварювання маловуглецевих сталях. У межах шва метал був нагрітий до розплавлення, і тому після затвердіння має переважно дендритну (литу) структуру.

Безпосередньо до зварного шва прилягає ділянка неповного розплавлення.

На ділянці I (рис.4.1.) (ділянка перегріву) метал був нагрітий від 1370 до 1770 ° К (від 1100 до 1500 ° С), і тому має крупнозернисту структуру з голчастими включеннями фериту. Це ділянка перегріву, а структура металу у ньому називається видманшtedтовою.

Ділянка II (рис.4.1.) (ділянка нормалізації) характерна тим, що метал був нагрітий до інтервалу від критичної точки $A_{с3}$ до 1370 К (1100 ° С). У зв'язку з тим, що охолодження відбувалося на повітрі, метал у цій ділянці зазнав нормалізації і, отже, відрізняється дрібнозернистою структурою.

У ділянці III (рис.4.1.) (ділянка неповної перекристалізації) метал нагрівається до інтервалу температур від критичної точки $A_{с1}$, до $A_{с3}$. Нагрів до таких температур призводить до неповної перекристалізації, а тому в межах цієї

ділянки є дрібні зерна невеликі зерна фериту, тобто структура характерна геометричної неоднорідністю.

У межах ділянки IV (рис.4.1.) (ділянка рекристалізації) метал нагрівається до температур від 770 °К (550 °С) до критичної точки A_{c1} , що призводить до рекристалізації. В результаті цього витягнуті зерна основного металу, якщо це був сталевий прокат, набувають глобулярної форми, а розміри зерен збільшуються.

Ділянка V (рис.4.1.) (ділянка синеломкості) – видимих змін у структурі металу зварного шва не відбувається. Відрізняється кольорами втечі.

З розглянутих ділянок особлива увага має приділятися ділянці з видманшtedтовою структурою. Він внаслідок перегріву має велике зерно і має знижену міцність. Зварювання слід виконувати так, щоб ділянка перегріву була мінімальною. Найбільш високі механічні властивості на ділянці нормалізації, у межах якого метал має однорідну дрібнозернисту структуру.

Якщо виконується зварювання середньовуглецевих та деяких низьколегованих сталей (45, 40Х, 30ХГСА та ін.), у навколошовній зоні можливе утворення загартованих структур. Це називається підкалкою і призводить до підвищення твердості, виникнення внутрішньої напруги, а іноді до утворення тріщин. У таких випадках зварювання доцільно виконувати з термічним циклом, характерним повільним нагріванням та охолодженням металу.

При зварюванні аустенітних хромонікелевих сталей у навколошовній зоні з твердого розчину можуть випадати комплексні карбіди хрому та заліза. Це небажане явище, оскільки призводить до збіднення аустеніту (твердого розчину) хромом і тим самим підвищує схильність до міжкристалітної корозії; тому зварювання таких сталей виконується на режимах, у яких забезпечується мінімальна тривалість перебування металу околешовній зоні інтервалі високих температур.

Нагрів електрода визначається двома складовими: нагрівання струмом, що проходить, і нагрівання зварювальною дугою.

Вплив нагрівання електрода теплом зварювальної дуги має вирішальне значення з точки зору забезпечення плавлення електрода, але з точки зору

нагрівання частини, що не розплавилася, проявляється на відстані до 15 мм від торця електрода (що дуже важливо з точки зору транспорту компонентів електродного покриття в зварювальну дугу).

Чим довше по стрижню протікає зварювальний струм і чим більше його значення, тим більше нагрівається стрижень електрода. На початку зварювання металевий стрижень знаходиться при температурі навколишнього середовища, а в кінці плавлення електрода температура підвищується до 500 - 600 °С (при додаванні в покриття органічних речовин вона не перевищує 250 °С). Це призводить до того, що швидкість плавлення електродів (кількість розплавленого електродного металу) різна на початку і в кінці. Глибина проплавлення основного металу також змінюється внаслідок зміни умов передачі тепла від дуги до основного металу через шар рідкого металу в зварювальній ванні. Внаслідок цього змінюється співвідношення частинок електрода і основних металів, які беруть участь у формуванні металу шва, а отже змінюється склад і властивості металу шва, виробленого електродом. Це один з недоліків ручного дугового зварювання металу покритими електродами.[8]

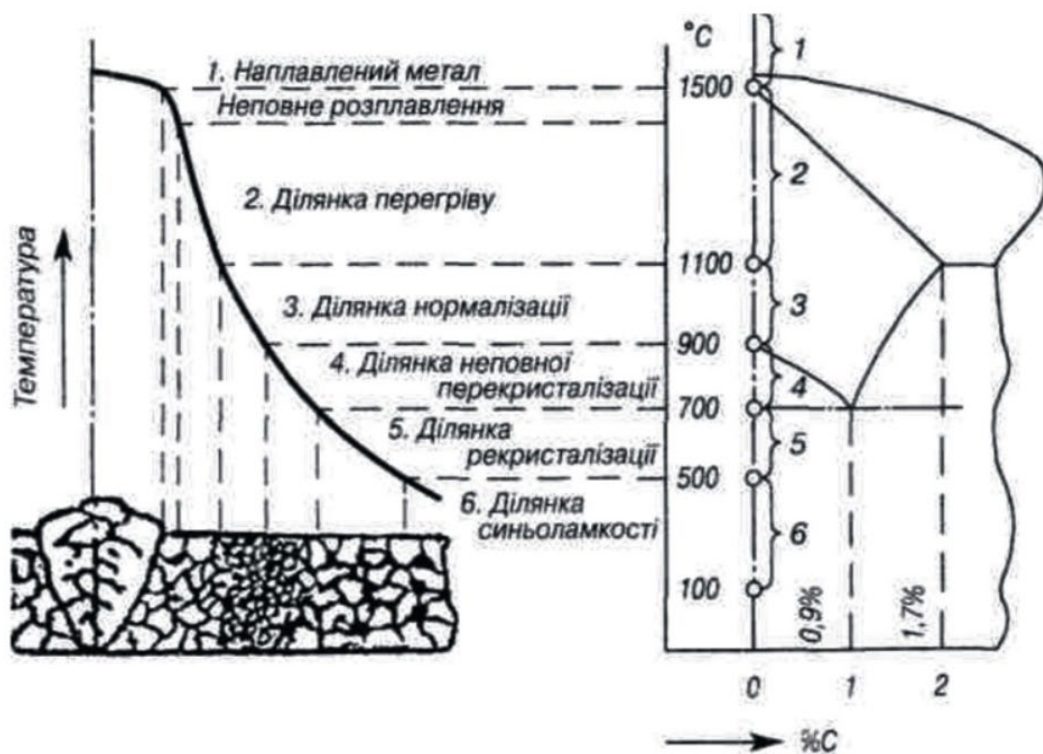


Рисунок 4.1 – Ділянки зони термічного впливу

4.2. Пластична деформація

При підвищенні температури у металах активізуються процеси руху (коливання) атомів, що сприяє протіканню пластичної деформації. Це призводить до зміни механічних властивостей металів (рис.4.2.1).

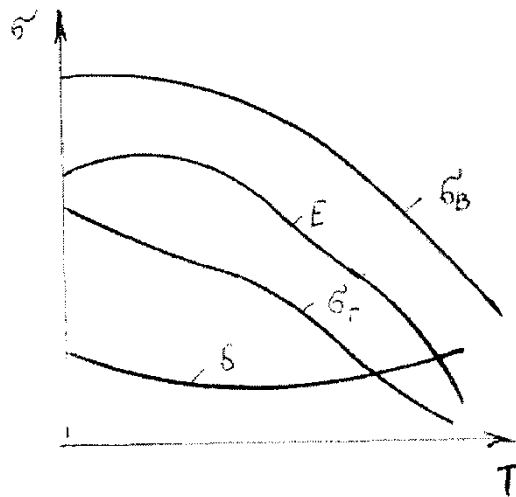


Рисунок 4.2.1 – Графік зміни характеристик міцності

З підвищенням температури знижуються характеристики міцності (σ_t , σ_v) і зростає пластичність (δ).

Залежно та умовами протікання пластичної деформації при високих температурах розрізняють два процеси: процес повзучості і процес релаксації.

Процес повзучості. Повзучість можна уявити, розглядаючи деформацію стрижня при постійному навантаженні та температурі (рис. 4.2.2).

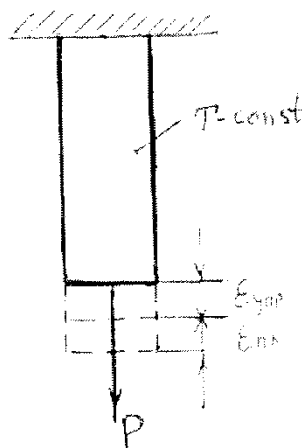


Рисунок 4.2.2 – Стрижень при постійній навантаженні

Стрижень навантажений силою P та нагрітий до температури T . Причому значення P і T – постійне.

У перший момент навантаження в стрижні матиме місце пружна деформація ($\epsilon_{\text{уп}}$), а потім безперервний процес пластичного деформування ($\epsilon_{\text{пл}}$). Таким чином, процес повзучості - це безперервна пластична деформація при постійному навантаженні та температурі. В результаті пластичної деформації утворюється шийка і настає руйнація. Найбільш важливою є ділянка 2, за якою визначають швидкість повзучості. Як видно з рис. 4.2.3. характер повзучості залежить від величини діючої напруги.

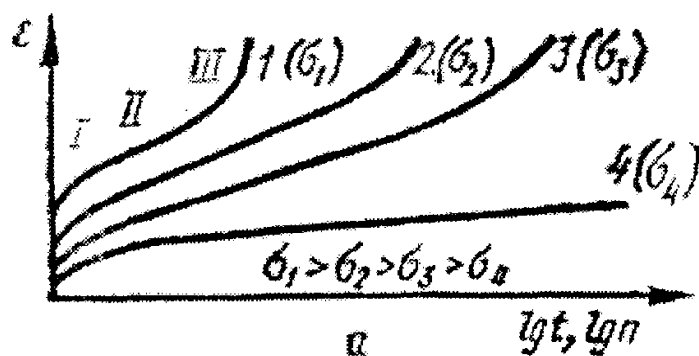


Рисунок 4.2.3 – Криві повзучості

Процес повзучості характеризується кривими повзучості, що будуються при статичному додатку навантаження в координатах ϵ - час навантаження t для різних напруг σ . На кривих повзучості можна виділити три ділянки. Ділянки I і III - повзучості, що не встановилася, ділянка 2 - повзучості, що встановилася.

Як характеристики здатності матеріалу чинити опір повзучості приймається межа повзучості. Це максимальна напруга, при якій швидкість повзучості або деформації за певний проміжок часу при даній температурі не перевищує певного значення: $\sigma_{0,2/1000}^T$

Процес релаксації. Якщо взяти стрижень і прикласти до нього навантаження, а потім закріпити і нагріти, то в ньому матимуть місце такі процеси (рис. 4.2.4.). При додатку навантаження P у стрижні виникнуть пружні деформації $\epsilon_{\text{уп}}$ та пропорційні їм напруги $\sigma: \sigma = \epsilon_{\text{уп}} E$

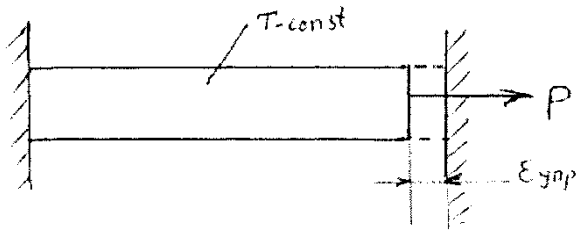


Рисунок 4.2.4 – Розподілення сил

Оскільки стрижень перебуває у закріпленнях, загальна деформація не змінюється. Під впливом температури у металі створюються умови протікання пластичної деформації. З огляду на те, що має місце закріплення, ця деформація буде розвиватися за рахунок пружної. Це означає, що знижується пружна деформація, а отже, і напруження. Таким чином, релаксація - це процес безперервної пластичної деформації, що призводить до зниження напружень за постійної загальної деформації та температури. Процес релаксації характеризується кривими релаксації (рис.4.2.5).

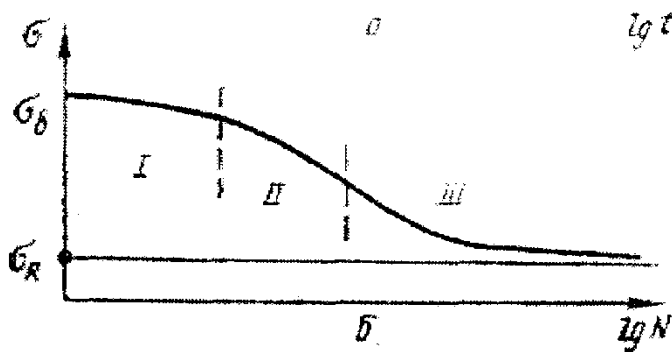


Рисунок 4.2.5 – Криві релаксації

Як правило, у реальній ситуації навантаження конструкцій одночасно має місце як повзучість, так і релаксація.

Руйнування в результаті повзучості та релаксації відноситься до поняття - тривала міцність. Межею тривалої міцності є напруга, у якому немає руйнування за заданий проміжок часу. Тоді умова тривалої міцності буде: $\sigma(t) \leq [\sigma_{дл. пр.}]$.

При проектуванні конструкцій, що працюють при знижених температурах, розрахунок міцності проводиться за залежностями як і для нормальних умов. Однак, слід брати до уваги зміну властивостей металу. При зниженні температури

зростає значення межі міцності, але знижується показник пластичності. Крім того, метал переходить у крихкий стан. Тому як критерій міцності виступає не значення межі плинності, а значення межі міцності. Однак при цьому повинні дотримуватися вимог якості металу, а саме, по ударній в'язкості і критичній температурі переходу в крихкий стан.

4.3. Видалення поверхневих плівок

В залежності від умов конденсації адсорбовані атоми, мігруючи по поверхні і взаємодіючи один з одним в результаті флуктуацій, об'єднуються в термодинамічно стійкі зародки нової фази, що обумовлюють подальший її розвиток. Виникнення на підкладці острівців конденсованої фази є початковою стадією росту плівок. В результаті надходження атомів на підкладку і міграції адатомів і кластерів відбувається зростання острівців і утворюється суцільна плівка. Контакткування острівців і їх зрощення (коалесценція) досягаються як внаслідок динамічного характеру їх поведінки - міграції, так і за рахунок розростання в площині підкладки без зміщення сформованої частини острівця[12]

Всі матеріали, окрім золота, при контакті з повітрям окиснюються. Поверхневі плівки, їх ще називають окисними плівками залежать від складу металу або його сплаву, а також від умов які їх окиснюють. Такі плівки можуть бути корисними, якщо, наприклад, вони виконують роль захисника від корозії, а можуть навпаки заважати, при зварюванні у твердій фазі їхня наявність є критичною, бо вони заважають утворенню з'єднання, а подітись їм нема куди. Поверхневі плівки можуть бути ще гідроокисними плівками, це більш про руйнівні характеристики плівки аніж про захисні (корозія).

Перед зварюванням металу обов'язково попередньо проводиться зачистка деталі, це може буди як хімічна чистка так і фізична та інші, основна мета такого процесу видалити зайві матеріали, для уникнення подальшого їх попадання і впливу в зварному шві.

Види фізичного очищення:

Ручне очищення: початкове очищення, дротовою щіткою, зубилом, молотків.

Абразивно – струменева: використовується для деталей не менше 3мм товщини, за для уникнення деформації деталі.

Абразивно – порошкова: видалення окалини з поверхні прокату.

Дробеметне очищення: під час підготовки поверхні для покриття лаком та фарбою.

Термокінетичне очищення: використовується для видалення полімерних, гумованих, металізованих покриттів, затверділих та не затверділих нафтопродуктів, масляних та бітумних забруднень.

Гідроабразивне очищення: для очищення поверхні зварних швів, окалини, корозії, покриттів та відкладень.

Магнітно-абразивне очищення: для очищення перед зварюванням деталей та виробів призначених для космічного апаратобудування та хімічного машинобудування. Магнітно-імпульсне очищення: для очищення виробів будь-якої конфігурації при налипанні та намерзанні сипких матеріалів.

Ударно-хвильове очищення: для очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів та котлів.

Електро гідро-імпульсне очищення: для очищення теплообмінних апаратів, систем опалення, котлів, каналізації та водопостачання.

Ультразвукове очищення: для очищення інструментів (свердла, різці, надфілі, напилки і т. д.), деталей точної механіки, годинникових механізмів, ювелірних виробів, електроніки, кремнієвих пластин і т. д.

Засоби хімічної очистки:

Мийка: основним матеріалом є вода з додаванням активних речовин

Електрохімічне травлення, електролітичне та електрокролітно-плазмове очищення: використовується для знежирення поверхонь, видалення оксидів та окалини.

Сольові ванни: очистка металу від окалини, графіта і піску.

Засоби термічної обробки:

Газополуменеве очищення металу; використовується для видалення окалини.

Електродугове очищення у вакуумі; для очищення та пасивації листового металу в потоковій лінії волочильних та прокатних станів.

Електроерозійне очищення; для очищення та одночасного зварювання тонкостінних виробів з алюмінію, міді та нікелю магнітно-імпульсним методом

Очищення в тліючому газовому розряді; для очищення перед вакуумним паянням та дифузійним зварюванням металу від оксидів.

Іонно-променеве очищення; для заключного очищення поверхонь металу, полімерів, діелектриків, напівпровідників перед нанесенням покриттів.

Очищення лазерним променем; для очищення прес-форм, рейок та матеріалів у нанотехнологіях.

Очищення струменем пари; від масел, жирів, водорозчинних забруднень гладких та нерівних поверхонь (зокрема зварних швів).

Очищення струменем сухого льоду; для очищення від олії, воску, бруду на поверхні металу, пластмас та тканин.[9]

Кожен етап підготовки деталей повинен по закінченню не перевищувати потрібні норми. Оскільки результат, який не відповідає нормам може призвести до іншого результату. В космосі, є ефект з'єднання металів без додаткового нагрівання або плавлення. Причина цього - атомарна структура металу. Кристалічна ґратка має додатково заряджені іони. Між вузлами кристалічної ґратки є багато вільних електронів. На Землі поверхневі шари металу реагують в поєднанні з киснем, утворюючи захисний окисний шар. Він є захистом від поєднання двох аналогічних(за складом) деталей. В космосі цей окисний захист може зникнути. “Якщо два шматки металу не ковзають один по одному (як у шарнірах), то непокриті оксидною плівкою метали при стисканні або ударі можуть з'єднатися, злитися разом, так, що електрони з одного шматка металу зможуть перетікати в інший. Очевидно, що це має величезні наслідки для будівництва й обслуговування космічних кораблів на кшталт МКС”[10].

5 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ І ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК

Для більш детального вивчення відмінних процесів протікаючи під час зварювання в умовах земних і відмінних від земних, було побудовано моделі у програмі Simufact.welding0.6.

Оскільки, для моделювання було обрано аналіз ЗТВ, то можна розглянути три варіанта його утворення, а саме - плавким електродом, буде проведено більш ретельний аналіз для детального відтворення функціоналу програмного забезпечення(П. 5.1-5.3), електронно-променевий тип зварювання(П. 5.4) і високотемпературним паяння(П.5.5).

Для моделювання зварного процесу було побудовано збірну конструкцію із пластини (150X150X50)мм на яку кріпиться труба з зовнішнім діаметром 400мм, товщиною 20мм, висота 400мм. Матеріалом деталей був вибраний аналог сплаву 2024-AlCuMg2.

Приблизний хімічний склад сплаву зображений на Табл.5.1.

Таблиця 5.1 – Хімічний склад AlCuMg2 (%)

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Домішки	-
до 0.5	до 0.5	0.3-0.9	до 0.1	до 0.15	90.9-94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	до 0.25	інші, кожна 0.05; всього 0.15	Ti+Zr<0.2

Температура солідус-640°C, ліквідус-500°C, приховане тепло - 0.922 Дж/кг.

5.1. Моделювання зварювання плавким електродом на Землі і на Марсі

Першим дослідом буде порівняння теплових характеристик зони термічного впливу(ЗТВ) у навколо шовній зоні та розподіл температури по всій деталі.

Шлях побудування:

1. Виставлення деталей відносно одне одного.
2. Додавання фіксаторів. Вказуємо дві фіксації труби-дві бобишки, що

притискають зверху трубу до плити симетрично з двох боків.

3. Обраний матеріал вказуємо як матеріал деталей.
4. Виставляємо температуру деталей.

Оскільки для моделювання в земних умовах вибрана температура 20°C , то температура деталей така сама.

5. Створюємо траєкторію зварювання. Програма автоматично пропонує побудувати “weld line” із запропонованої траєкторії.

6. Налаштовуємо параметри зварювання.
 - 6.1. Зовнішня температура - 20°C
 - 6.2. Гравітація по всій конструкції -9.80665 м/с^2
 - 6.3. Кількість компонентів при моделюванні:

- Деталі-2шт.

- Нижнє кріплення(плита)-1шт.

- Затискачі-бобишкі-2шт.

- Робот-1шт.

7. Тип зварювання - ARC welding
8. Параметри розмірів зварювальної краплі (рис. 5.1.1.):

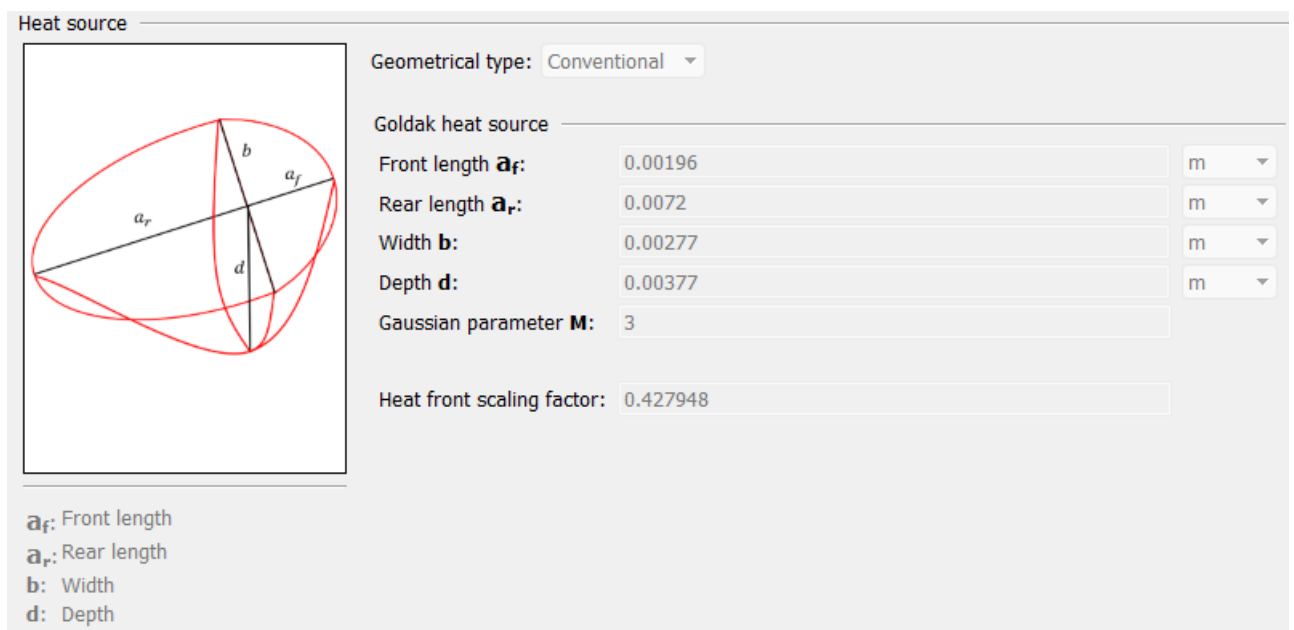


Рисунок 5.1.1 – Параметри розмірів зварювальної краплі

8. Зварювальні параметри (рис.5.1.2.):

Movement			
Velocity:	0.005	m/s	▼
Specification			
Mode:	Transient (indirect power) ▼		
Electrical parameters		Energy per length	
Current:	100.0	A	▼
Voltage:	17.0	V	▼
		Gross:	3400.0 J/cm ▼
		Net:	3060.0 J/cm ▼
		Efficiency:	0.9 - ▼

Рисунок 5.1.2 – Параметри зварювання

10. Запускаємо процес моделювання.

Моделі в усіх випадках зображенні при нульовому коефіцієнті деформації.

На рис.5.1.3. зображено початковий вигляд деталей при даних вказаних вище - умови на поверхні Землі.

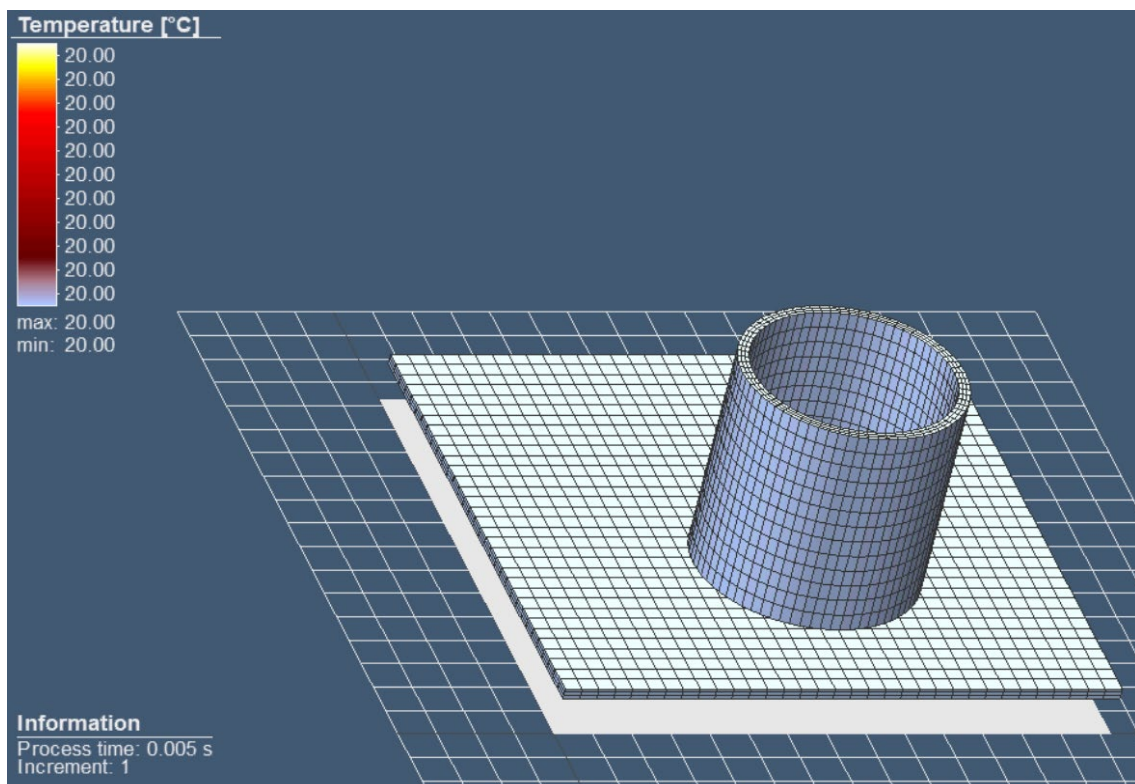


Рисунок 5.1.3 –Початковий вигляд конструкції для зварювання

Далі запускаємо процес зварювання і вже на 5й секунді зварювання видно утворення ЗТВ і детальний розподіл температури по датчику зліва зверху рис.5.1.4.

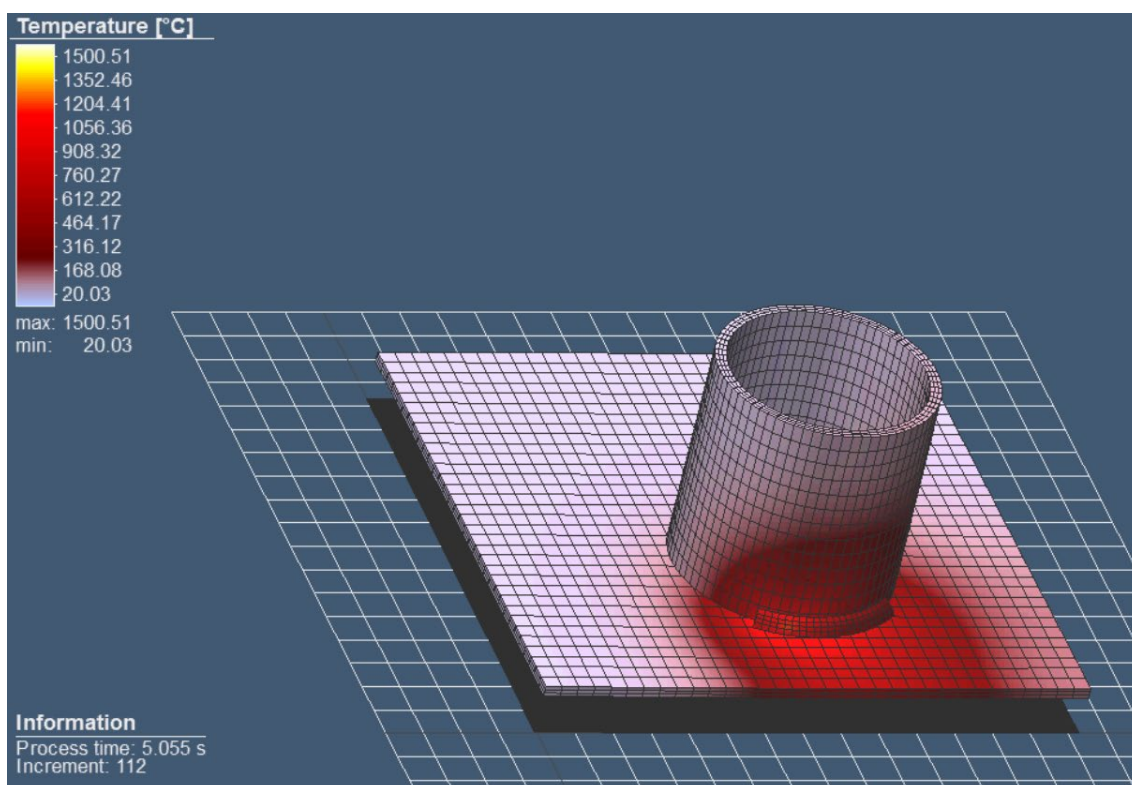


Рисунок 5.1.4 – Час 5с від початку зварювання в земних умовах

В кінці зварювання з'являються інші кольори які відображають розподіл тепла по закінченню процесу рис.5.1.5 і рис 5.1.6.

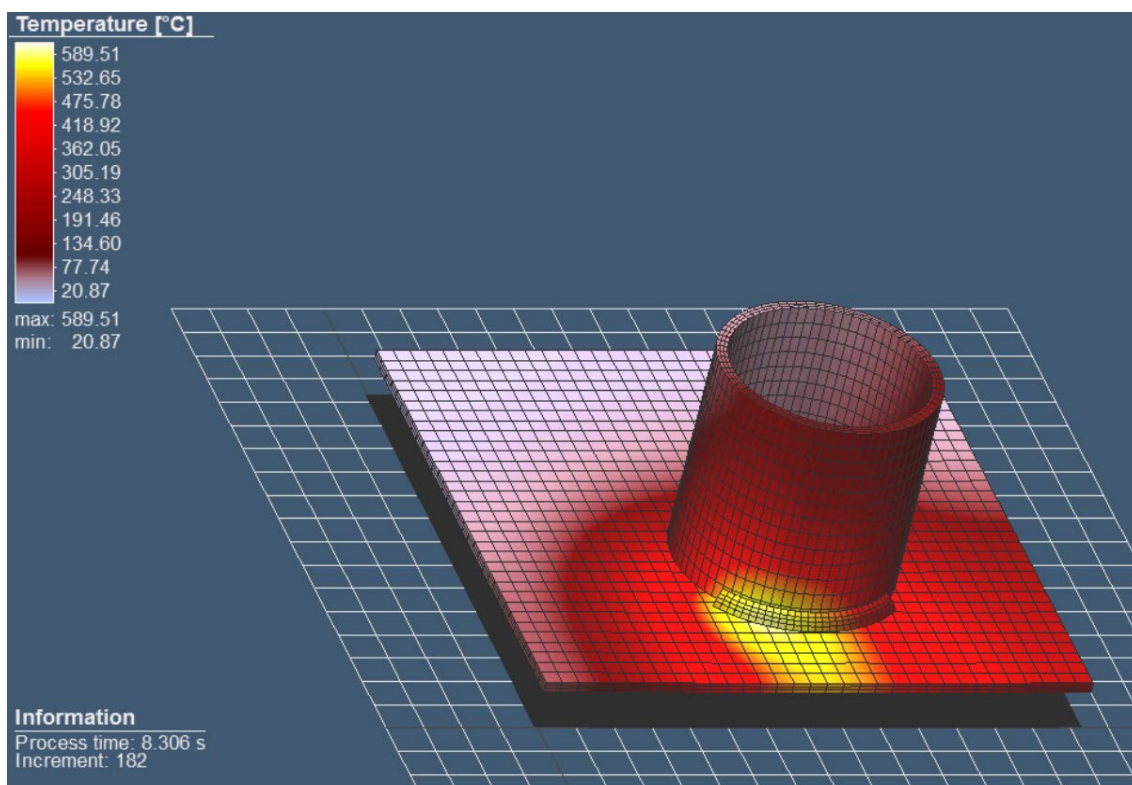


Рисунок 5.1.5 – Час 8с від початку зварювання в земних умовах

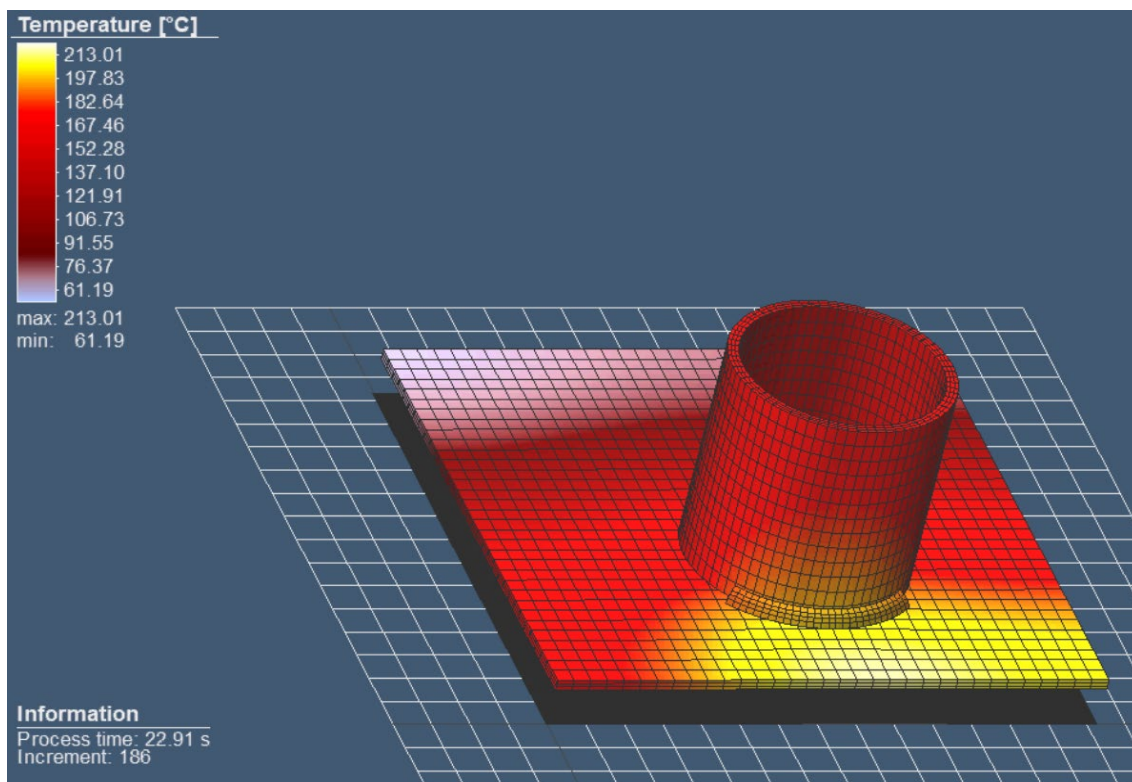


Рисунок 5.1.6 – Час 23с від початку зварювання в земних умовах

Зупинивши моделювання в потрібний момент можна проаналізувати ЗТВ в трьох контрольних точках, а саме через 3 секунди від початку зварювання найактивніше температурний вплив відбувся в зоні розмірами 40x21x20мм, через 5 секунд ця зона була приблизно 60x21x20мм, а після завершення зварювання і відповідно 30 секунд від початку вся поверхня конструкції окрім кінцевого кута (бісектриса якого рівна 20мм) була під впливом розподілу температури.

Для порівняння беремо вводимо в данні умови на Марсі вказані в табл. 1.1 із пункту 1. На Марсі буде два моделювання в умовах мінімальної температури, а саме - (-123°C) і максимальна, що близька до температурою на поверхні Землі - +30°C.

На рис.5.1.7. можна побачити початок зварювання на 2й секундi, по температурному датчику видно, що при даних Марса ЗТВ вже має температуру 210-700°C.

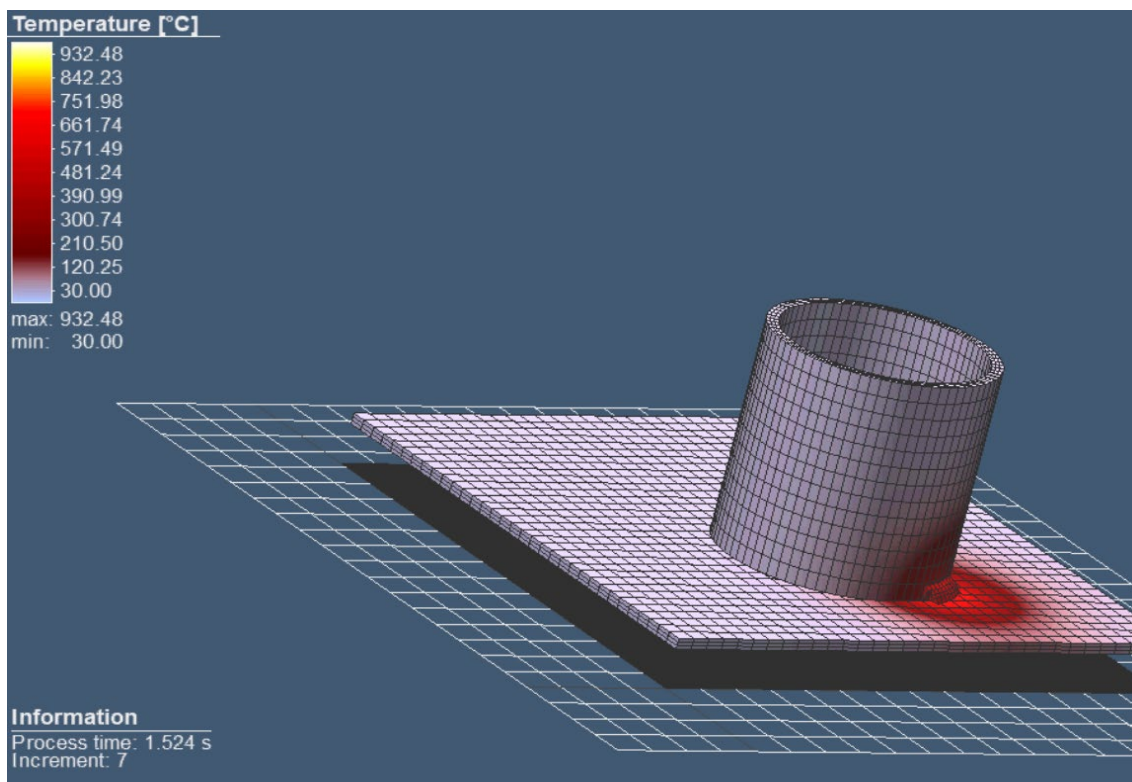


Рисунок 5.1.7 - Час 2с від початку зварювання в умовах Марса

На рис. 5.1.8 продемонстровано розподіл температури металу одразу після завершення зварювання.

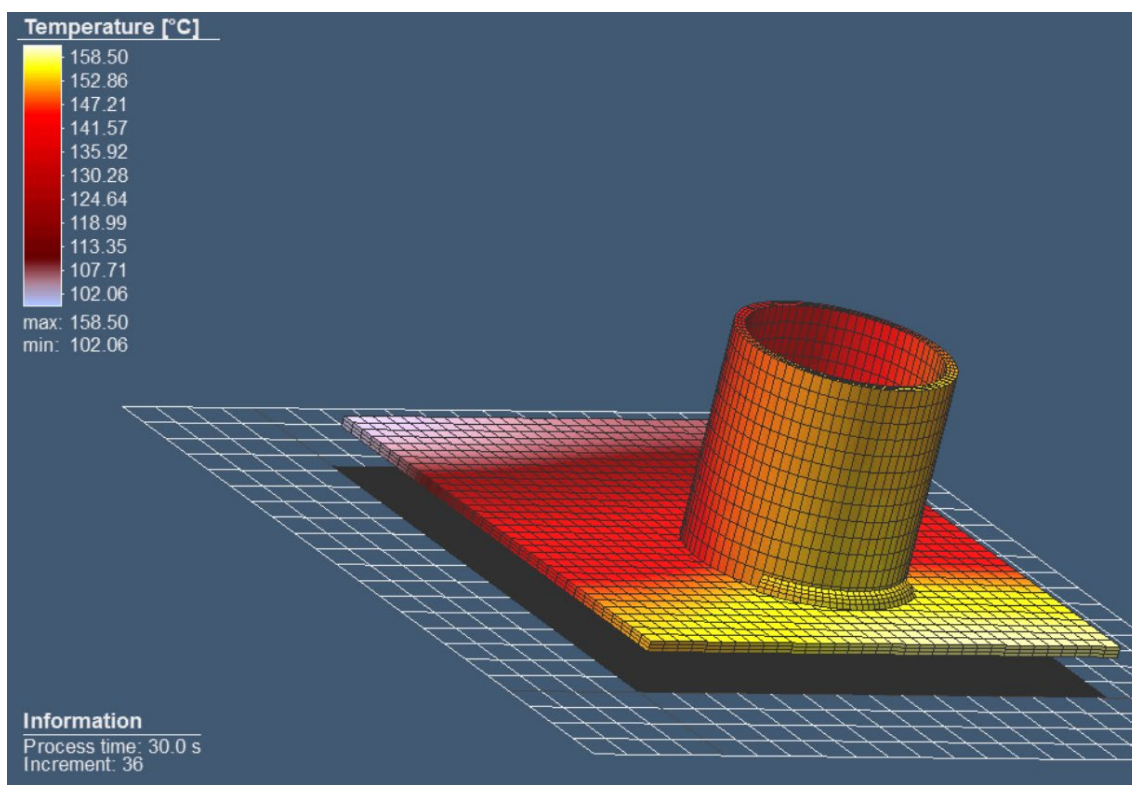


Рисунок 5.1.8 – Час 30с від початку зварювання в умовах Марса

Наступним буде модель Марс в умовах мінімально можливої температури
рис.5.1.9 і 5.1.10.

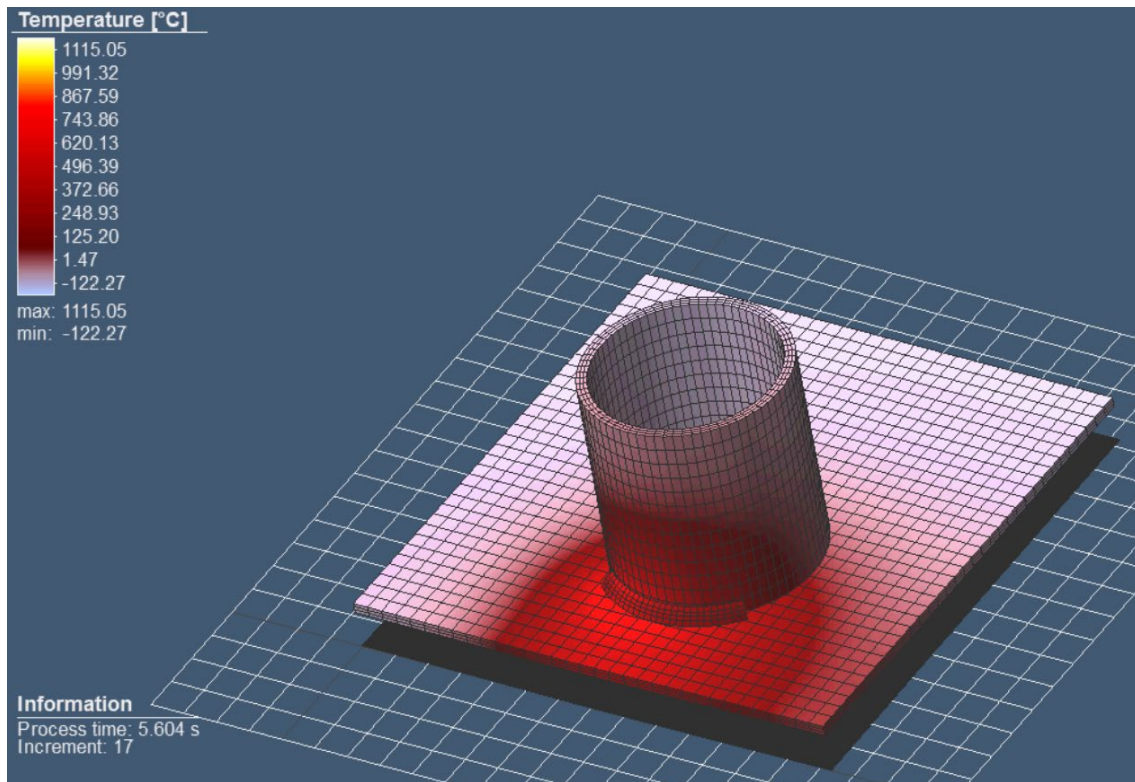


Рисунок 5.1.9.-Час 5с від початку зварювання в умовах Марса

Контролюючи данні можна побачити, що при зовнішній температурі -123°C пікова температура в зоні розплавленого металу може досягати до $+900^{\circ}\text{C}$.

Аналогічно до аналізу ЗТВ на конструкції, яка зварювалась в Земних умовах, проводимо аналіз розподілу температур при максимально низькій зовнішній температурі (-123°C). На третій секунду сильніше всього ЗТВ вплинуло на ділянку розміром $42 \times 22 \times 21$, якщо центральна точка є-точка зварювання. На дванадцяти секундах зміни в температурі отримала вся конструкція, але віддалений край має температуру в середньому менше на $+110^{\circ}\text{C}$. При зупинці аналізу вже після зварювання на 30 секунд частина конструкції наближена до зварного шву має середню температуру $+14^{\circ}\text{C}$, середнє значення температури по всій конструкції коливається від -30°C до -3°C , дальній кут розміром $18 \times 42 \times 35$ має найменший вплив, його температура -46.34°C .

Порівнюючи з даними що отримали на моделюванні зварювання у земних умовах можна побачити, що зона розподілення тепла є подібною, але значно

відрізняється за температурним режимом. Так в першому прикладі жовто-білим кольором позначена температура в 213°C , а на другому 158°C , те саме і з червоною зоною.

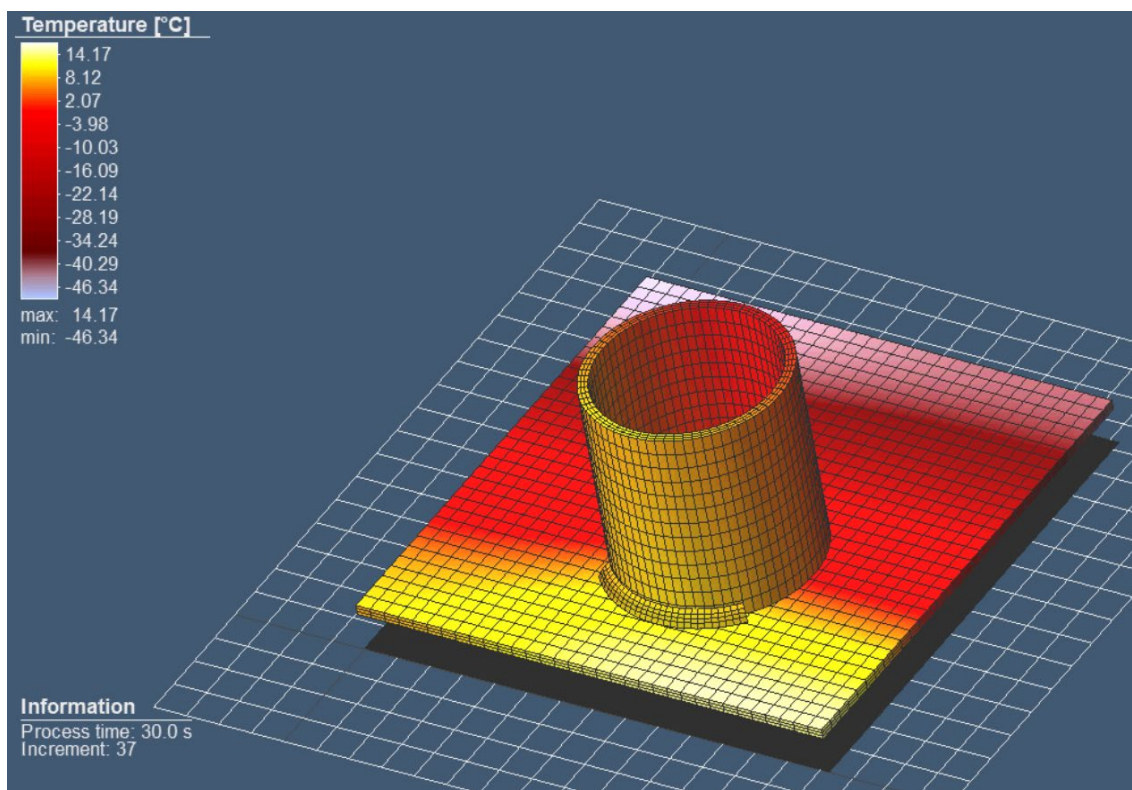


Рис.5.1.10 – Час 30с від початку зварювання в умовах Марса

На кінцевому моменті моделювання видно, що мінімальна температура на зразку $-46,34^{\circ}\text{C}$, а максимальна всього $+14.17^{\circ}\text{C}$.

5.2. Моделювання зварювання плавким електродом на Землі і на Місяці

Другим дослідом буде порівняння ЗТВ з табличними умовами (табл 1.1) Місяця і дані Землі є сталими для всіх експериментів.

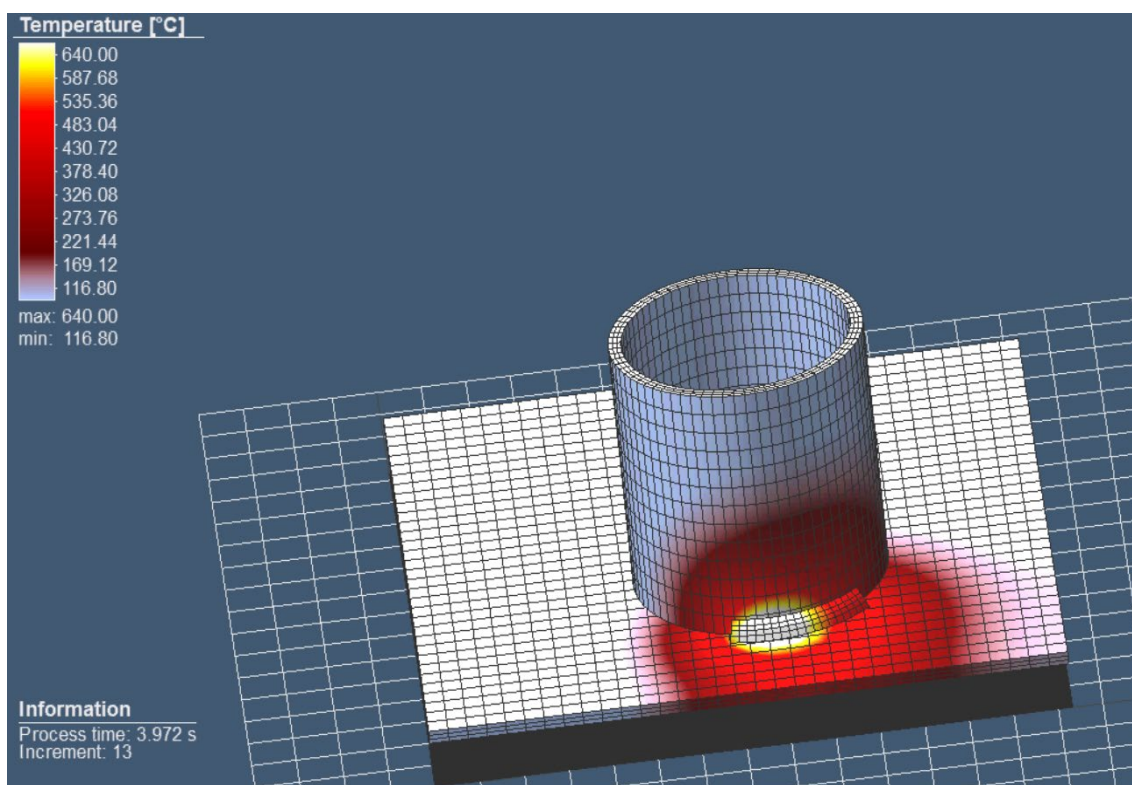


Рисунок 5.2.1- Час 4с від початку зварювання в умовах Місяця

З першого ж знімку ми можемо бачити, що порівняння характеристики ЗТВ є дуже різна, оскільки у першому випадку, більш детально можна було вивчити розподіл тепла по всьому виробу, а зараз є можливість більш конкретно зрозуміти розподіл температури у самому зварному шві і зварній ванній.

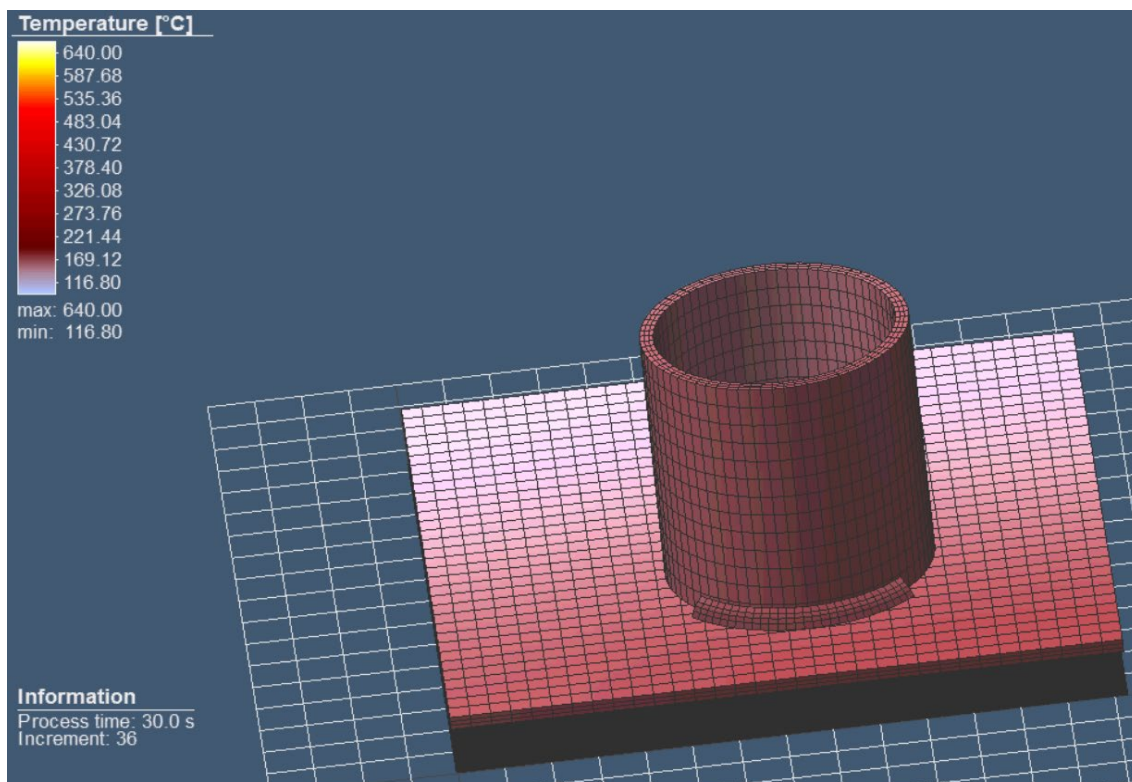


Рисунок 5.2.2 – Час 30с від початку зварювання в умовах Місяця

В кінці процесу можна побачити, що з цим запитом, а саме-вивчення температурного режиму ЗТВ і зварювальній ванні, в моделюванні, розподіл температури по завершенню є лише наближеним і є приблизно 153°C, тому на далі будуть приклади лише під час процесу зварювання.

Дане моделювання проводилось при зовнішній температурі +116.8°C ,а відповідно і температурі деталей. Проводимо аналіз по трьом контрольним точках для визначення ЗТВ. На третій секунді це розміри 47x15x23мм. На дванадцятій вже вся конструкція під впливом зміни температур, віддалений край отримав найменший вплив, різниця з середньою температурою конструкції складає 150°C. Тридцята секунду від початку зварювання показує , що всі деталі піддались суттєвому впливу, але крайній кут з розмірами 20x40x36мм має збільшення температури лише на 2°C.

Наступний зразок (рис 5.2.3.) буде виконуватись, також , в умовах Місяця, але при зовнішній температурі -173,1°C.

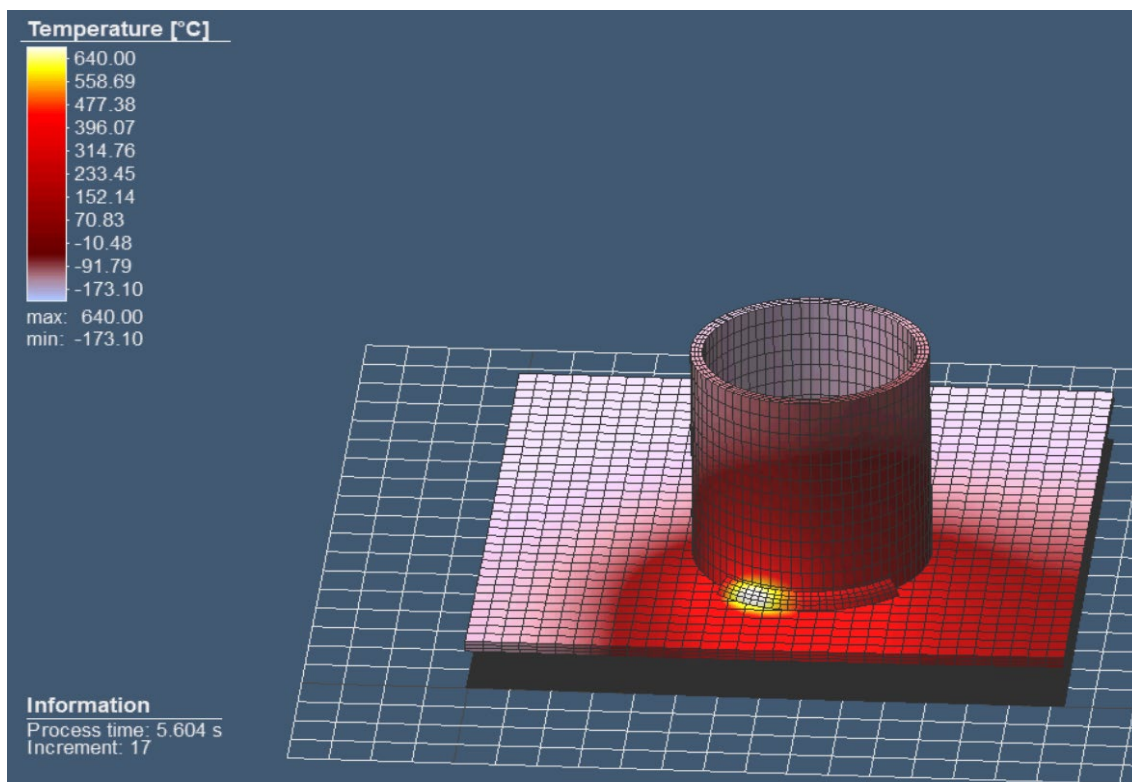


Рисунок 5.2.3 – Час 5с від початку зварювання в умовах Місяця

Аналізуючи результати цієї моделі можна побачити, що зона рідкого металу, а це все що перевищує задану температуру солідус - жовто-помарачевий та жовтий колір, має меншу зону впливу, якщо порівнювати з даними того ж Місяця але при температурі $+116.8^{\circ}\text{C}$.

На рис.5.2.4. зображена ця сама модель, але вже з видним розподілом тепла після закінчення і там стає чітко видно, чим нижча температура зовнішня(температура деталі) тим більше ЗТВ по деталі.

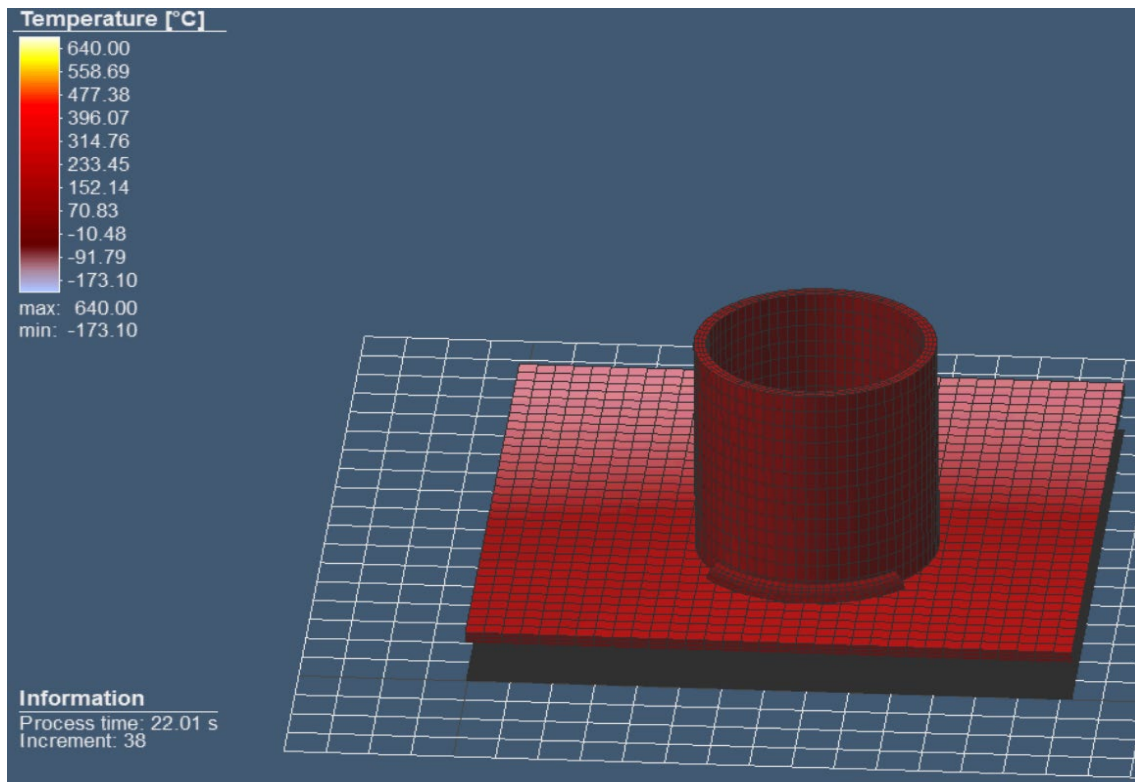


Рисунок 5.2.4 – Час 22с від початку зварювання в умовах Місяця

5.3. Моделювання зварювання плавким електродом на Землі і на орбітальній станції

Оскільки орбітальні станції розраховують з тією метою, щоб там було комфортно існувати людям як на постійному місці проживання то дані в середині будуть майже однакові із земними, а от дані які будуть використовувати, наприклад для ремонту орбітальної станції ззовні, дуже відрізняються. Вони також мають свій максимум (в середині $+238^{\circ}\text{C}$ -($+278^{\circ}\text{C}$)) і мінімум (ззовні -150°C) температурний.

Відомо, що при впливі температури на метал, змінюється його структура але ця структура впливає не тільки на розподіл температури по деталям але і на його фізичні характеристики. Таким чином ми можемо змоделювати приклад того як розподіляється стресова напруга в заданому зразку. В подальшому використанні цієї деталі можливо прогнозувати де можуть утворитись тріщини і т.д. по даним моделювання.

В цьому досліді можна прослідити як змінюється положення екстремально

високих напруг в МПа. Для більше детального аналізу буде приведено 5 скріншотів зразку, який зварюється на Землі (рис. 5.3.2.-5.3.5)

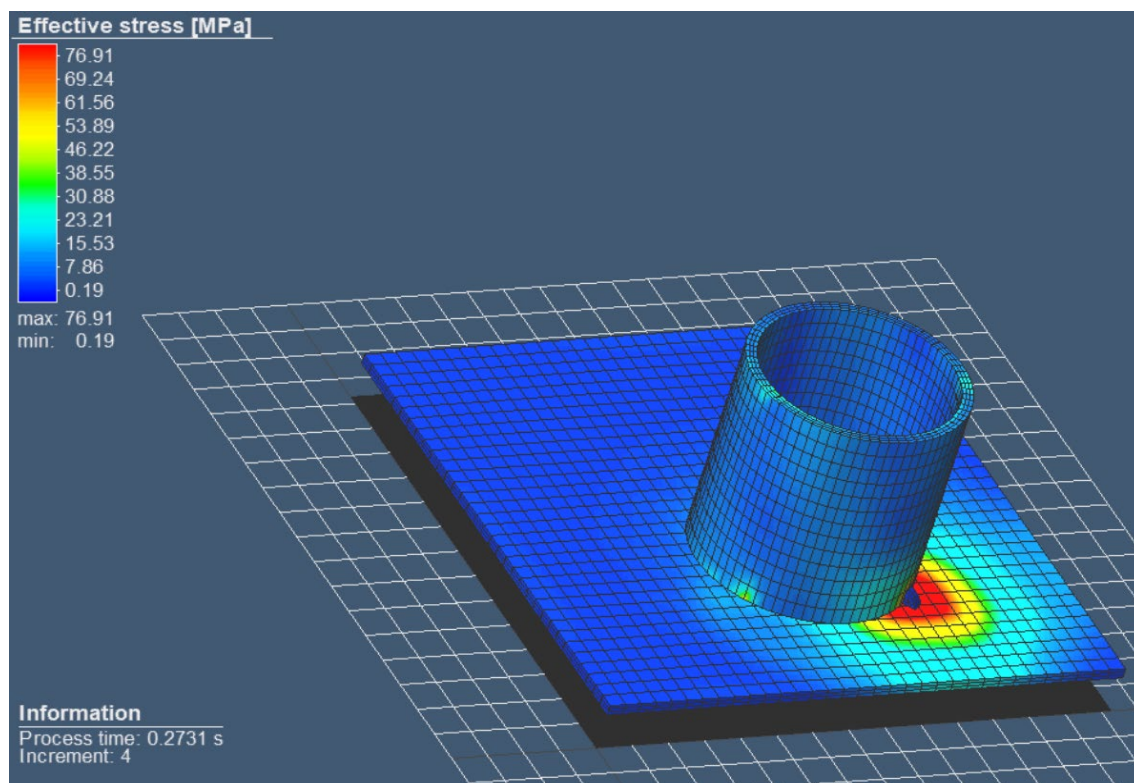


Рисунок 5.3.2 – Час 0,2с від початку зварювання в умовах Землі

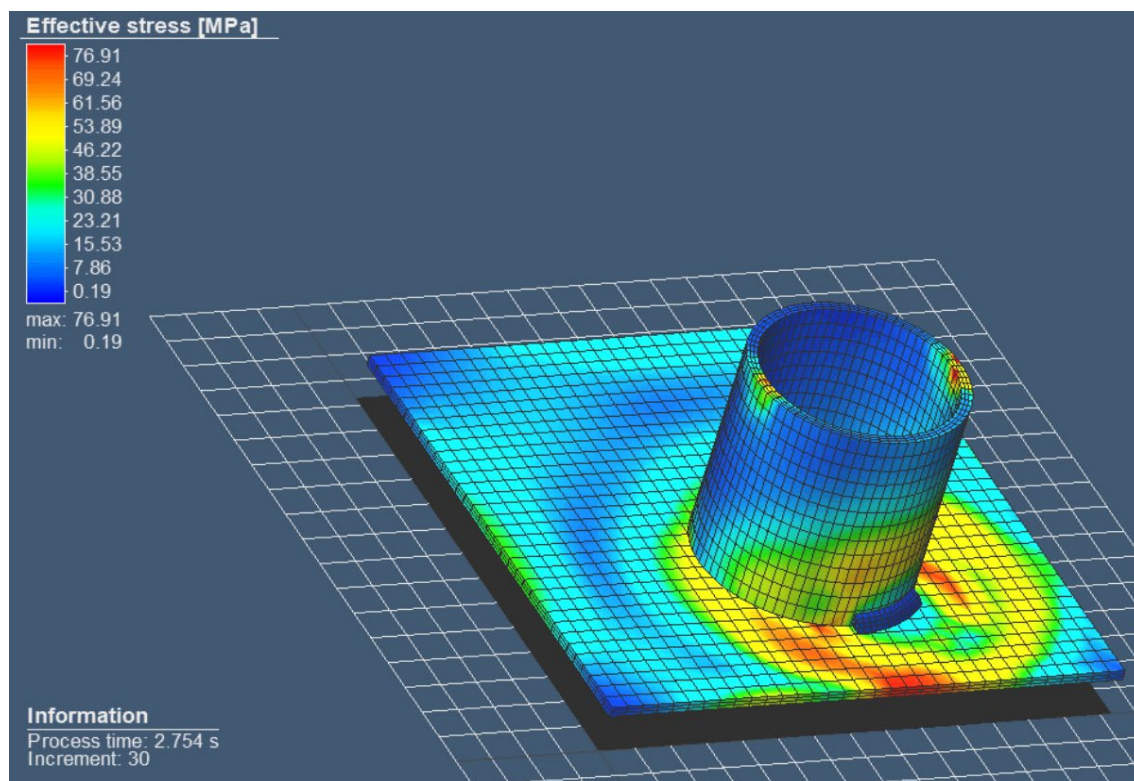


Рисунок 5.3.2 – Час 2.7с від початку зварювання в умовах Землі

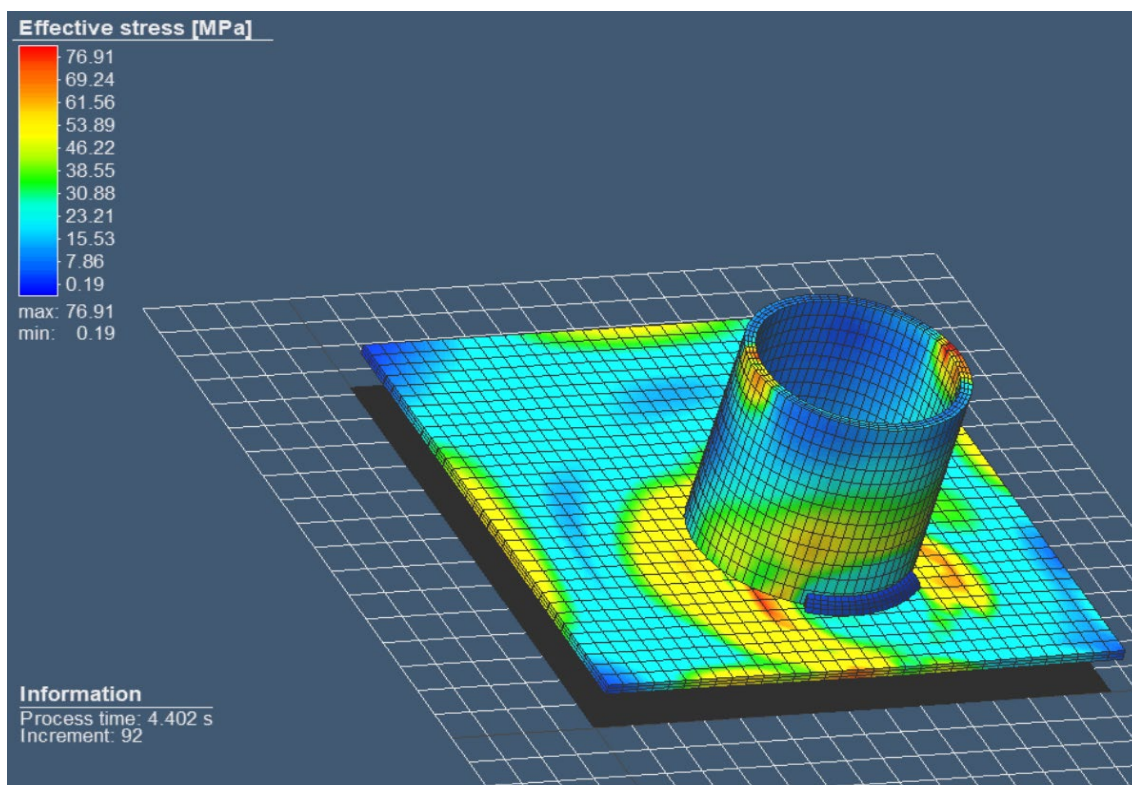


Рисунок.5.3.3 – Час 4с від початку зварювання в умовах Землі

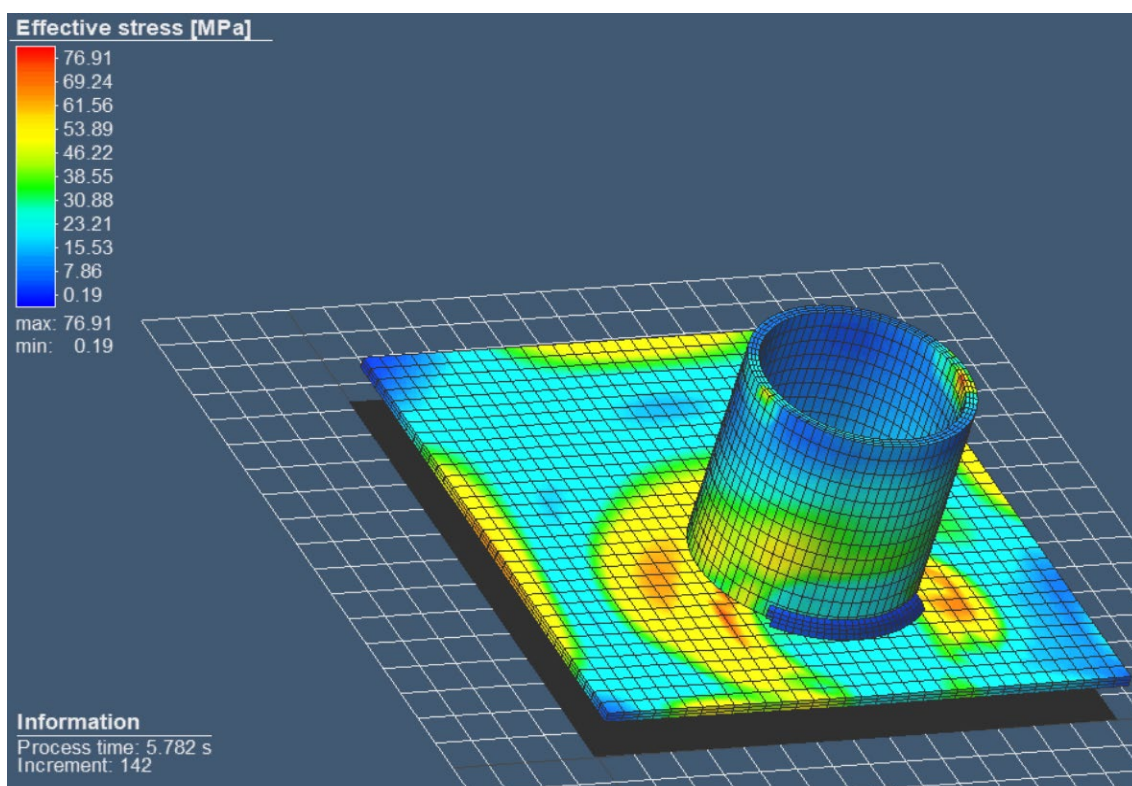


Рисунок 5.3.4 – Час 5с від початку зварювання в умовах Землі

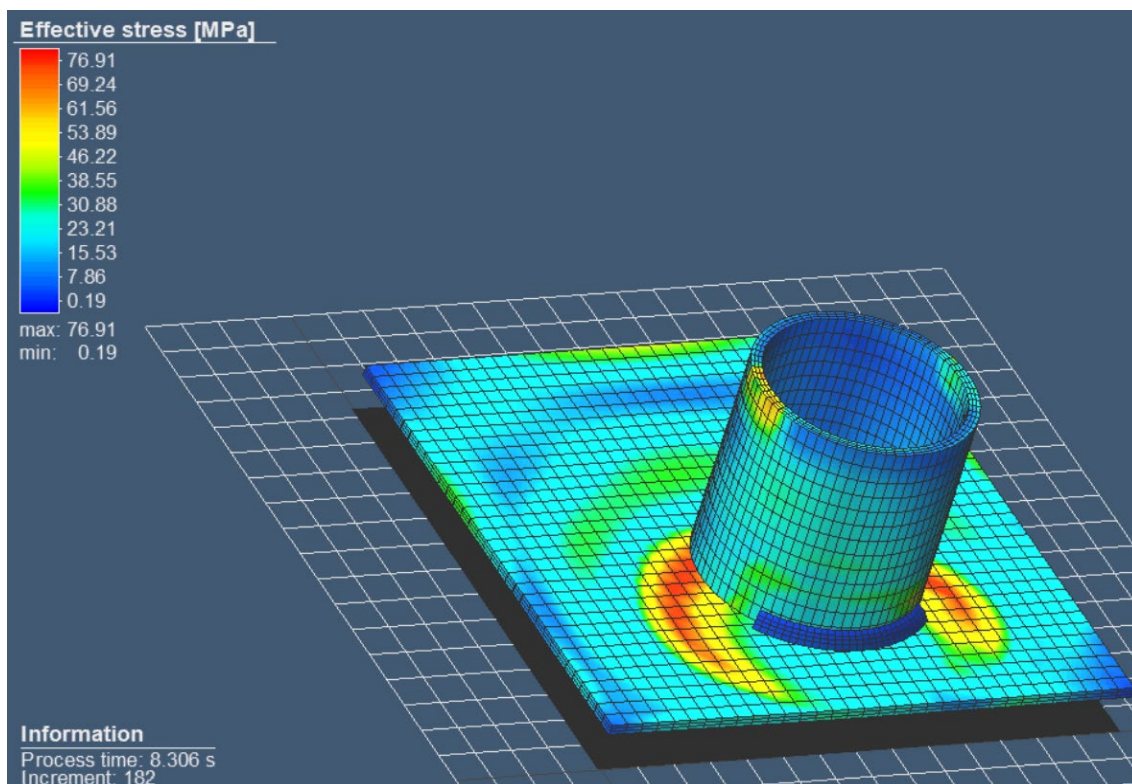


Рисунок 5.3.5 – Час 8с від початку зварювання в умовах Землі

На моделюванні показаному на рис. 5.3. можна побачити зміни не тільки під впливом шляхом теплових змін ,через зварювальний процес, а ще видно вплив на деталь фіксаторів у вигляді двох бобишок розташованих над трубою. Одразу видно, що перший контакт є найбільш стресовим для міцності деталей.

На рис.5.3.6 – 5.3.9. буде наведена модель, яка зварювалась в умовах орбітальної станції , в середині. Для наглядного відображення з моделі був прибраний зварний шов, але вплив від нього залишився сталим.

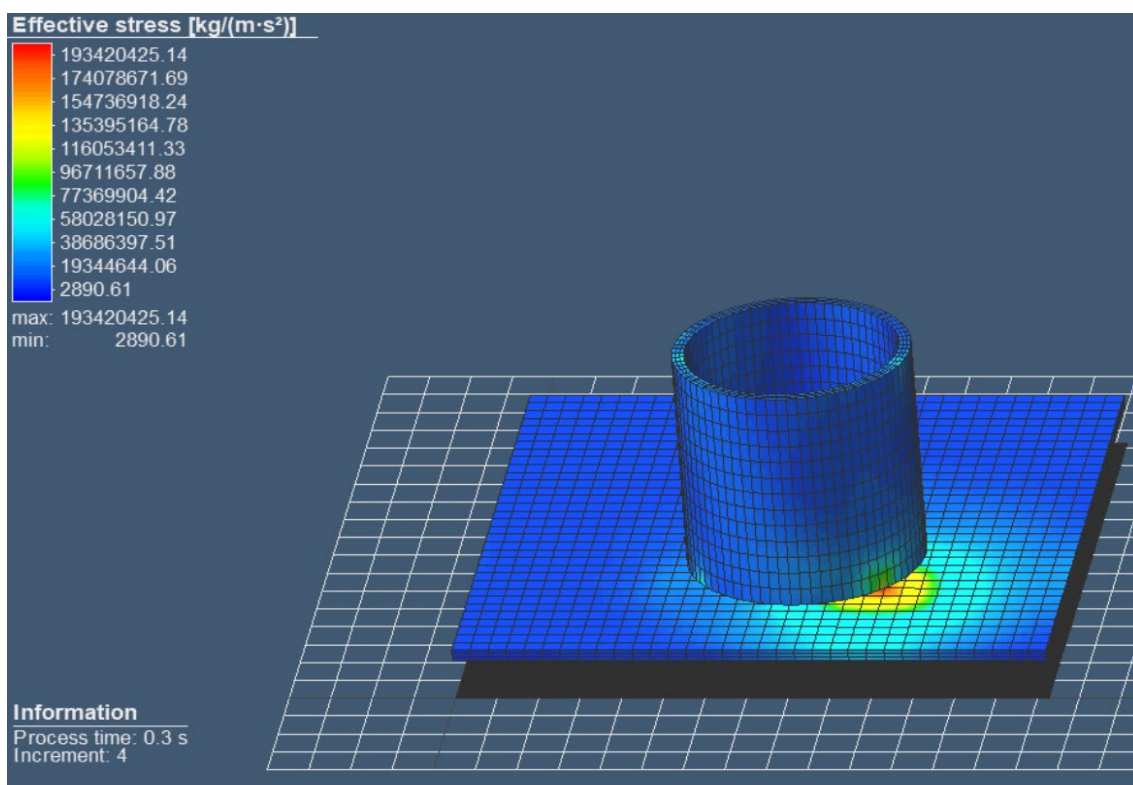


Рисунок 5.3.6 – Час 0,3с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

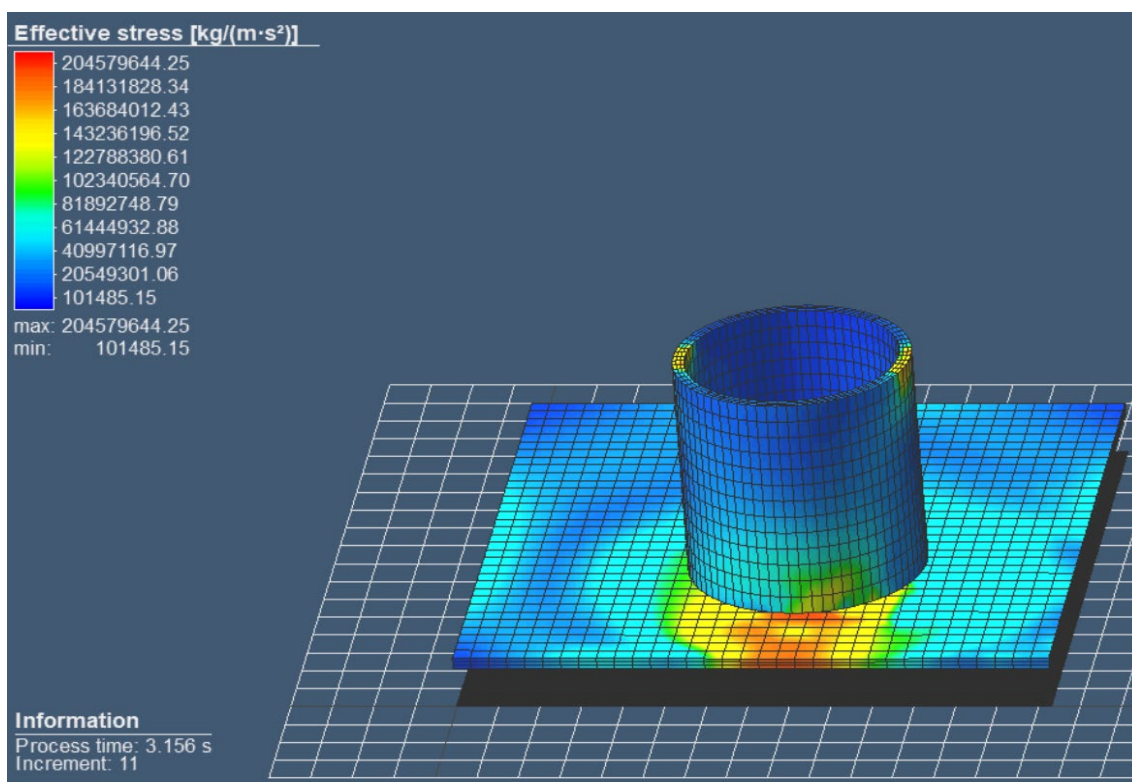


Рисунок 5.3.7 – Час 3с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

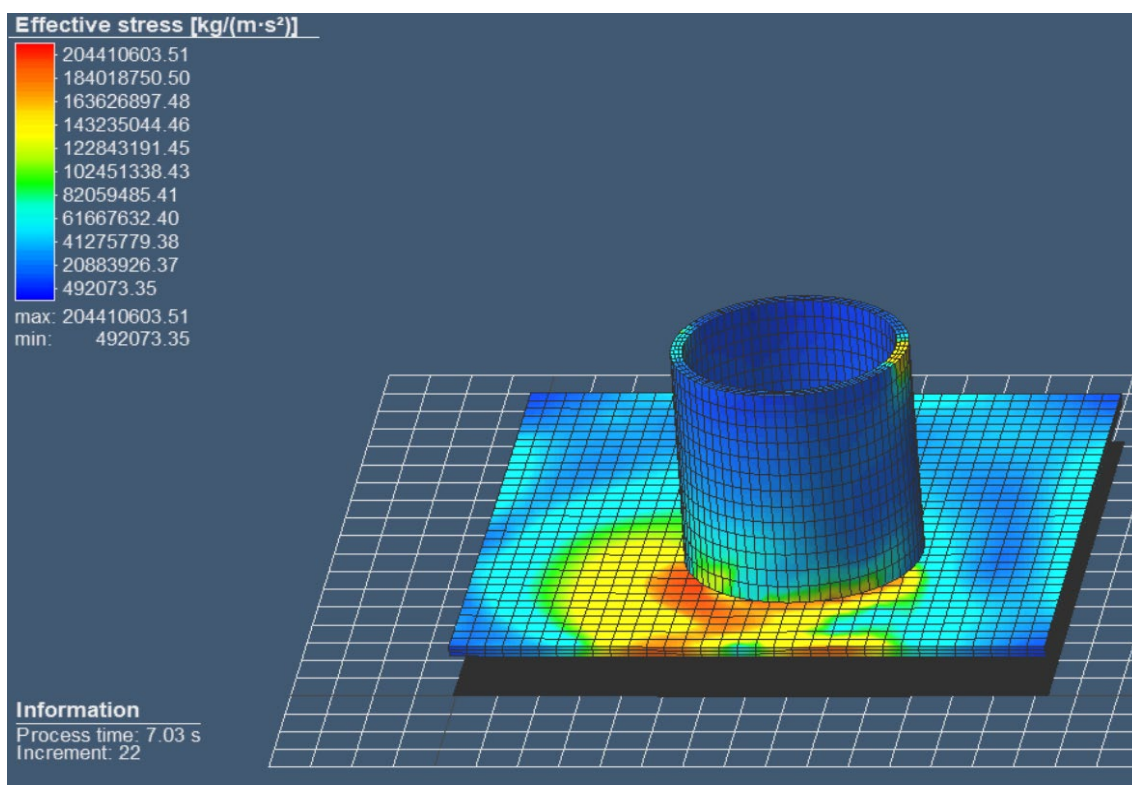


Рисунок 5.3.8 – Час 7с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

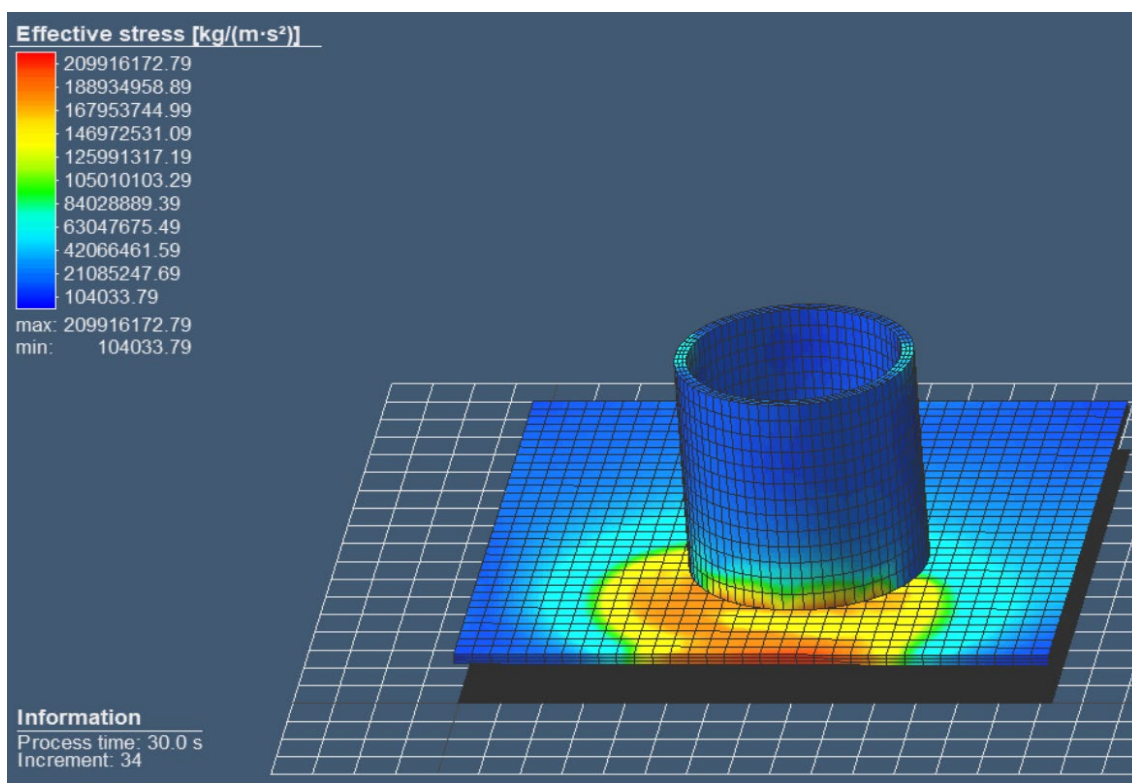


Рисунок 5.3.9 – Час 30с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

Ці моделі більш чітко відображають стресовий натиск в кг/м*с². Також

можна побачити, що при переміщенні точки зварювання по трубі йде чіткий “хвіст” жовтого і зеленого кольору.

Наступні скріншоти рис.5.3.10 – 5.3.12. зроблені при моделі що працює в умовах аналогічних до умов поза орбітальної станції у тіні.

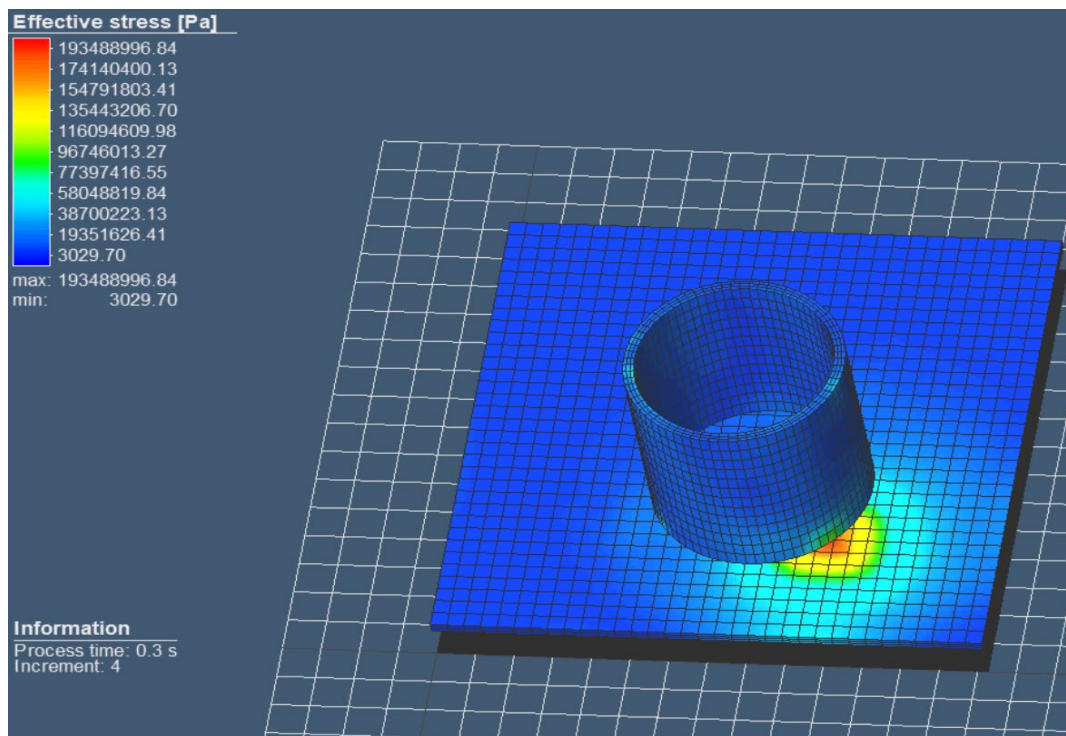


Рисунок 5.3.10 – Час 0,3с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

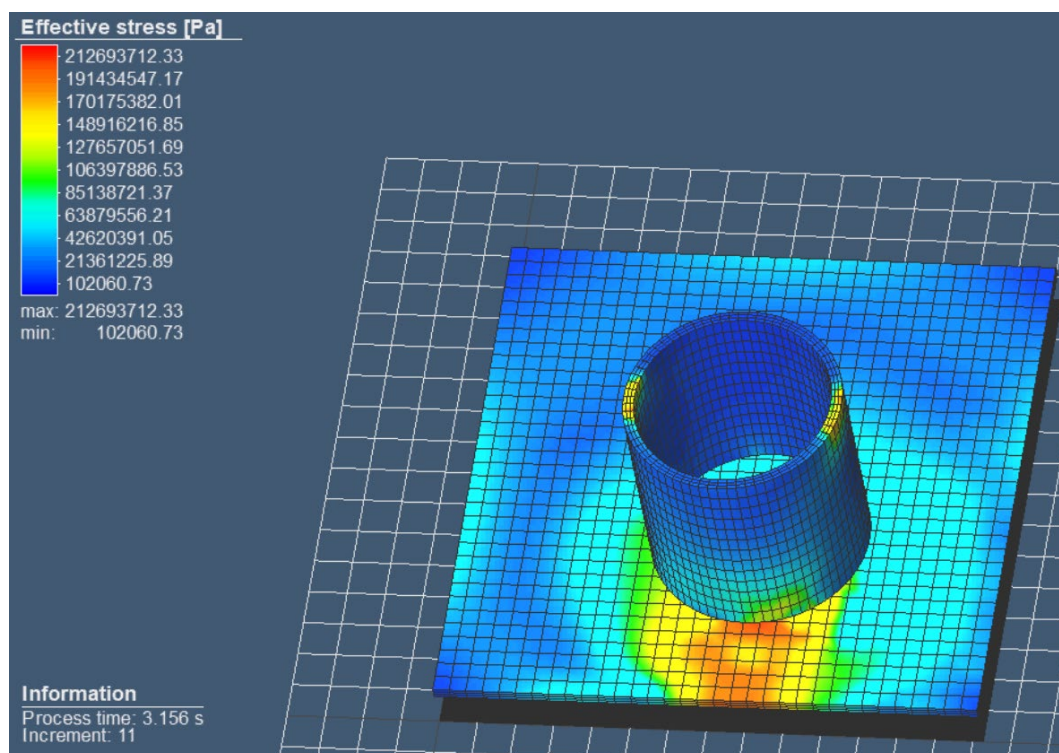


Рисунок 5.3.11 – Час 3с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

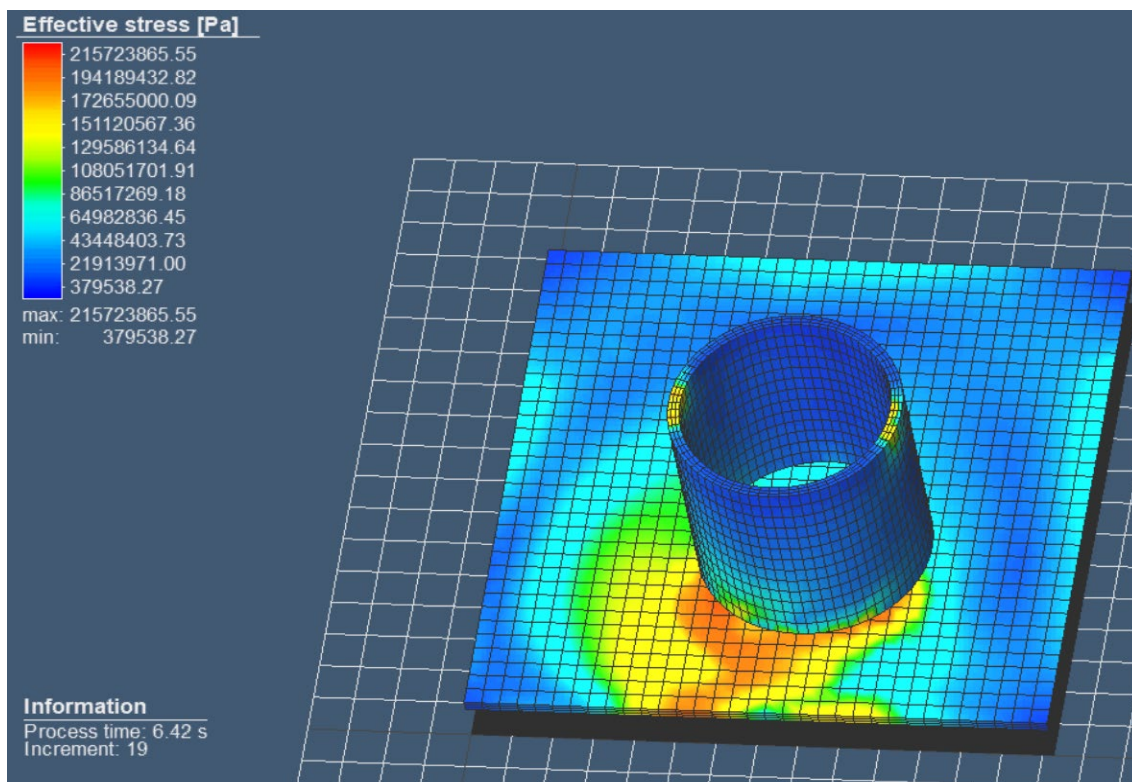


Рисунок 5.3.12 – Час 6с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

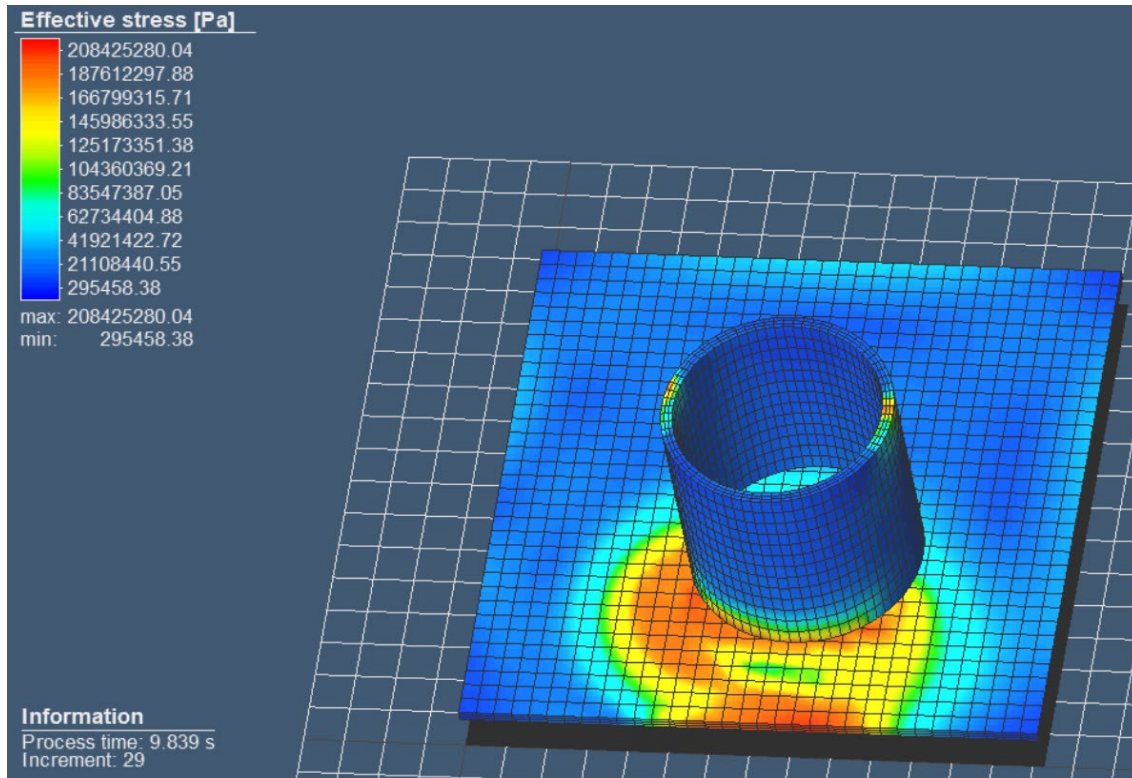


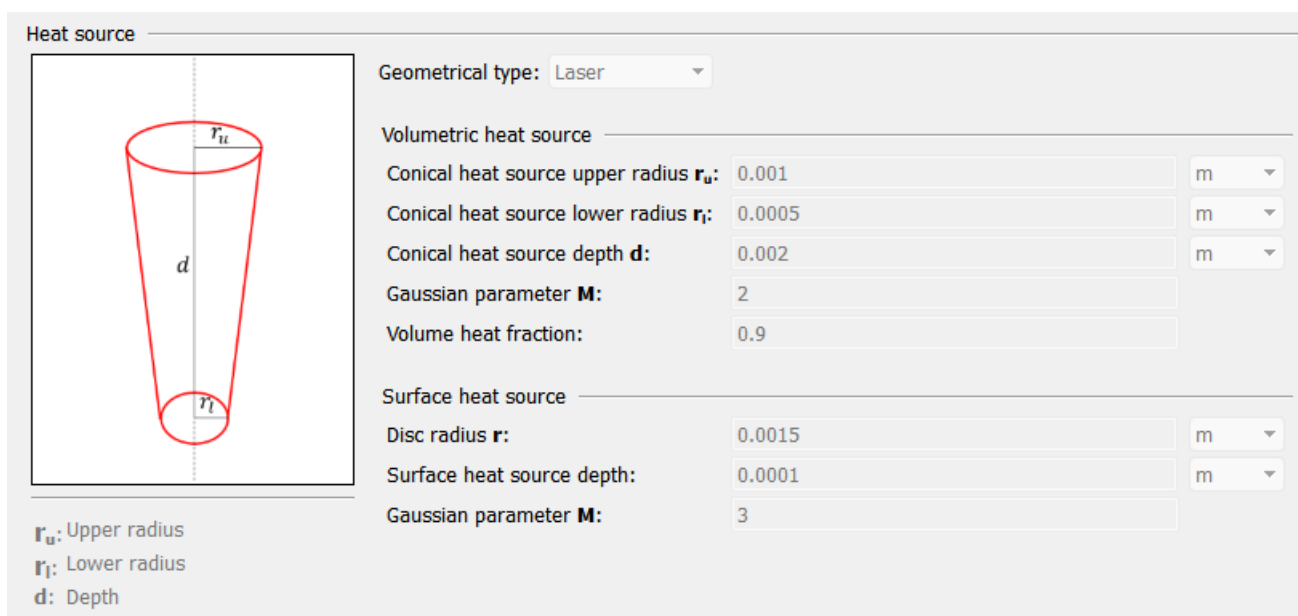
Рисунок 5.3.13 – Час 9с від початку зварювання в умовах орбітальної станції

З цього ракурсу можна спостерігати зміни напруження по всій пластині, від

темно-синього до блакитного. Також помітні зміни у місці де повинен знаходитись зварний шов. Дані приведені в Па але якщо порівняти з даними в МПа, то видно, що в порівнянні з земними умовами тиск більше в десятки разів.

5.4. Моделювання електронно - променевого зварювання

Щоб зобразити цей процес, в налаштуваннях програми потрібно змінити тип зварювання, а потім зробити відповідні налаштування. Вони є аналогічними до плавкого електроду, але ще вказується час відкриття вакуумної камери для завершення моделювання процесу і окрім розміру зварювальної ванни , надаються данні для розміру електронного променя/лазера(Рис.5.4.1.)



Heat source

Geometrical type: Laser

Volumetric heat source

Conical heat source upper radius r_u : 0.001 m

Conical heat source lower radius r_l : 0.0005 m

Conical heat source depth d : 0.002 m

Gaussian parameter M : 2

Volume heat fraction: 0.9

Surface heat source

Disc radius r : 0.0015 m

Surface heat source depth: 0.0001 m

Gaussian parameter M : 3

r_u : Upper radius
 r_l : Lower radius
 d : Depth

Рисунок 5.4.1 – Налаштування параметрів електронного променя

У п.5.1-5.3. було наведено приклади моделювання в чотирьох умовах - Земля, Марс, Місяць, орбітальна станція при їх максимальних і мінімальних температурах.

Для всіх моделей, окрім орбітальної станції буде вказана середнє значення температури. Орбітальна станція має дві кардинально різні умови, це умови відкритого космосу або умови в середині космічного судна, тому для експерименту взяли умови відкритого космосу. Дані по гравітації вказані в П.2.1. Дані з середніми значеннями позначені у табл.5.4.

Таблиця 5.4 – Дані для температурного моделювання моделювання

Умови	Температура, °C
Земля	+20
Марс	-46,50
Місяць	-28,15
Орбітальна станція	-150

5.4.1. Моделювання електронно-променевого зварювання.

Наступні моделі, не дивлячись на те, що зовнішній вигляд дуже схожий на попередні процеси є значно іншим. Електронно-променеве зварювання в земних умовах використовується за допомогою розміщення зварювальної установки і деталі в вакуумній камері. При комп'ютерному моделюванні обов'язковою умовою для вдалої роботи було вказати всі умови, як стандартні, такі як параметри зварювання, так і специфічні - час закриття і відкриття вакуумної камери, розрахунки вакууму, температура у вакуумі і тд. Оскільки, підтримання штучного вакууму це умови, лише, земного моделювання, то для трьох інших середовищ це є невід'ємною частиною. Із цього виходить, що моделі в П.5.4. працюють всі в умовах космосу, а одна-земна в умовах вакуумної камери. Температура деталей буде дорівнювати середній температурі по вище згаданим земним дослідом, а саме +20 °C. На Рис.5.4.2. зображений процес моделювання зварювання у вакуумній камері.

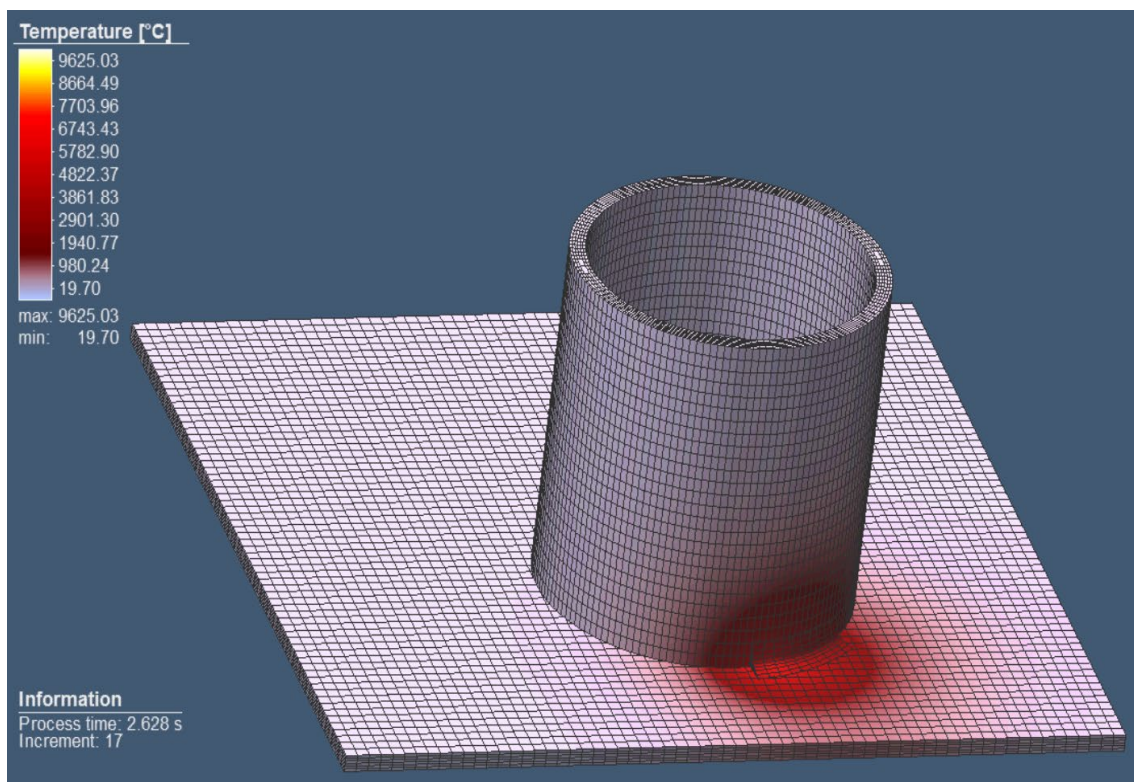


Рисунок 5.3.2.1 – Час 3 с. від початку зварювання

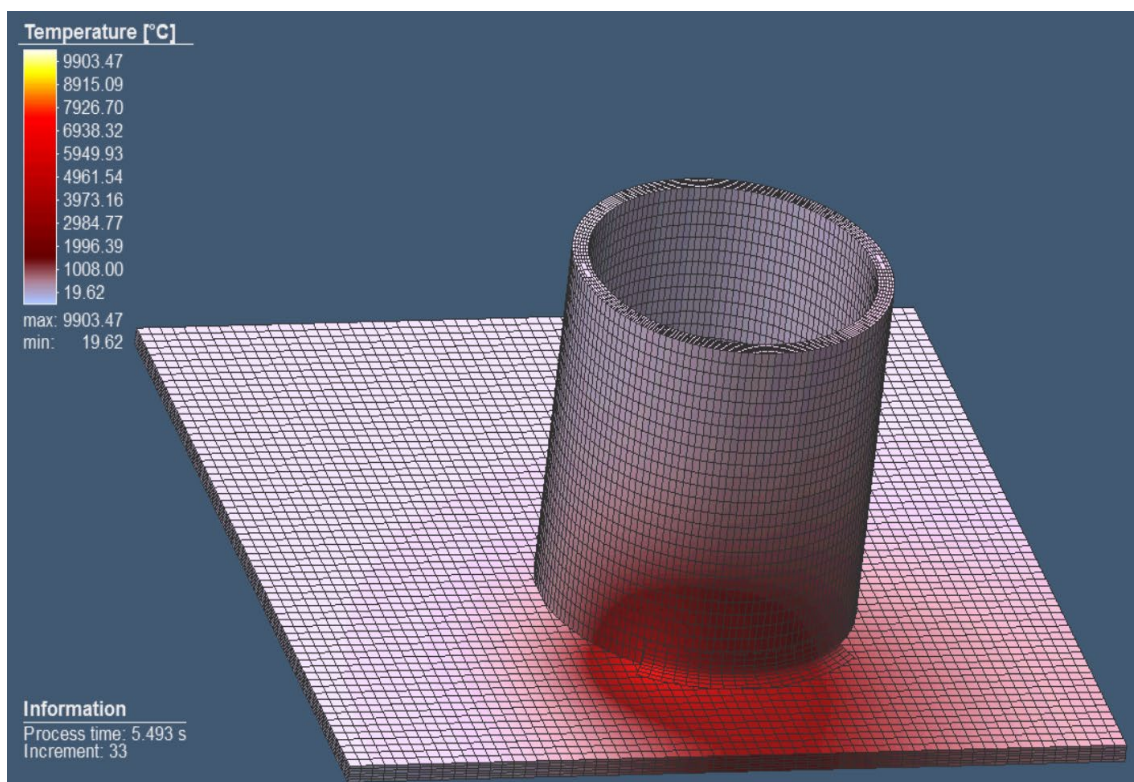


Рисунок 5.3.2.2 - Час 5 с від початку зварювання

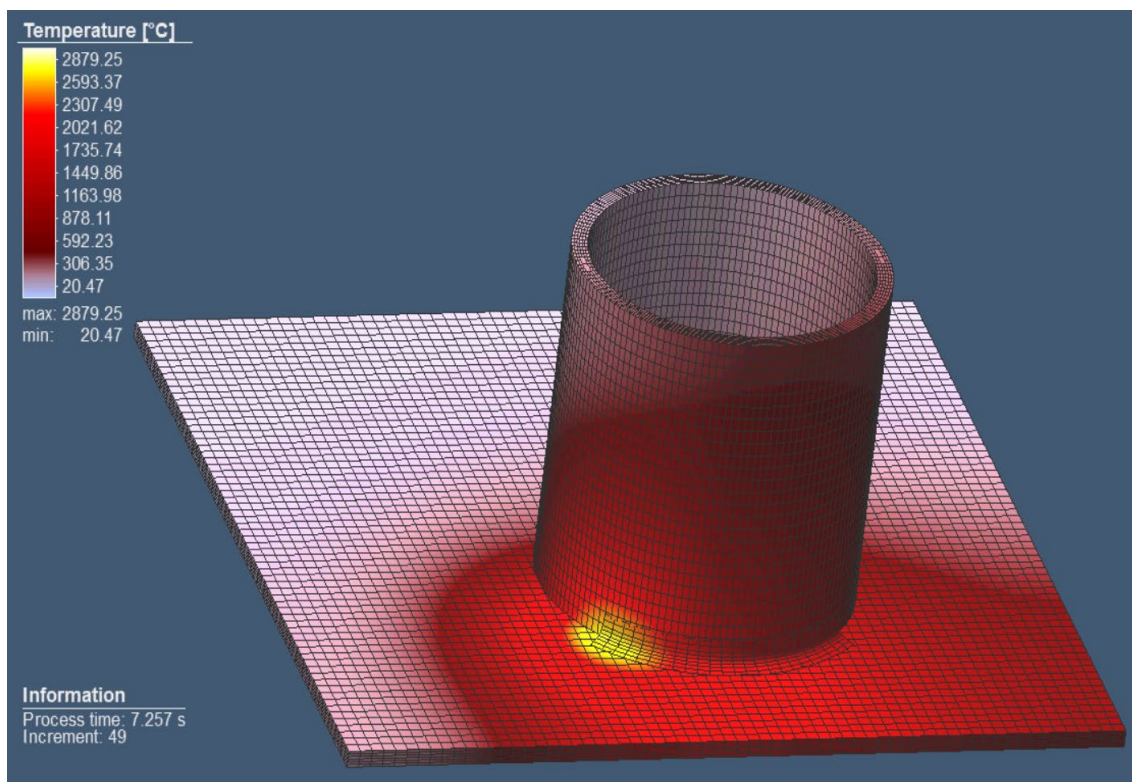


Рисунок 5.3.2.3 - Час 7с від початку зварювання

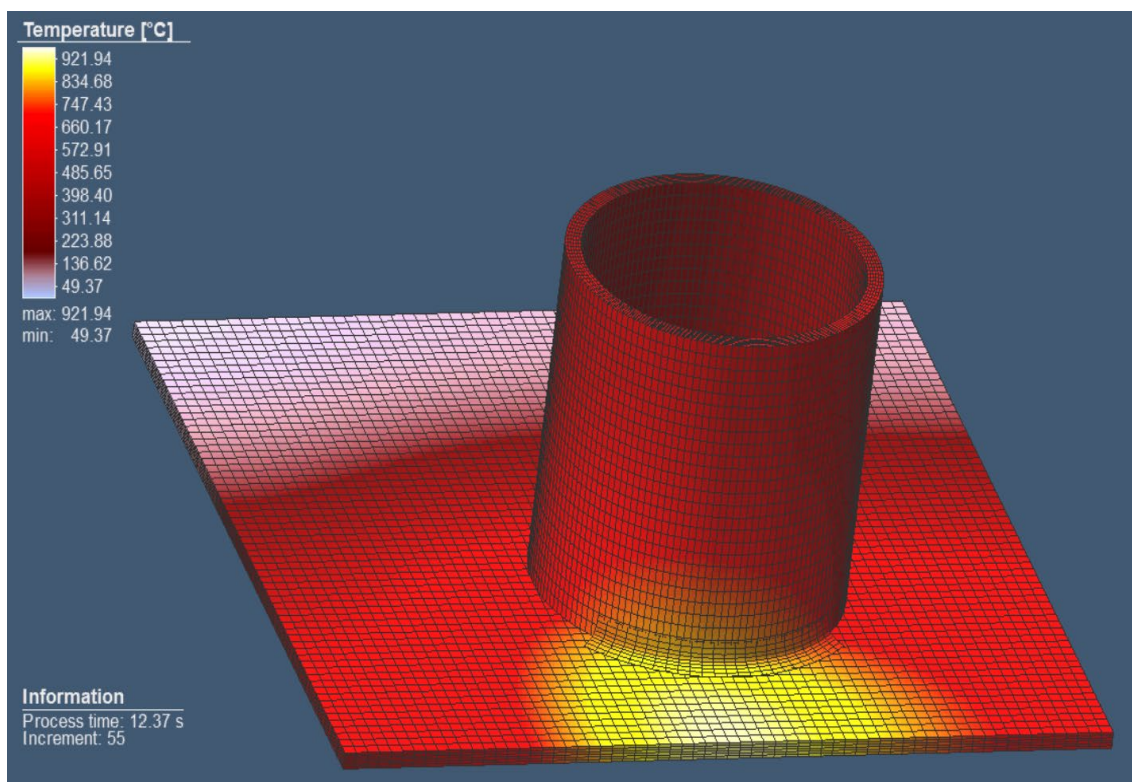


Рисунок 5.3.2.4 – Час 12 с від початку зварювання

Аналізуючи вхідні дані для моделювання і результат, який відображений на скріншотах, можна побачити, що рис.5.4.2, є прикладом розподілу температури під

час не закінченого процесу. Оскільки параметри моделювання налаштовані таким чином, що температурна шкала відображає всі актуальні температури в моменті, а кольоровий показник деталізує розподіл тепла після процесу, то температура в місці зварювання $+9900^{\circ}\text{C}$, а її розподіл відбувається в формі овалу, а не розтягнутим овалом, що має “хвіст” в зоні шву. Другою візуальною відмінністю є збільшення ЗТВ в навколошовній зоні пропорційно до пройденого шляху, більше зварний шов - більше ЗТВ.

На Рис.5.4.3. показано моделювання зварювання на Місяці.

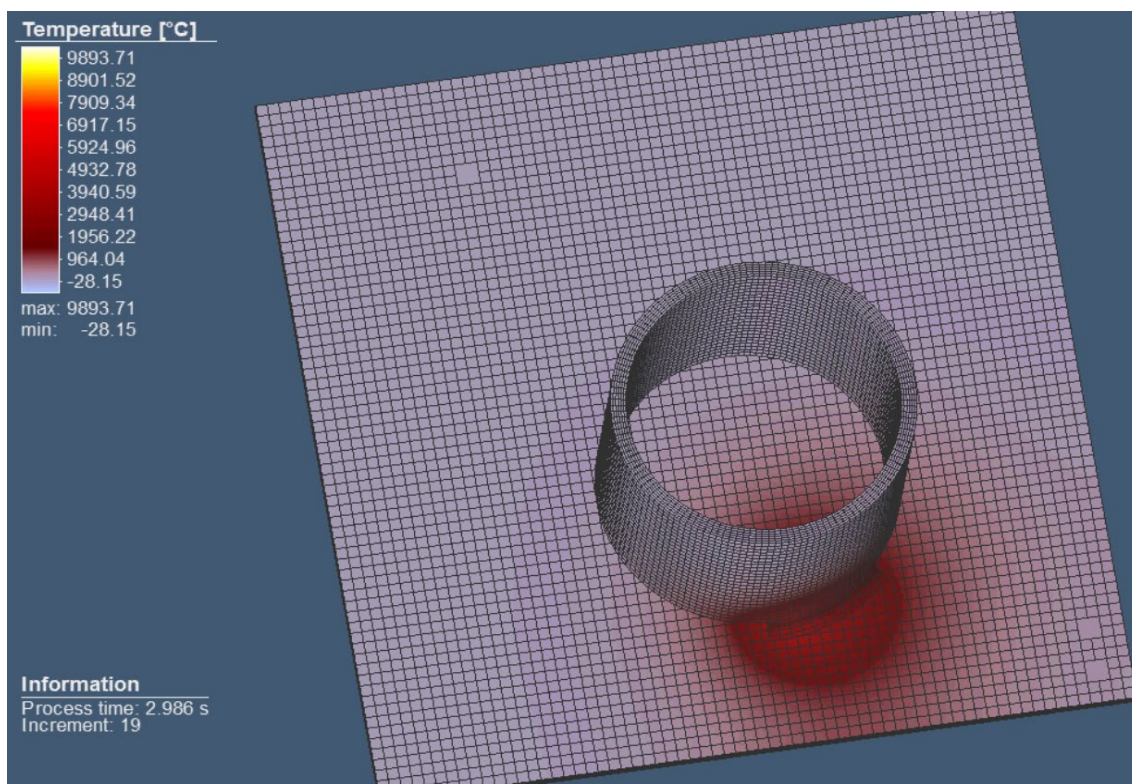


Рисунок 5.4.3.1- Час 3с від початку зварювання

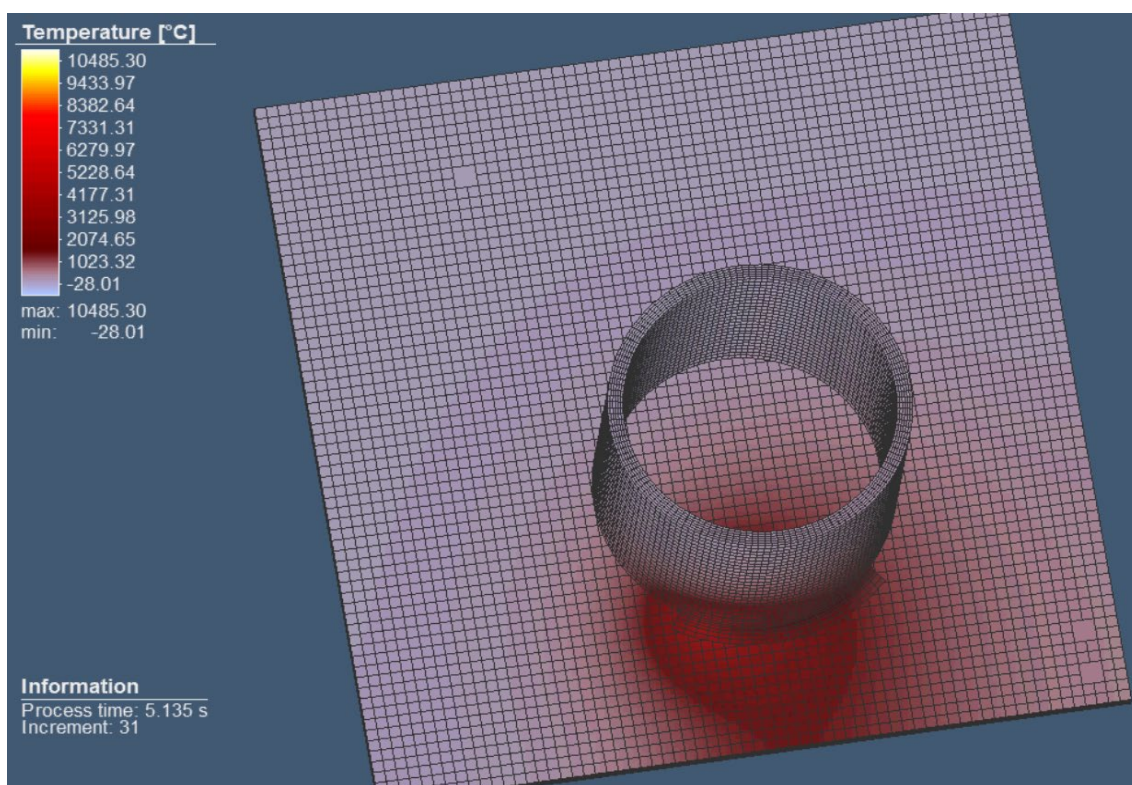


Рисунок 5.4.3.2.-Час 5с від початку зварювання

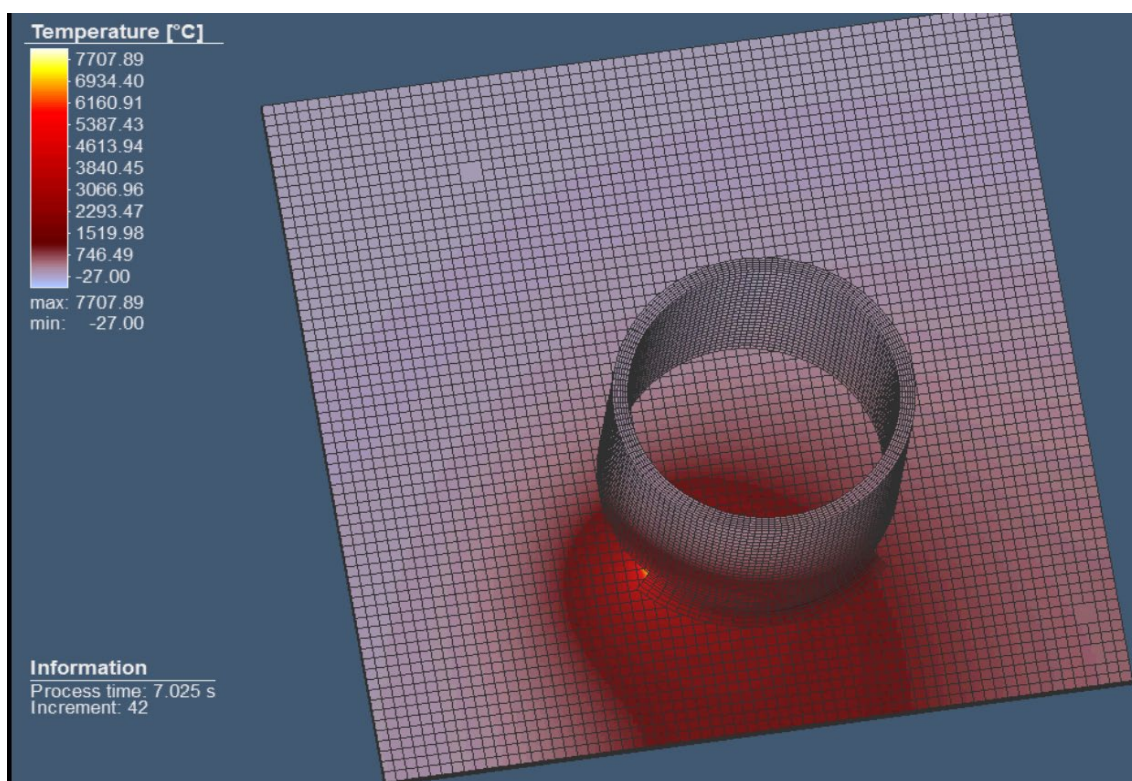


Рисунок 5.4.3.1 – Час 7с від початку зварювання

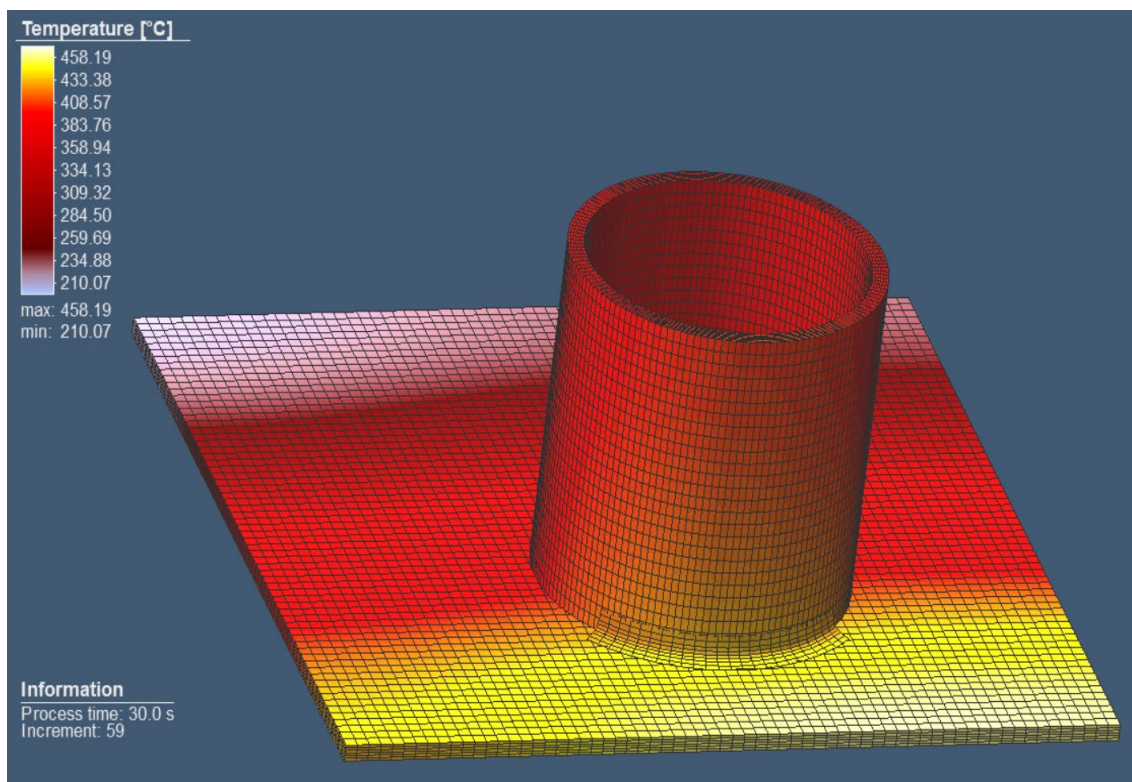


Рисунок 5.4.3.4 – Час 30с від початку зварювання

Відмінним параметром є розташування ЗТВ. На першому моделювання цього типу зварювання було видно чітку і рівномірну форму ЗТВ. На рис.5.4.3. видно, як на цю форму впливає температура деталей і зовнішня температура.

Наступним буде рис.5.4.4. моделювання зварювання на Марсі.

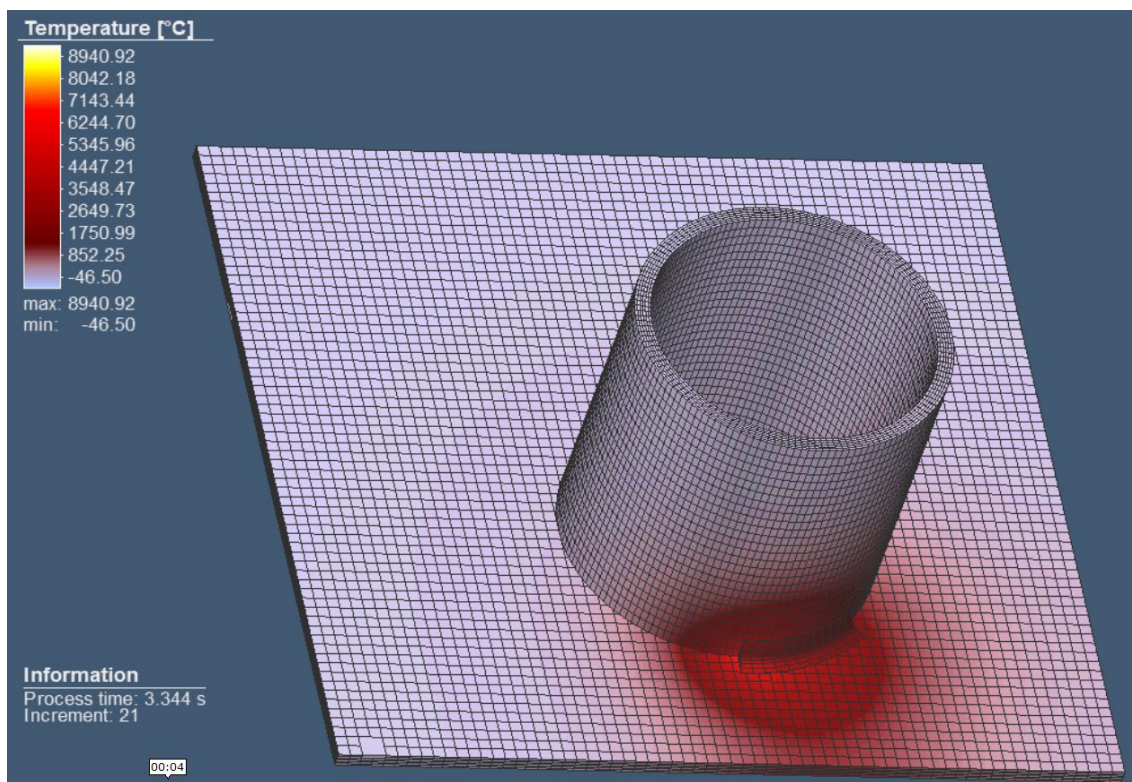


Рисунок 5.4.4.1 – Час 3с від початку зварювання

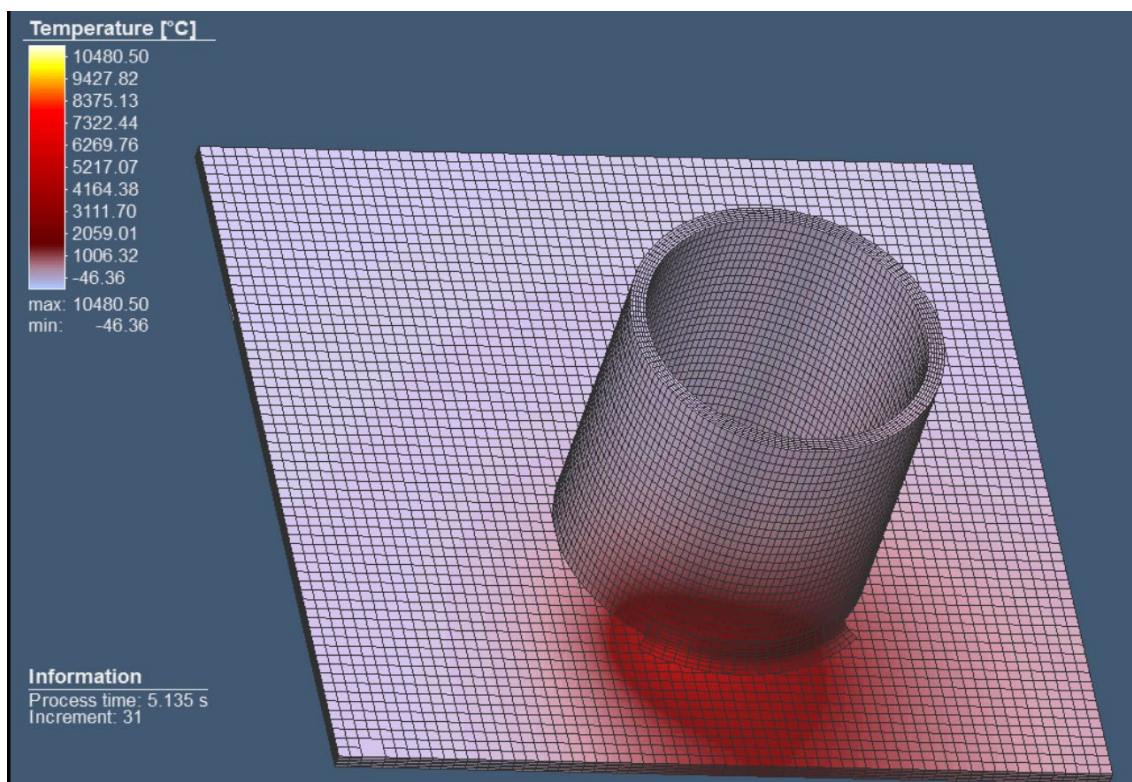


Рисунок 5.4.4.2 – Час 5с від початку зварювання

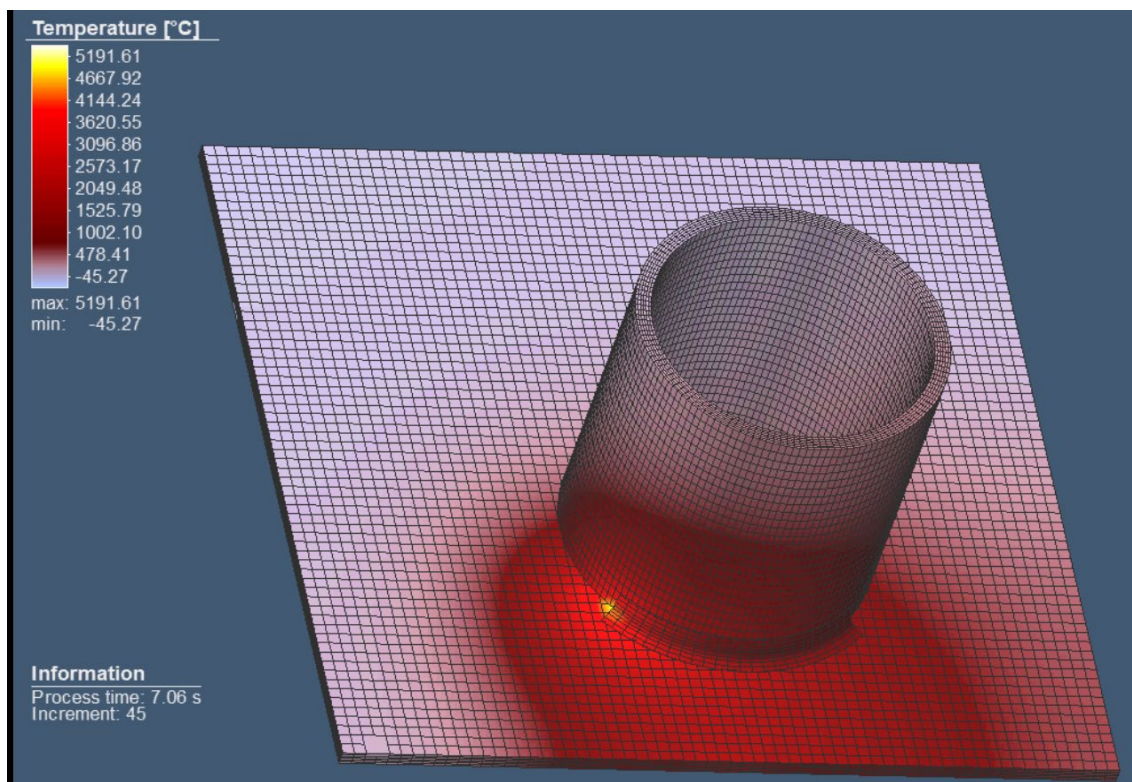


Рисунок 5.4.43 – Час 7с від початку зварювання

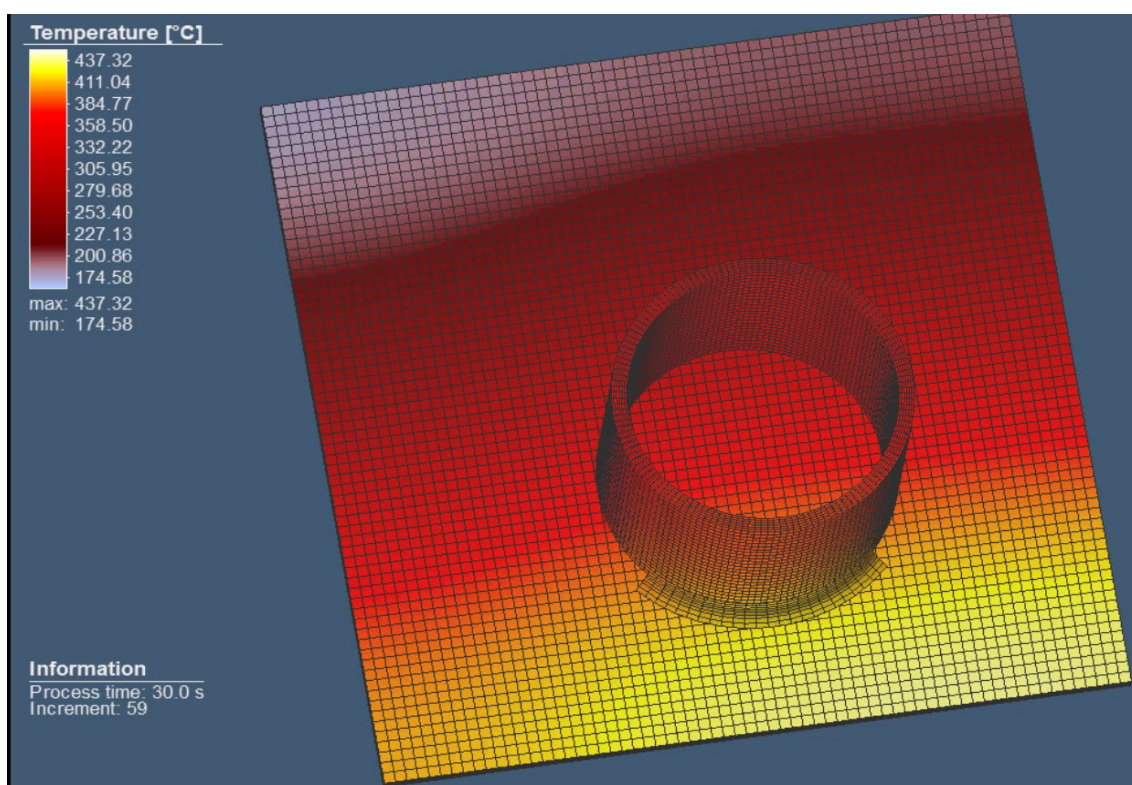


Рисунок 5.4.4.4 – Час 30с від початку зварювання

Зміна зовнішніх умов, які впливають не тільки на якість з'єднання але і на процеси, що проходять в середині металу, розподіл тепла одне із них. ЗТВ стало мати не такі чіткі форми, тобто перехід між температурою активного впливу і

пасивного є більш плавним.

На рис. 5.4.5. наведено моделювання зварювання на орбітальній станції, в умовах відкритого космосу.

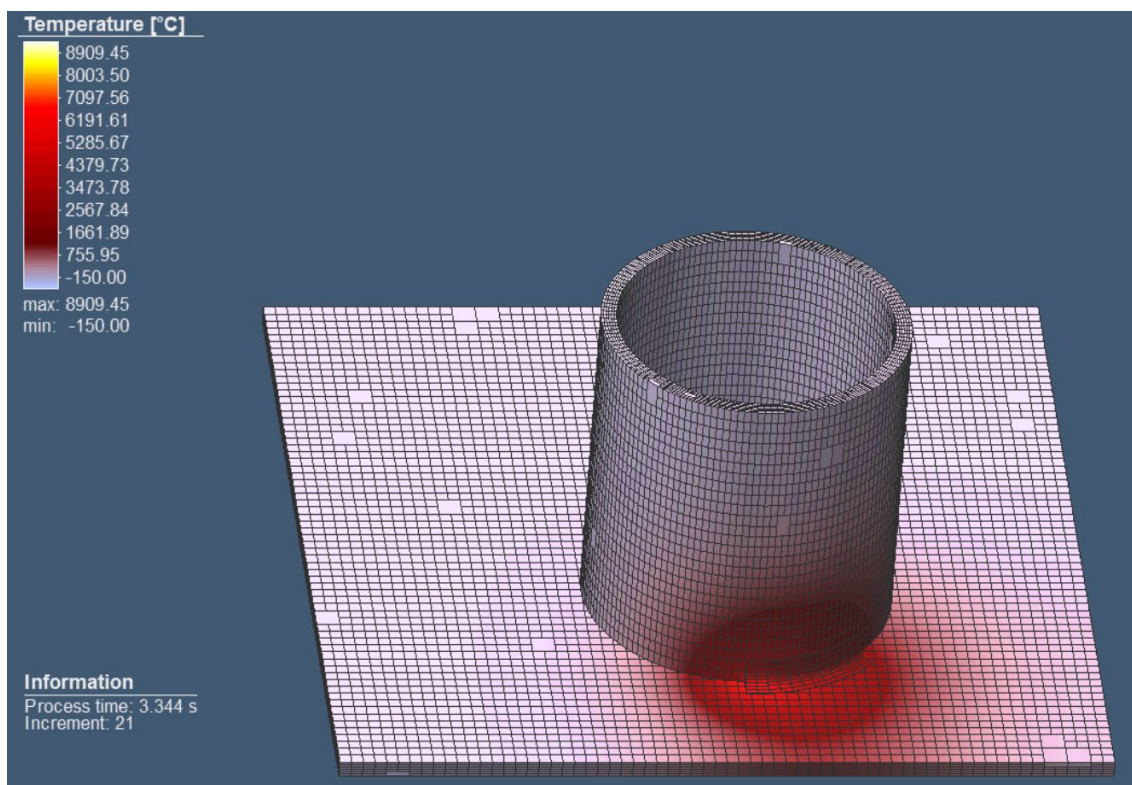


Рисунок 5.4.5.1 – Час 3с від початку зварювання

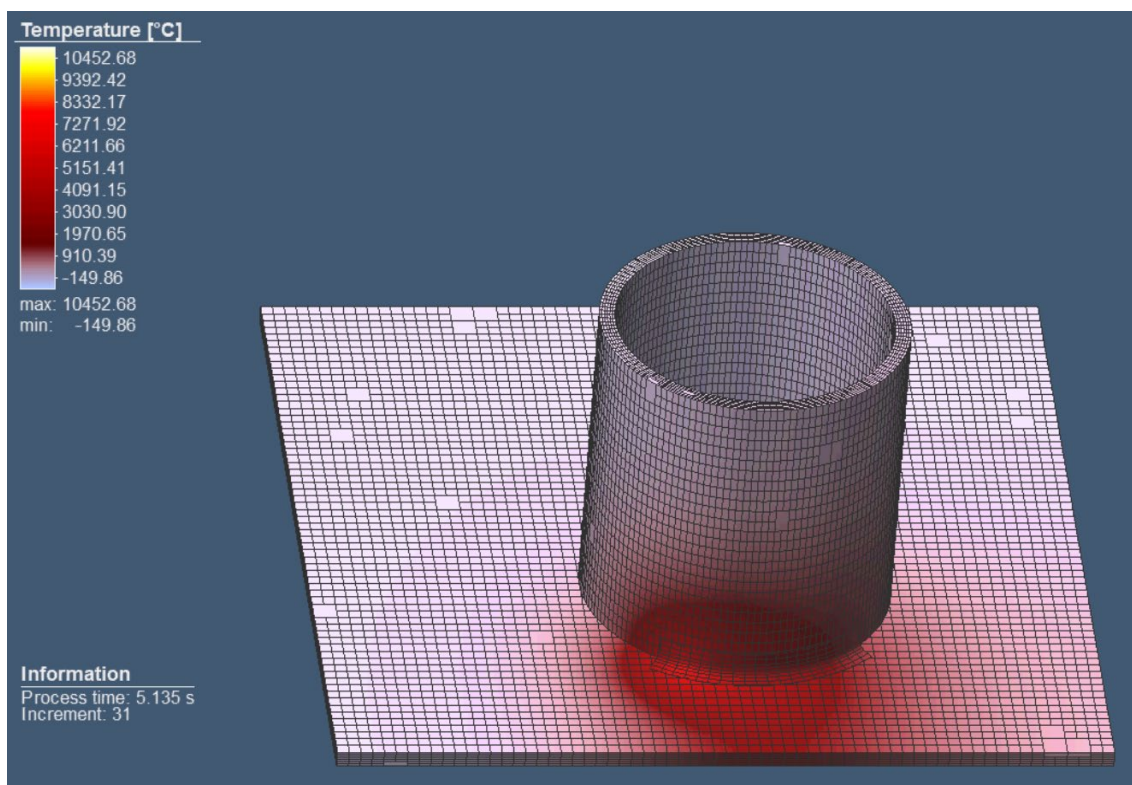


Рисунок 5.4.5.2 -Час 5с від початку зварювання

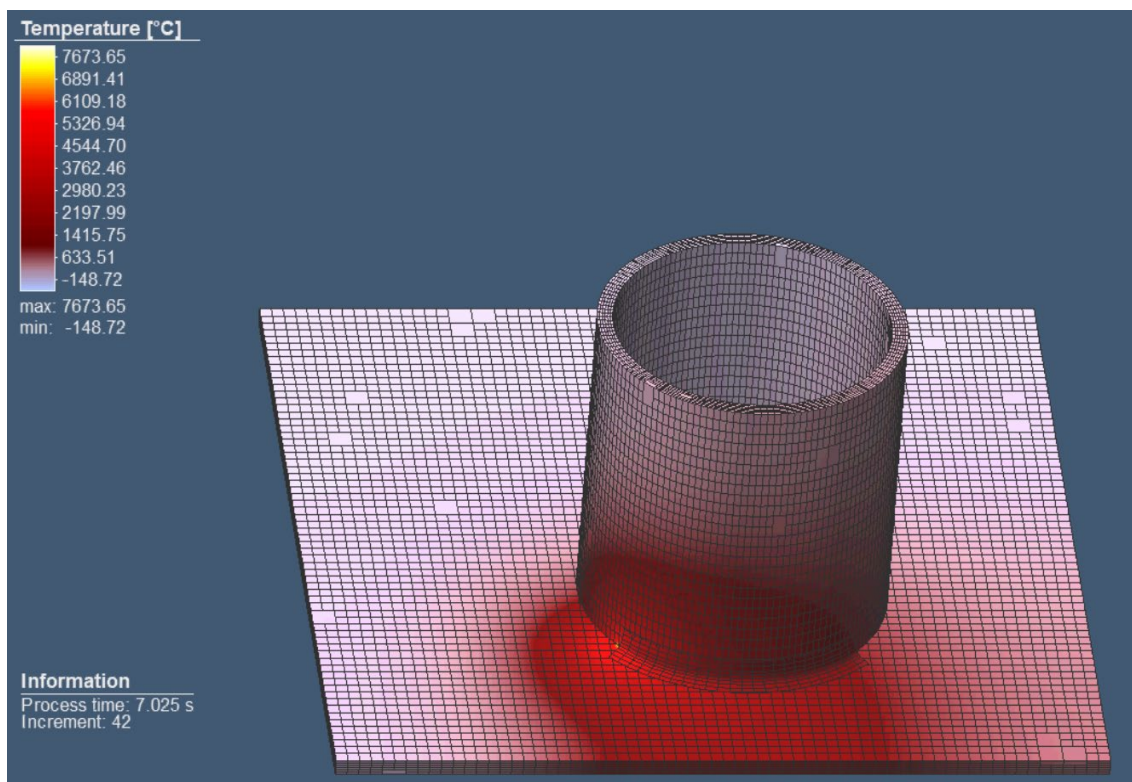


Рисунок 5.4.5.3 – Час 7с від початку зварювання

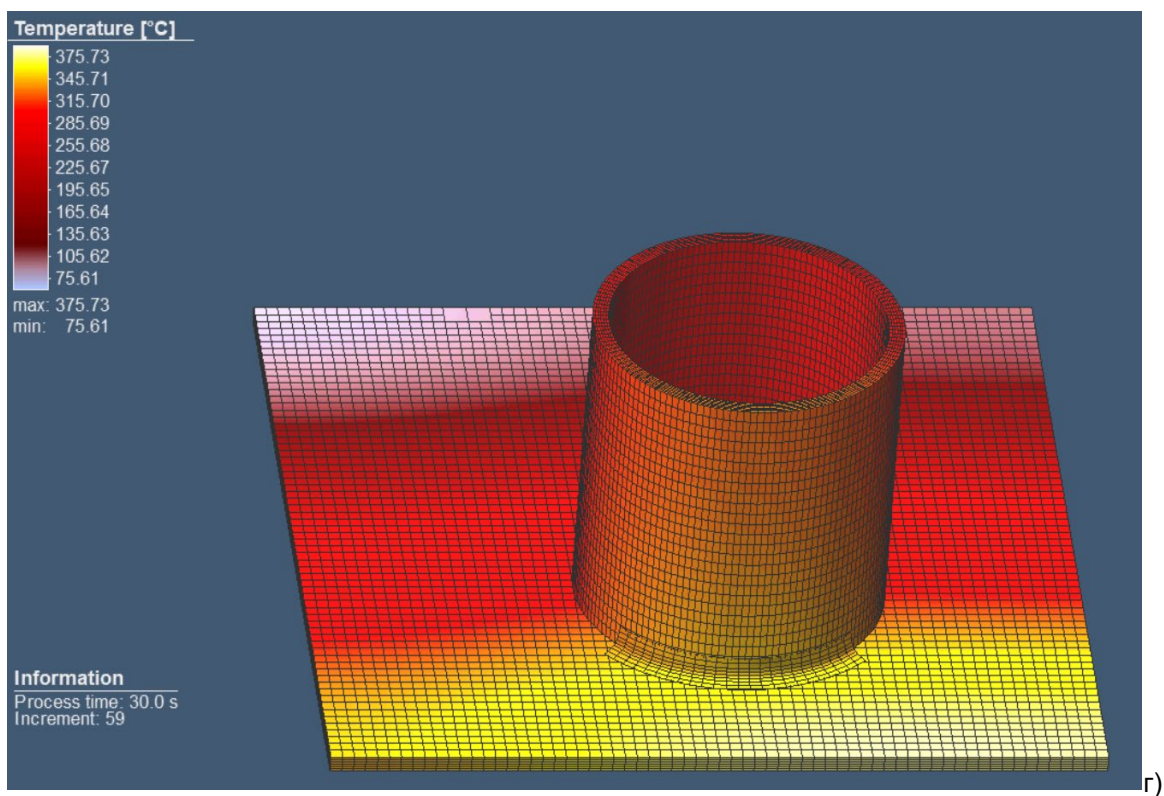


Рисунок 5.4.5.4 – Час 30с від початку зварювання

5.5. Моделювання високотемпературного паяння

5.5.1. Моделювання паяння на Марсі

Зразки, які доставили на Землю після проведених експериментів в космосі показали, що в умовах мікрогравітації ніяких змін в атомній структурі металу не відбувається. Зміни зафіксовані на макроскопічному рівні, такі як: маса, теплове розподілення, структура і принцип росту кристалів і т.д. В умовах невагомості стикові зазори наповнюються рідким припоєм рівномірно, відмінно від земних умов, без провисань. “Змочування паяного матеріалу рідким припоєм і розтікання останнього за основним матеріалом відбувається під дією капілярних сил і міжатомних сил зчеплення: диспергуючі частинки основного матеріалу в розплаві припою розподіляються рівномірно, за обсягом і в шві відзначається схильність до дрібнозернистих будов, можливо отримання та скруток провідників, проведення ремонту отворів шляхом припаювання латок”[17]. Характерним показником для паяння в космосі є відсутність питомої ваги у припою через занадто мале прискорення, відсутність конвекції у шві через низьку залишкову напругу, прагнення рідкого припою до сферичної форми. В швах від паяння відсутній гелій, водень та атомарний азот з киснем. Радіус галтельної ділянки паяного шва зменшується: припій набуває форми краплі з плескатою вершиною. Паяння в космосі потребує мінімальних зазорів. У паяних з'єднаннях спостерігається менше дефектів, пов'язаних із усадкою сплавів; шви менш окислені.

Далі будуть наведені приклади, для аналізу, високотемпературної паяння в космосі та модель змодельована для земних умов.

На (рис.5.5.1) високотемпературне паяння на Марсі відбувається дуже швидко(приблизно 1 секунда) , за цей час термічному впливу встигає піддатись лише зона навколо гарячої ванни, шов піддається низькій температурі тому для реакції на тепло потрібен час , а вже після закінчення процесу йде дуже швидке розподілення тепла по всій конструкції. Аналізуючи дане моделювання потрібно не забувати враховувати програмні умовності, що до позначення кольорами, так на першому скріншоті жовтим кольором позначена саме точка розплавлення/паяння

(5000°C-6000°C), а далі жовтий колір це зона з найбільш нагрітою ділянкою в процесі розподілу ЗТВ (+350°C-(-11°C).

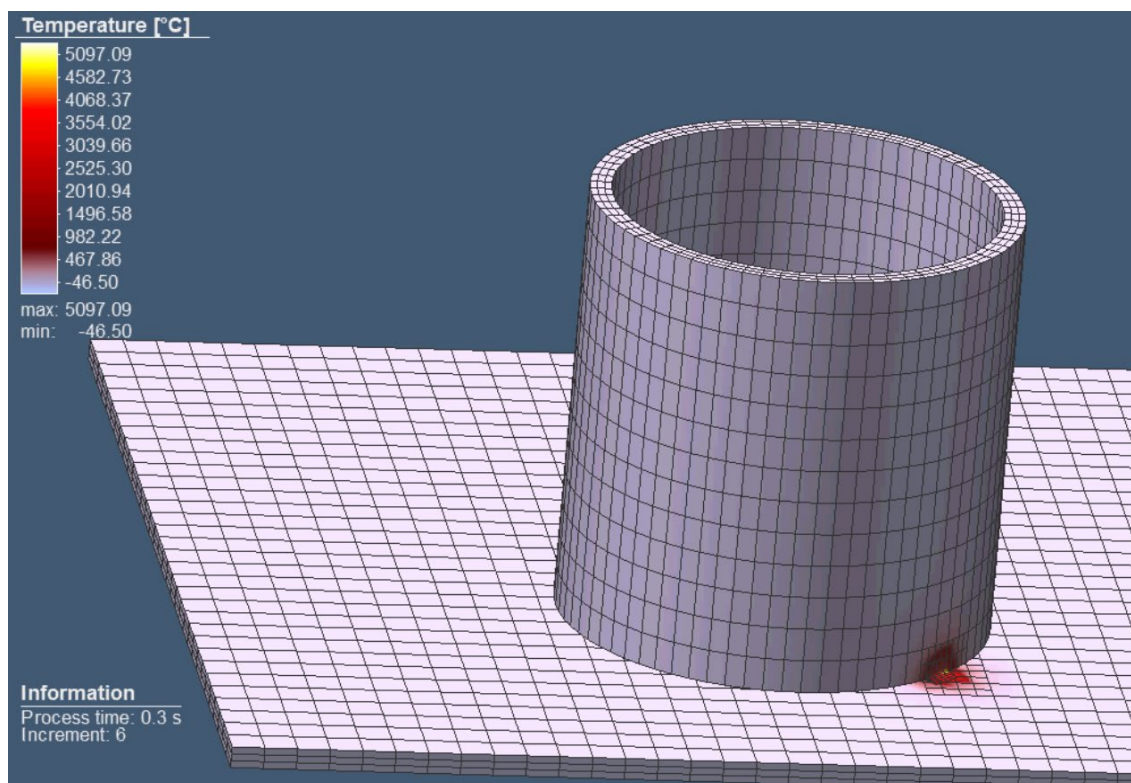


Рисунок 5.5.1.1 – Час 0,3с від початку паяння

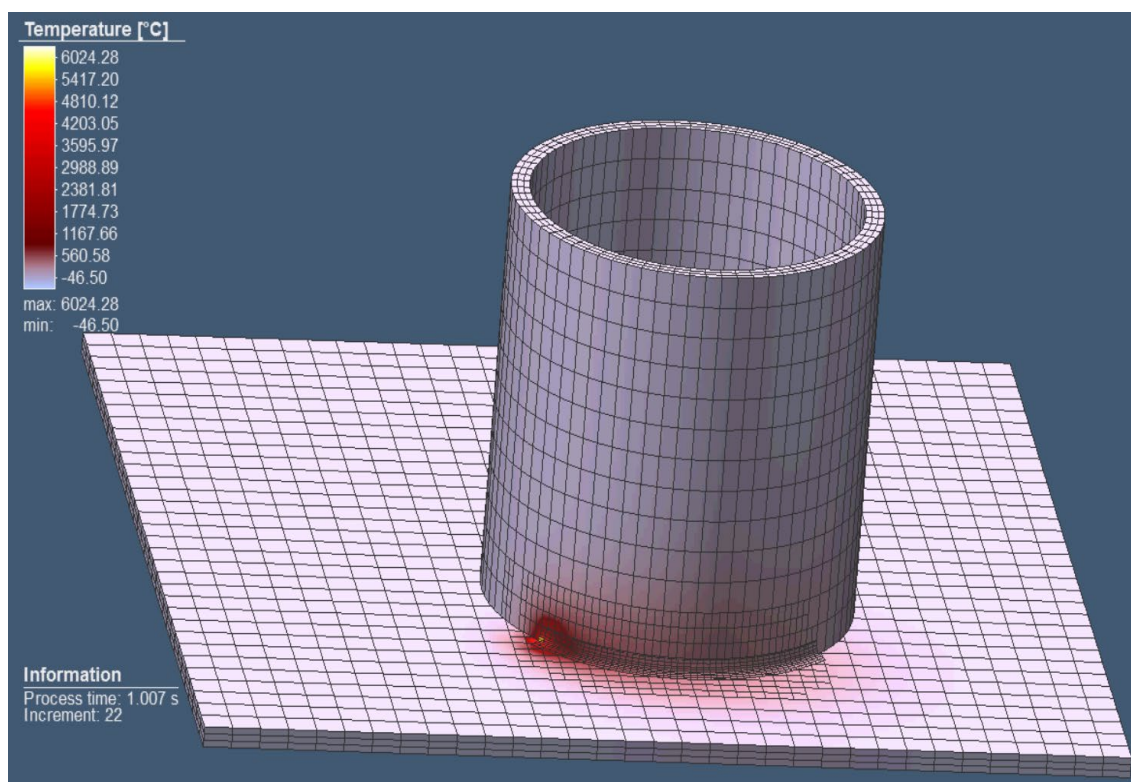


Рисунок 5.5.1.2 – Час 1с від початку паяння

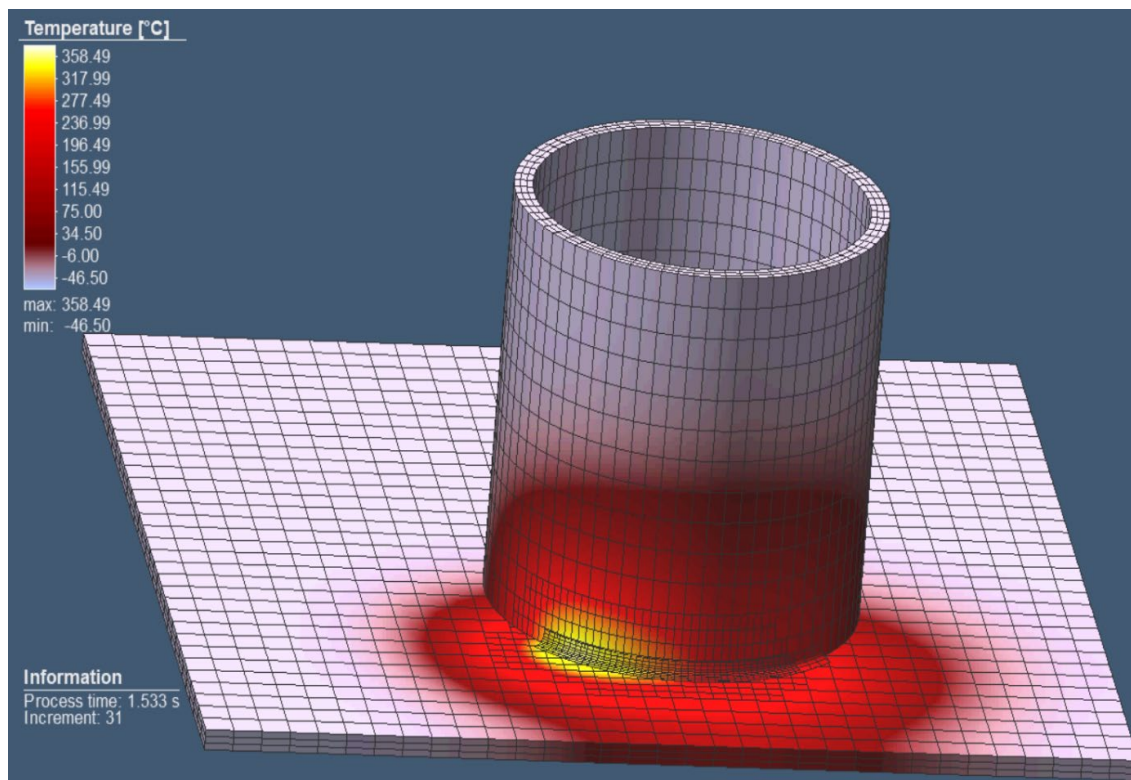


Рисунок 5.5.1.3 – Час 1,5с від початку паяння

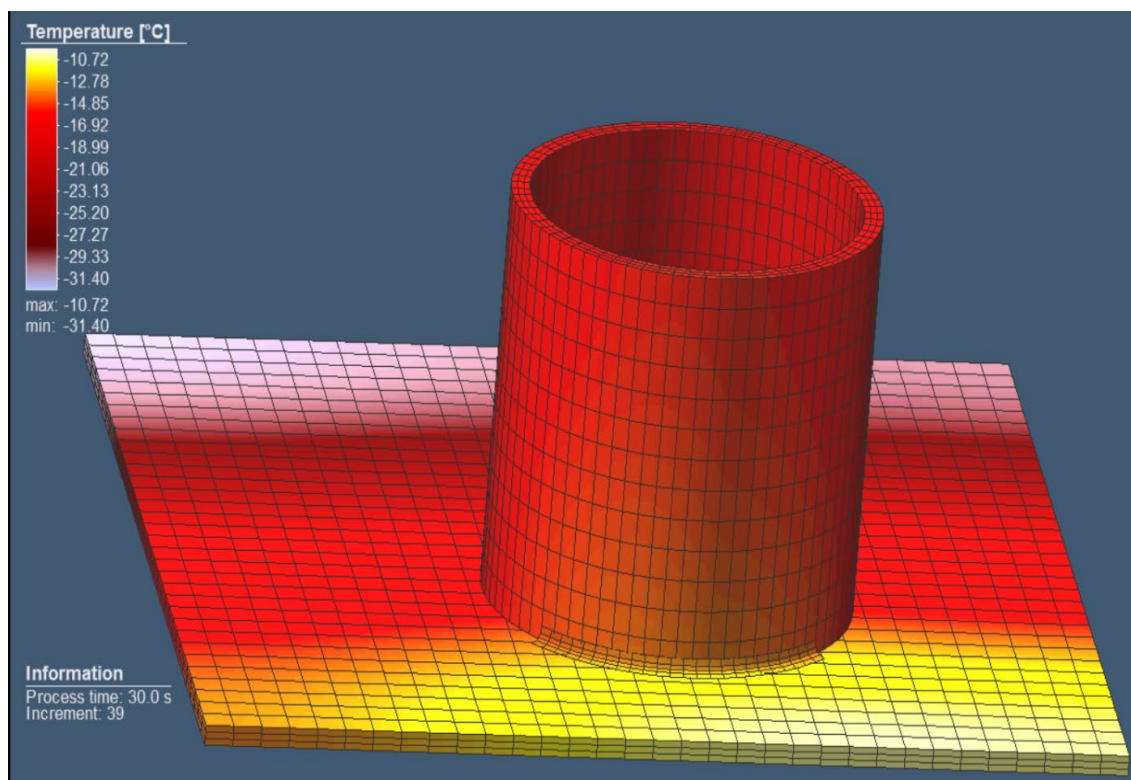


Рисунок 5.5.1.4 – Час 30с від початку паяння

5.5.2. Моделювання паяння на Місяці

На рис. 5.5.2 показаний приклад, наскільки відмінною є реакція на один і той самий процес в різних умовах. Сумарний вплив зовнішніх характеристик призводить до того, що температурний вплив на навколошовну зону в момент поки не завершена паяння набагато більший, є характерний червоний “хвіст” за точкою плавлення.

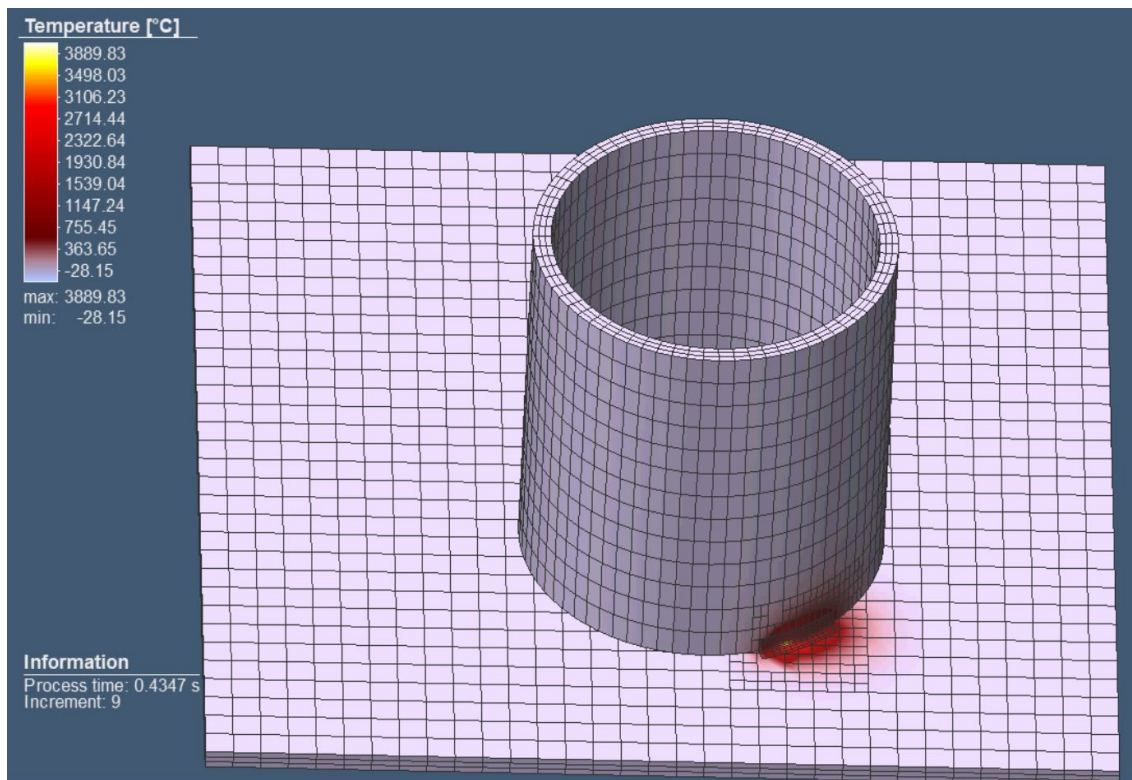


Рисунок 5.5.2.1 – Час 0,5с від початку паяння

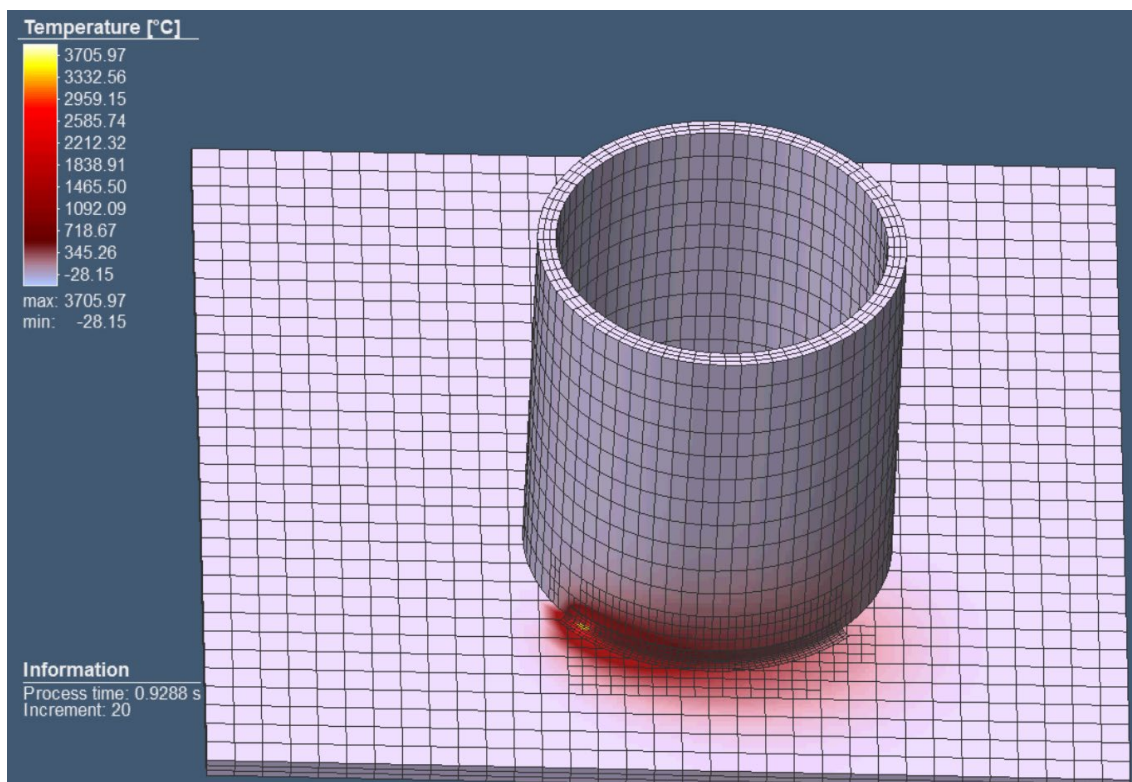


Рисунок 5.5.2.2 – Час 0,9с від початку паяння

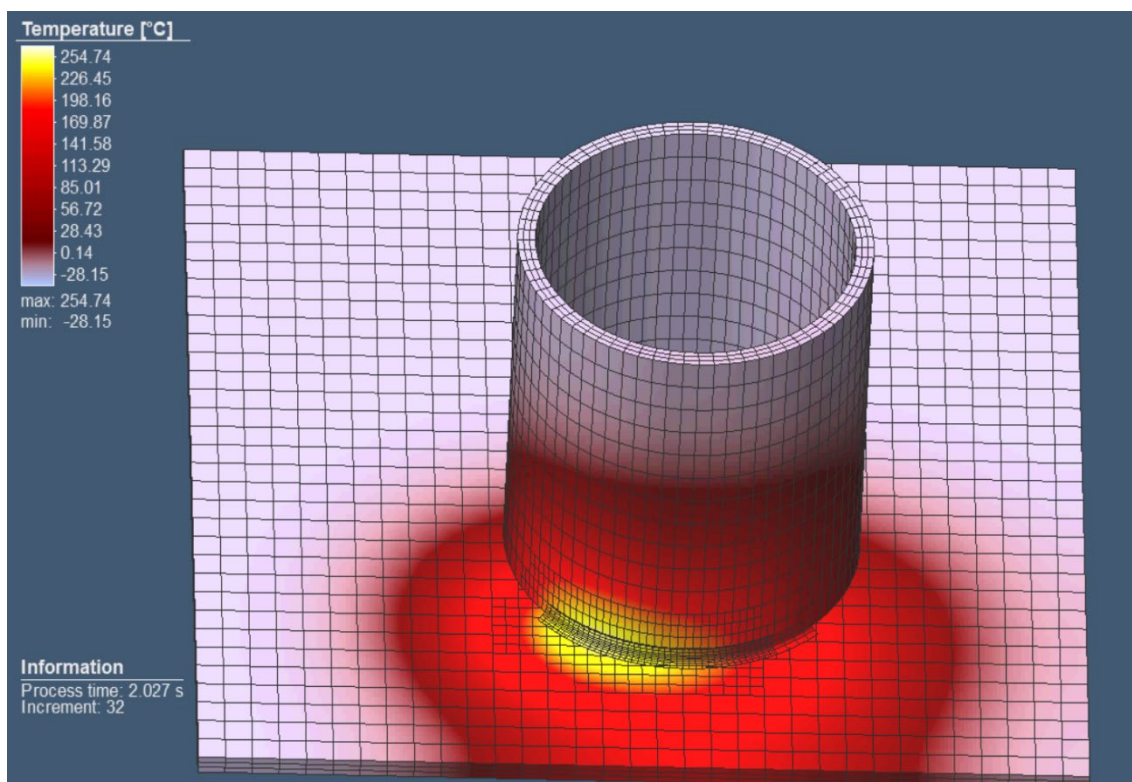


Рисунок 5.5.2.3 – Час 2с від початку паяння

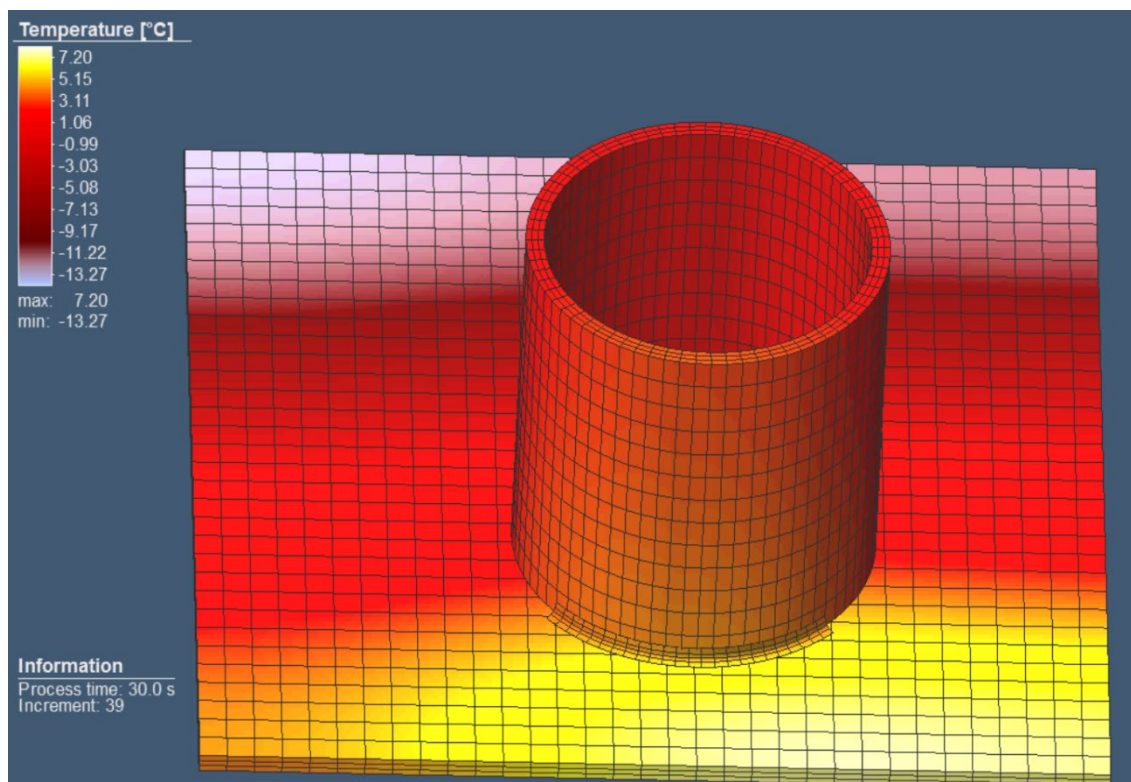


Рисунок 5.5.2.4 – Час 30с від початку паяння

На цих скріншотах можна побачити взаємозв'язок між тим як розходить ся тепло після закінчення паяння відповідно до процесів, які відбувались під час паяння.

5.5.3.Моделювання високотемпературної паяння в умовах відкритого космосу, на орбітальній станції

Не дивлячись на те, що під час паяння шов мав високі показники тепла, розподіл температур має свою структуру, відмінну від аналогічних прикладів Марса і Місяця. Нас рис.5.5.3.зображене моделювання високотемпературної паяння в умовах відкритого космосу на орбітальній станції.

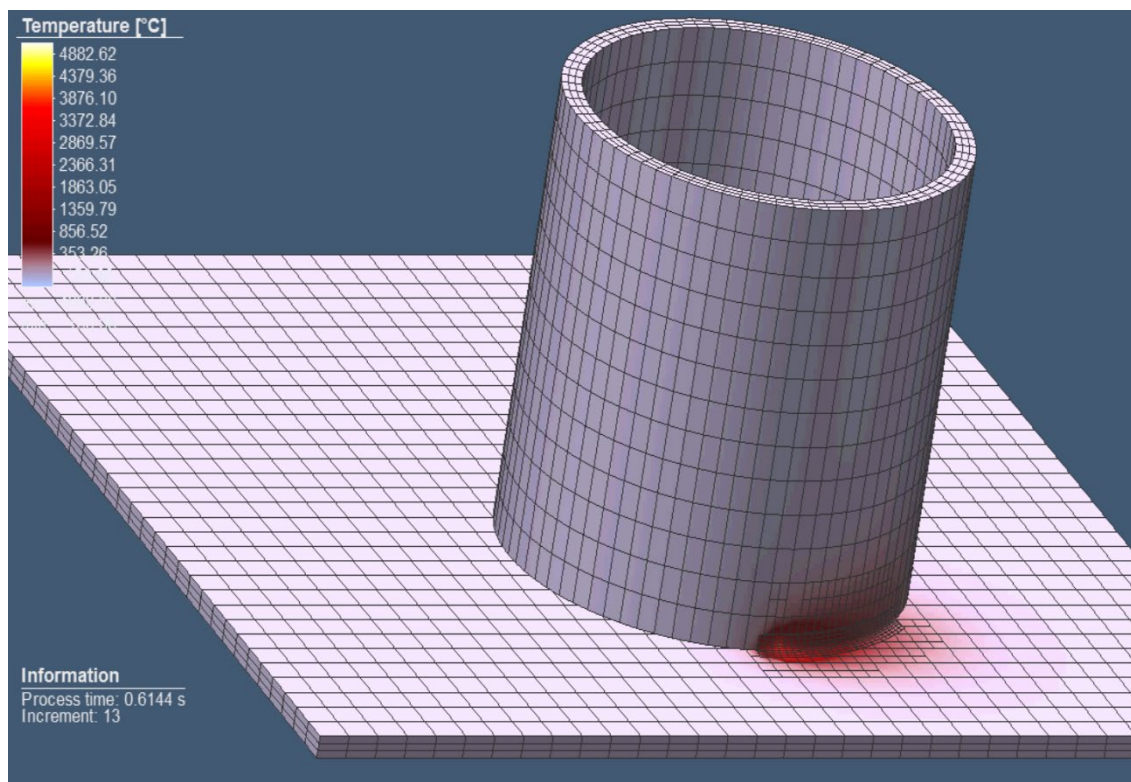


Рисунок 5.5.3.1 – Час 0,6с від початку паяння

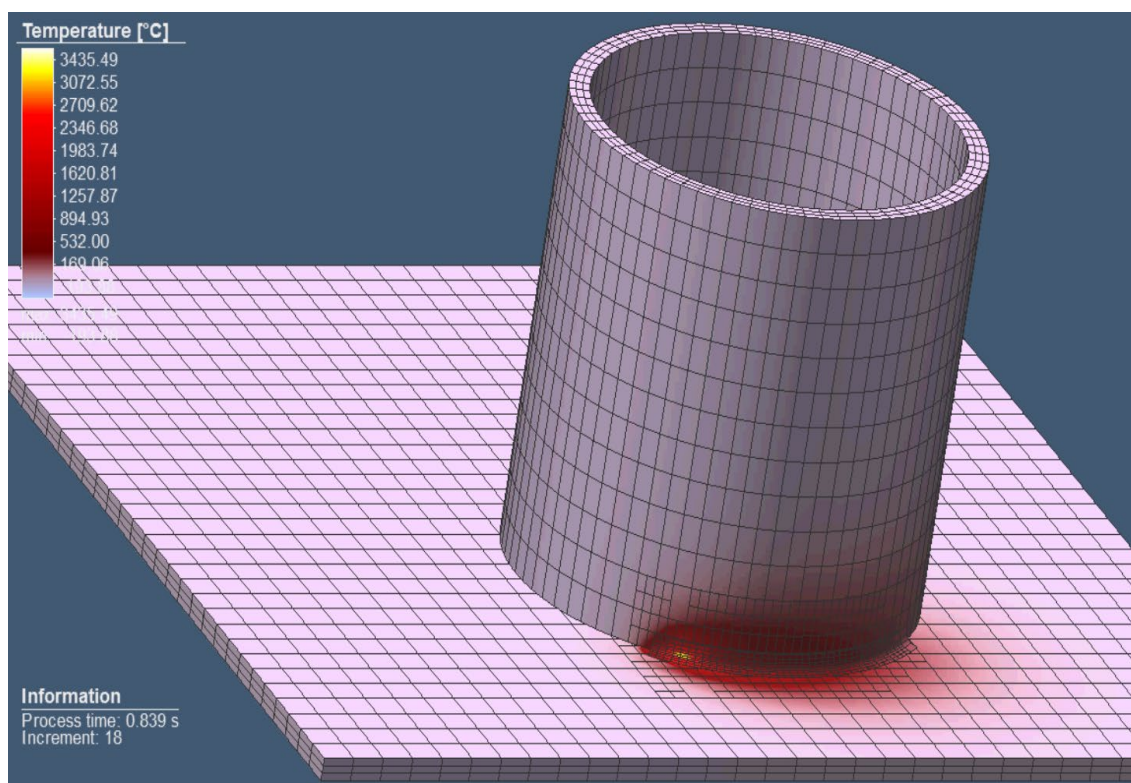


Рисунок 5.5.3.2 – Час 0,8с від початку паяння

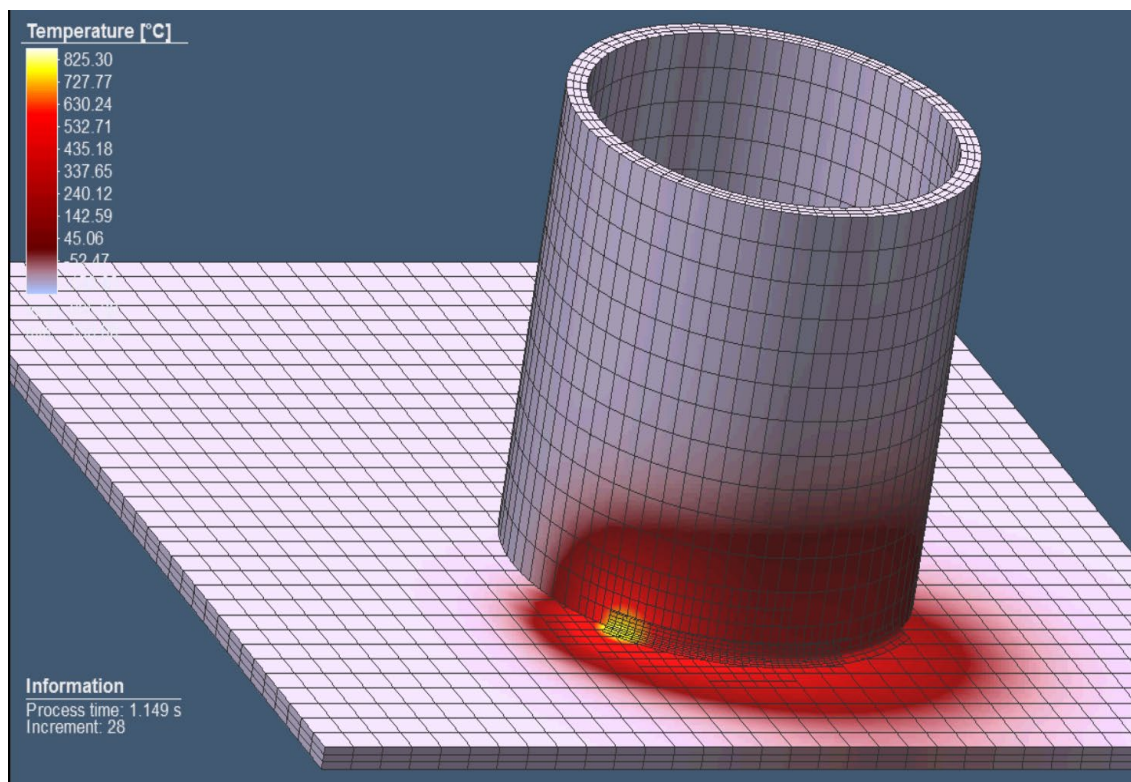


Рисунок 5.5.3.3 – Час 1,1с від початку паяння

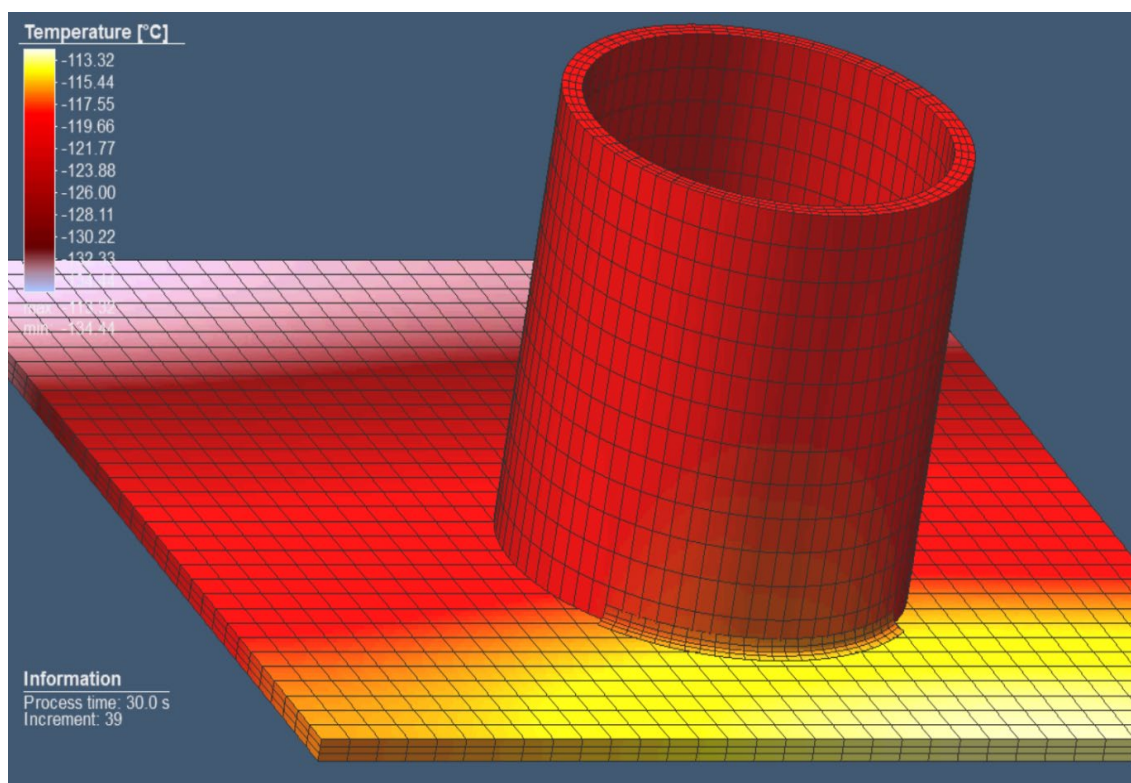


Рисунок 5.5.3.4 – Час 30с від початку паяння

5.5.4. Моделювання високотемпературної паяння в умовах Землі

Моделювання процесу на поверхні Землі є аналогом до ідеального процесу паяння для подальшого урахування відхилень в не земних умовах і зміни їх.

На Рис.5.5.4. зображене моделювання високотемпературної паяння на Землі.

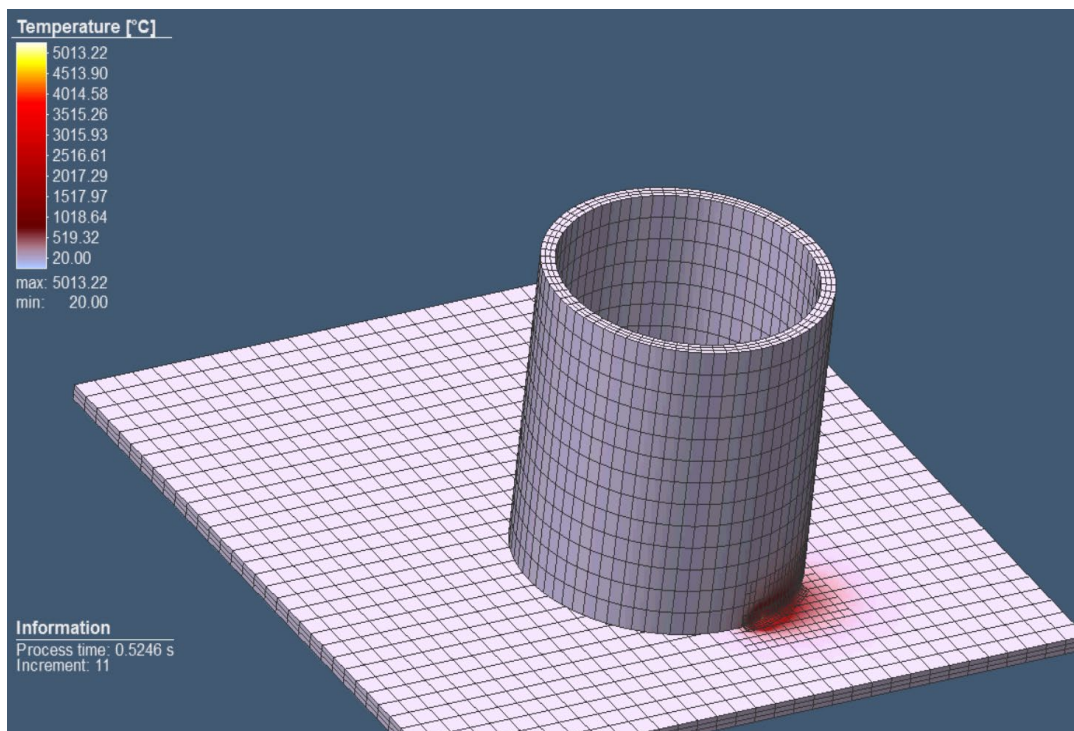


Рисунок 5.5.4.1 – Час 0,5с від початку паяння

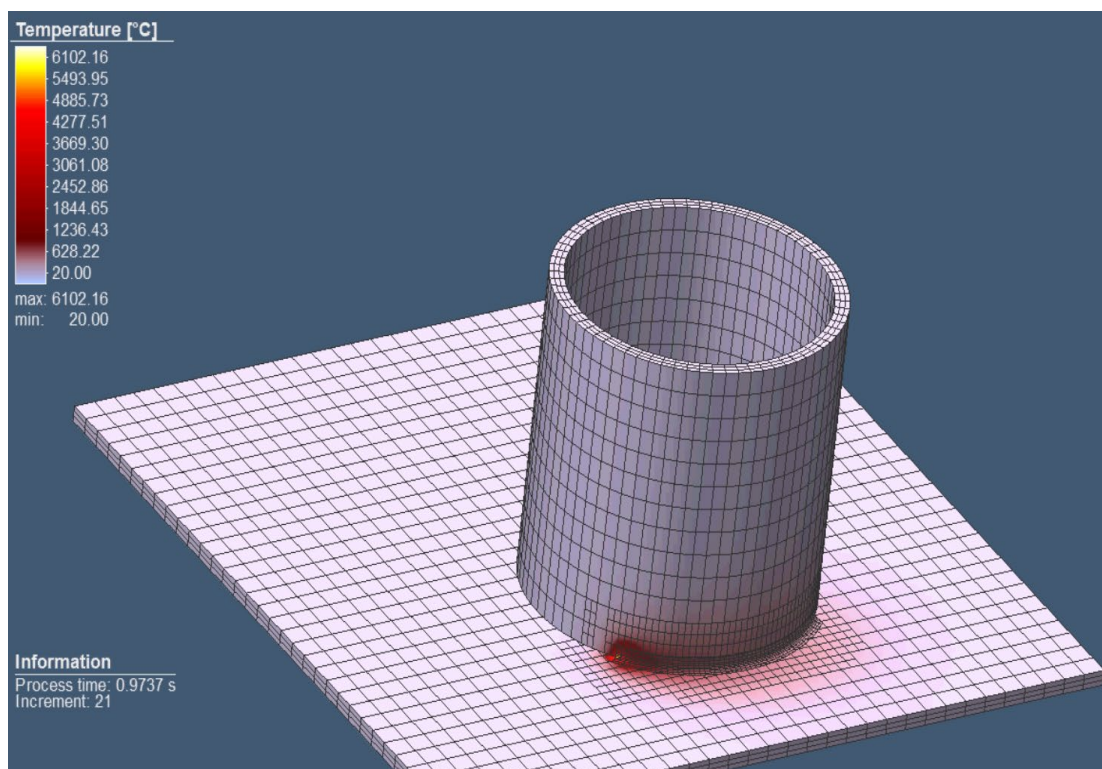


Рисунок 5.5.4.2. – Час 0,9с від початку паяння

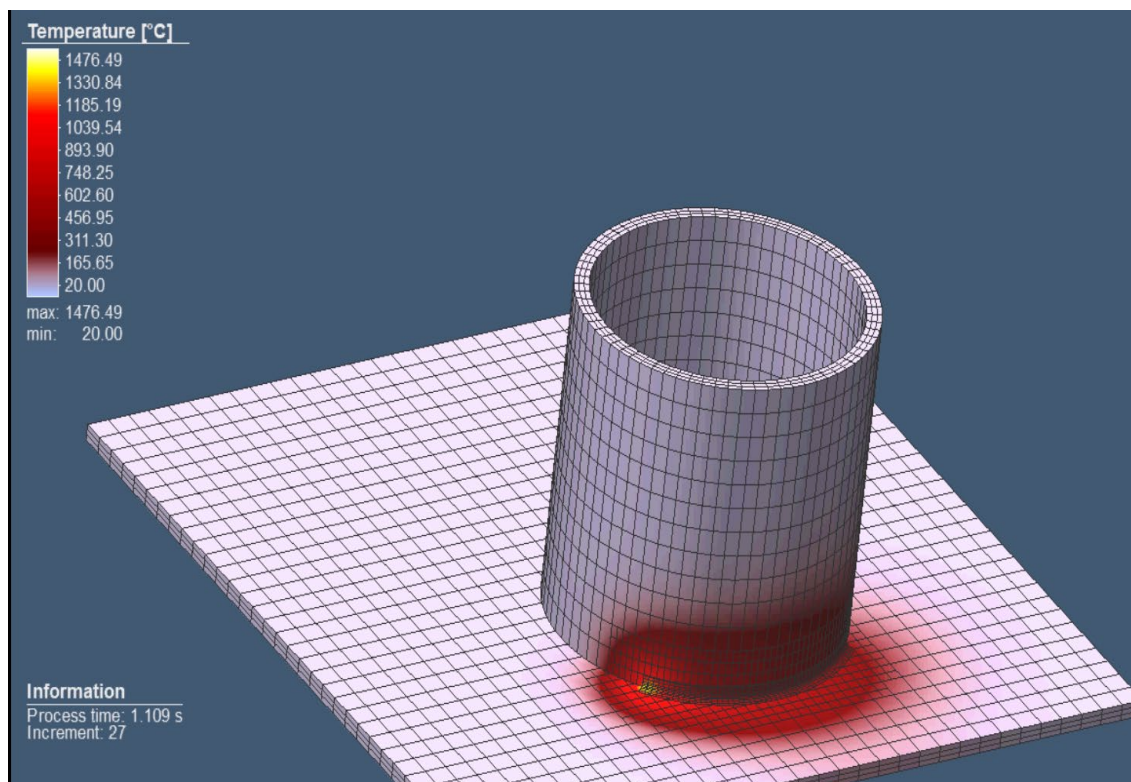


Рисунок 5.5.4.3 – Час 1,1с від початку паяння

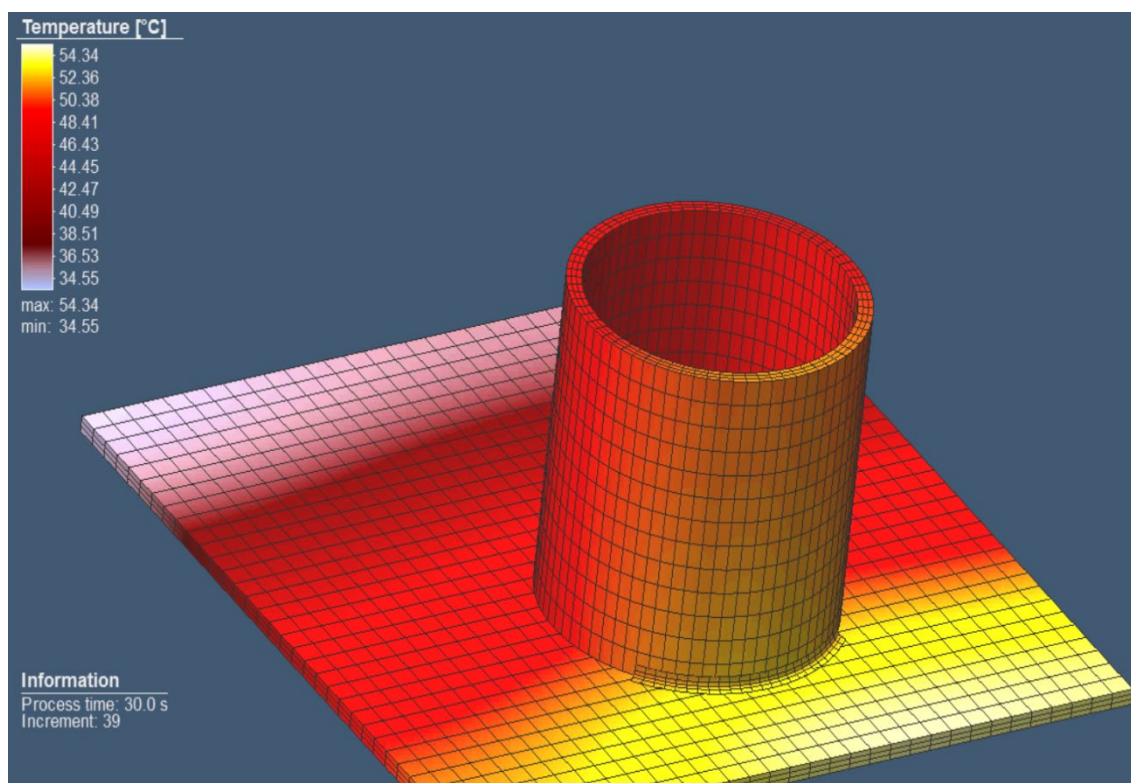


Рисунок 5.5.4.4 – Час 30с від початку паяння

6 АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ У ПОЗАЗЕМНИХ УМОВАХ

Зварювання у космосі надає людству нову нішу вивчення. Всі відомі на даний момент способи зварювання були придумані на поверхні Землі і відносно її характеристик, тому на даний момент космічні роботи можуть проводитись лише адаптуючи маніпуляції під неземні умови. Та сама доля чекає на джерела живлення, які будуть використовуватись в аналогічних умовах. Що до них, бензинові чи дизельні двигуни створюють труднощі на орбіті, а портативні генератори пропускають через себе навколишнє повітря для охолодження, що не можливо в космосі. Подальший розвиток і вивчення, можливо, приведе до нових способів зварювання можливих тільки в космосі або тільки в середині судна, що знаходиться у відкритому космосі.

Із очевидних варіантів ідеальним варіантом для подальшого розвитку можна подумати, що є електронно-променеве зварювання, яке в земних умовах відбувається у вакуумній камері але ж при врахуванні зварювально-ремонтних пристроїв враховується його універсальність, а для зварювання в середині судна цей варіант не підходить.

Вченими NASA ще в 1989 році було рекомендовано лазерне променеве зварювання. При цьому зварюванні можна точно контролювати температуру зварювальної ванни, а це є одним із важливіших процесів для утворення якісного зварного шву, без надмірного наплавлення або забрудненню-погіршенню характеристик, металу.

Такі установки як Boeing Gore Weld Tool є передовими технологіями для зварювання тертям. Що зараз набирає все більшою популярності у застосуванні, але питання габаритності установок, не гнучкості в позиціюванні є ще відкритим і дуже актуальним. Цей вид зварювання дуже зручний у своїй автоматизації, а це дуже важливим показником, оскільки для дуже важливих установок повторювальність результатів є залогом успіху. Також при зварюванні тертям не виникають проблеми змішання декількох не аналогічних матеріалів, а через те що

термічного впливу майже не має це зберігає характеристики і властивості матеріалу. Спочатку ця техніка зварювання у космосі була розроблена для алюмінію і його сплавів, наприклад, 2195 і 2219. Добре себе проявляє із так званими “незварювальними” сплавами серії 7000. Якщо піддати цей матеріал термічному впливу його характеристики будуть жахливі. В авіації використовують серію 7000, але донедавна був придатний лише для клепання [11].

Також є актуальним питання корозії та іржавіння металу. Якщо розглядати умови в яких перебувають космічні судна можна побачити, що атмосфера Землі містить кисень навіть на висоті 700 км, до прикладу МКС обертаються на орбіті на висоті 400 км. На такій висоті, кисень існує не в звичному для нас газоподібному стані, а у вигляді окремих атомів, а не молекул O_2 і це призводить до його більшої реакційної здатності. Алюміній і нержавіюча сталь утворює захисний оксидний шар і не піддаються корозії але срібло і залізо будуть швидко піддаватись корозії перебуваючи на низькій орбіті. Однак, якщо брати умови глибокого космосу, то в таких умовах через нестачу кисню корозія не виникає [12].

Особливості зварювання є важливим фактором при аналізуванні застосування Земного зварювання в відкритому космосі. На Землі під час зварювання плавким електродом розплавлений метал з електрода попадає у розплавлену ванну у вигляді каплі, оскільки капля і ванна мають рідкий стан це робить легким процес перемішування металів і подальшого закріплення зварного шва. При нормальних умовах її переміщення відбувається рівномірно, маючи більшу щільність вона стікає вниз, цим же переміщує місце пікової (гарячої) температури в каплі завдяки своїй плавучості. У мікрогравітації плавучість не працює і більш щільна і холодна поверхня нікуди не зникає. Натомість, набагато слабкіший поверхневий натяг є основним рушієм руху. Більш холодна частина поверхні має вищий поверхневий натяг, який тягне холодну область до вершини краплі, створюючи холодний сегмент з високим температурним градієнтом. Це є більш повільним процесом з меншим змішуванням і може призвести до більшої мікроструктури зварного шва з відрізненими властивостями.

Що до електронно - променевого зварювання то воно має високу

ефективність понад 90%, це означає що більше 90% введеної електроенергії передається зварювальному матеріалу у вигляді тепла для зварювання. Це важливо не тільки тому, що це економить електроенергію але й тому що більше використаного тепла, а значить менше зовнішнього впливу з яким треба боротися.

- зварювання можливе лише в умовах відкритого космосу, проводити ремонтні роботи в середині космічних кораблів або орбітальних станцій не можливо.

- головною проблемою є велика кількість високоенергетичного рентгенівського випромінювання, що випромінюється під час зварювання. Рентгенівські промені дуже шкідливі для астронавтів. Це головна причина, чому потужність і напруга були такими низькими для ручних зварників у проведених дослідженнях. Ще один значний недолік-вузький електронний промінь, тому зварювання повинно мати максимальну точність, а це дуже важко зробити, якщо носити герметичний скафандр і важко згинаються рукавиці(в сучасних варіантах костюмів цю проблему вирішили, на скільки це є можливо).

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

7.1. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ).

Аналізуючи небезпечні фактори при зварювальних роботах у відкритому космосі можна побачити, що вони розділяються на дві групи: небезпечні ситуації пов'язані з перебуванням космонавта за територію космічного судна або непередбачувані ситуації в середині судна; небезпека, що з'являється при виконанні ремонтних робіт. Також потрібно розділяти роботи на спосіб їх виконання. Якщо говорити про зварювання на поверхні Місяця або Марса, то тіло космонавта перебуває у відносно стабільному положенні - стоїть на поверхні. Інша справа зварювання в умовах гравітації - ремонт орбітальних станцій або поверхневий ремонт космічних ракет.

Небезпека праці у відкритому космосі поза космічним судном:

Космічне сміття. Середня висота польоту космічних кораблів, без автоматизованого керування – 300 км від поверхні Землі. Через космічну швидкість, яка складає близько 7,7 км/с будь-яка перешкода, навіть космічна піщинка, є загрозою для космонавтів. З урахуванням тенденції збільшення орбітального сміття, зростає ризик отримання пошкоджень або навіть смертельної небезпеки, через пошкодження елементів життєзабезпечення.

Моделювання польоту. Позаземні умови мають значно відрізняє характеристику від земної, від температури до гравітації. Для ідеальної підготовки перед запуском, на останніх етапах підготовки проводиться моделювання. Суть моделювання в тому, щоб уникнути аварійних ситуацій космосі і проробити всі ризикові моменти на поверхні Землі. Не завжди ці експерименти відповідають дійсності і проходять без ускладнень. Цей фактор є більш небезпечний з психологічної сторони підготовки космонавтів. Оскільки кожен член екіпажу відповідає за дуже великий обсяг знань і вони повинні бути взаємозамінні у випадку надзвичайної ситуації на борту. Окрім відповідальності по основній місії

польоту є дуже багато факторів, які можуть піти не по плану і це також додає психологічний натиск на космонавтів.

Відрив від корабля. При покиданні судна і виході у відкритий космос є ризик відірватись від корабля. Якщо системи прикріплення дали збій або просто відірвались це може призвести до відсторонення космонавта на значну відстань, що призведе до смерті внаслідок закінчення суміші для дихання.

Пошкодження обмундирування космонавта. У будь-якому випадку, розгерметизація скафандра є небезпекою для життя космонавта, якщо вчасно не повернутись на корабель [13].

Підсумовуючи ці фактори можна дійти до висновку, що основним ризиком є загроза життю космонавта через розгерметизацію скафандра внаслідок його пошкодження. Всі робочі маніпуляції повинні буди заздалегідь прораховані і виконуватись професіоналом у повній робочій готовності, враховуючи всі людські потреби (сон, харчування, відсутність психологічної нестабільності). Не правильно виставленні налаштування на зварювальному апараті можуть привести не тільки до погіршення результатів роботи (прилипання, якість зварного з'єднання) але і до потенційно небезпечних моментів. Наприклад, розплавлена капля відірветься від електроду і не встигне зафіксуватись на деталі, це ризик пошкодження скафандру, що може призвести до його розгерметизації.

При зварюванні плавким електродом у відкритому космосі враховують такі шкідливі та небезпечні фактори: зварювання супроводжується яскравим світлом і невидимими ультрафіолетовими та інфрачервоними променями. При розробці спеціального одягу для виконання зварювальних робіт у нестандартних умовах обов'язковим є захист очей та укріплений матеріал для уникнення пропалювання герметичного костюму. Опромінення дугою шкіри відмінно від земних умов не загрожує. Фізична втомлюваність через механічні дії [14].

Дотримання правил охорони праці є основою забезпечення якісного результату і безпеки космонавта-зварювальника для всіх ремонтних робіт не залежно від способу заварювання. Вдихання шкідливих аерозолів і газів загрожує у випадку ремонтних робіт, які проводять в середині космічного судна або

орбітальної станції. У такому випадку потрібно підібрати більш дієвий і безпечний метод зварювання.

7.2. Забезпечення допомоги в разі виникнення космічної аварії.

У 1968 році 22 квітня було підписано “угоду про порятунок космонавтів, повернення космонавтів та повернення об'єктів, запущених у космічний простір”, учасниками цієї угоди виступали 198 держав, Україна була в складі СРСР, як одна із учасниць. Далі наведений текст угоди, де розписуються зобов'язання та вимоги учасників.

“Сторони, відзначаючи важливе значення договору про принципи діяльності держав з дослідження та використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла, що закликав надавати всіляку допомогу космонавтам у разі аварії, лиха або вимушеної посадки, негайно повертати в безпеці космонавтів та повертати об'єкти, запущені в космічний простір прагнучи розвивати і надалі конкретизувати ці зобов'язання, бажаючи сприяти міжнародному співробітництву у мирному дослідженні та використанні космічного простору, керуючись почуттями гуманності, погодилися про наступне:

Кожна сторона, яка отримує відомості або виявляє, що екіпаж космічного корабля зазнав аварії або перебуває в стані лиха, або здійснив вимушену або ненавмисну посадку на території, що знаходиться під її юрисдикцією, або у відкритому морі, або в будь-якому іншому місці, яке знаходиться під юрисдикцією будь-якої держави, негайно:

а) інформує владу, яка здійснила запуск, або, якщо вона не може упізнати і негайно інформувати про це владу, яка здійснила запуск, негайно повідомляє про це для загальної відомості за допомогою всіх наявних у її розпорядженні відповідних засобів зв'язку;

б) інформує Генерального секретаря Організації Об'єднаних Націй, який повинен негайно поширити цю інформацію за допомогою всіх наявних у своєму розпорядженні відповідних засобів зв'язку.

Якщо внаслідок аварії, лиха, вимушеної або ненавмисної посадки екіпаж космічного корабля приземлиться на території, що знаходиться під юрисдикцією сторони, вона негайно вживе всіх можливих заходів для його рятування та надання йому необхідної допомоги. Вона інформуватиме владу, яка здійснила запуск, а також Генерального секретаря Організації Об'єднаних Націй про вжиті нею заходи і про результати, що досягаються. Якщо допомога влади, яка здійснила запуск, допомогла б забезпечити швидке рятування або значною мірою сприяла б ефективності операцій з пошуків та рятування, влада, яка здійснила запуск, буде співпрацювати з стороною з метою ефективного проведення операцій з пошуків та рятування. Ці операції будуть поставлені під керівництво та контроль сторони, якщо отримані відомості або виявлено, що екіпаж космічного корабля опустився у відкритому морі або в іншому місці, що не перебуває під юрисдикцією будь-якої держави, то сторони, які можуть зробити це, нададуть у разі потреби допомогу у здійсненні операцій з пошуків та рятування такого екіпажу з метою забезпечення його швидкого рятування. Вони інформуватимуть владу, яка здійснила запуск, а також Генерального секретаря Організації Об'єднаних Націй про вжиті ними заходи та про результати, що досягаються.

Якщо в результаті аварії, лиха, вимушеної або ненавмисної посадки екіпаж космічного корабля приземлиться на території, що знаходиться під юрисдикцією сторони, або буде виявлений у відкритому морі або в будь-якому іншому місці, що не знаходиться під юрисдикцією будь-якої держави, він повинен бути в і негайно повернено представникам влади, які здійснили запуск.

1. Кожна сторона, яка отримує відомості або виявляє, що космічний об'єкт або його складові повернулися на Землю на території, що знаходиться під її юрисдикцією, або у відкритому морі, або в будь-якому іншому місці, що не перебуває під юрисдикцією будь-якої держави, інформує владу, яка здійснила запуск, та Генерального секретаря Організації Об'єднаних Націй.

2. Кожна сторона, яка здійснює юрисдикцію над територією, на якій виявлено космічний об'єкт або його складові, на прохання влади, яка здійснила запуск, і за допомогою цієї влади, якщо їх попросять, вживає таких заходів, які вона вважає

практично здійсненними для рятування. цього об'єкта чи його складових частин.

3. На прохання влади, яка здійснила запуск, об'єкти, запуснені в космічний простір, або їх складові, виявлені за межами території влади, що здійснили запуск, повертаються представникам цієї влади, які здійснили запуск, які на вимогу повинні подати до їх повернення. надаються у розпорядження таких представників.

4. Незалежно від пунктів вказаних вище, сторона, яка має підстави вважати, що космічний об'єкт або його складові, виявлені на території, що знаходиться під її юрисдикцією, або врятовані нею в будь-якому іншому місці, є небезпечними або шкідливими. своїм характером може повідомити про це владу, яка здійснила запуск, яка негайно вживає ефективних заходів під керівництвом та контролем згаданої сторони для усунення можливої небезпеки заподіяння шкоди.

5. Витрати, понесені під час виконання зобов'язань щодо виявлення та повернення космічного об'єкта або його складових частин, покриваються владою, яка здійснила запуск.

Для цілей цього документа термін "влада, яка здійснила запуск" відноситься до держави, відповідальної за запуск, або, коли міжнародна міжурядова організація відповідальна за запуск, до цієї міжнародної організації за умови, що ця міжнародна організація заявляє про прийняття нею прав та обов'язків, передбачених вище і що більшість держав-членів цієї організації є учасниками цього договору про принципи діяльності держав з дослідження та використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла.

1. Цей документ буде відкритий для підписання його всіма державами. Будь-яка держава, яка не підпише його до набуття чинності, може приєднатися будь-коли.

2. Цей документ набуває чинності після здачі на зберігання ратифікаційних грамот п'ятьма урядами, включаючи уряди, призначені як уряди-депозитарії.

3. Цей документ буде зареєстрована урядами-депозитаріями відповідно до статі 102 Статуту Організації Об'єднаних Націй.

Будь-яка держава-учасниця може пропонувати поправки. Поправки набувають чинності для кожної держави-учасниці, яка приймає ці поправки, після

прийняття їх більшістю держав-учасниць, а згодом для кожної держави-учасниці, що залишилася, у день прийняття ним цих поправок.

Будь-яка держава-учасниця може повідомити про свій вихід з списку солідарних держав через рік після набуття нею чинності шляхом письмового повідомлення урядів-депозитаріїв. Такий вихід набуває чинності через один рік з дня отримання цього повідомлення.

Угода набула чинності з 03.12.1968. Учасниками Угоди є 198 держав.”[15]

7.3. Спеціальний одяг для астронавтів-зварювальників.

Скафандр-спеціальний одяг для підкорення космічного простору, виконує роль захисту космонавта і забезпечення життєво-необхідними ресурсами, такими , як кисень, зв'язок із судном і тд.

Спеціальний одяг є двох видів, перший використовують під час виходу і відкритий космос, а другий одягають під час перебування в середині космічного корабля під час запуску і вильоту в космос і при повторному проходженні цих зон на зворотньому шляху.

Костюм типу EVA(NASA має термін - Extra-Vehicular Activity, це стан під час виходу у відкритий космос) підготовлений до стикання людського тіла з надто загрозливими факторами . Такими факторами є: радіація, космічне сміття, космічний пил, критичні температури(від -120°C до $+120^{\circ}\text{C}$). Костюм забезпечує астронавта водою та киснем. Ці костюми мають дві основні частини - захисна і забезпечувальна. Скафандр під тиском - одна із складових повного комплекту, має форму людини, основна функцією є захист тіла та забезпечення рухливості тілу. Компоненти цього спецодягу - це охолоджувальний одяг, верхня та нижня частина тулуба і шолом.

Охолоджувальний одяг. Ця частина костюма є першою при збиранні комплекту, виготовлений з еластичного спандексу та трубок для водонепроникності. Він надівається на тіло, всі його частини, окрім голови, рук і ніг. Оскільки вихід у космос триває декілька годин, під цей час потрібно підтримувати стабільну

температуру тіла астронавта, то через трубки в цьому костюмі подається вода потрібної температури, таким чином регулює загальну температуру тіла. Для уникнення конденсату або утворення поту є вентиляційні отвори.

Корсетна верхня частина. Цей одяг є дуже жорстким але одночасно і легким. З'єднує внутрішню частину костюма з системами життєзабезпечення, влаштовані в подальші шари костюму. Має форму сорочки без рукавів, має з'єднання з рукавом(руки і рукавички).

Рукавички. Рукавички оснащені теплопровідними трубками, також, оскільки, ця частина тіла замерзає першою при виході у космос. Їх роблять міцними і рухливими, оскільки пальці потрібні для багато - численних маніпуляцій.

Різнокomпонентні шари. 16 шарів гнучкого матеріалу виконують функції від утриманню кисню до захисту від космічного пилу. Охолоджувальний одяг одягається найближче до тіла-3 шари. Наступний-шар для сечового міхура, він заповнений газом, створює належний тиск для утримання кисню та регуляції дихання. Далі шар для утримання попереднього і правильної форми. Потім підкладка, стійка до розривів. Наступні кілька шарів виконують роль термоса, для підтримання температури костюма. Характерний білий поверхневий шар для відбиття сонячних променів. Вони пошиті за технологією трьох ниток, таким чином відбувається забезпечення водонепроникність, фізичний захист(матеріал аналогічний до матеріалу з якого виготовляють бронежилети), вогнестійкість, тобто підходить і для механічних зварювальних робіт. Можуть мати різнокольорові смужки, вони допомагають відрізнати вихідців у космос.

Система життєзабезпечення.

До спини астронавта прикріплюють рюкзак, в якому знаходяться припаси та необхідне обладнання для стабільної роботи скафандра. У ньому міститься тиск, для дихання і для підтримання тиску у костюмі. Вентилятор циркулює кисень через костюмі через спеціальний елемент відводить вуглекислий газ з костюма. В рюкзаку, також є система для забезпечення електрики для костюма, а також для радіо зв'язку. Вода для охолодження, чиллер для охолодження води, насос для циркулювання води, також знаходяться у рюкзаку.

Зв'язок.

Система зв'язку майже не змінилась з перший польотів у космос. Астронавт під шоломом носив комунікаційний ковпачок, який містить навушники та мікрофони. Цей прилад підключається до радіо-електрики у рюкзаку і підтримує зв'язок з судном

Шолом.

Шолом виготовляють із міцного пластику, оскільки він повинен утримувати внутрішній тиск із зовнішнім. В ньому, також, є система вентиляції для забезпечення кисню. Є захисний шар ззовні, для уникнення ударів або подряпин. Поверхневий шар має сонцезахисний козирок і сонцезахисні штори. Цей шар має спеціальне золоте покриття що виконує роль окулярів. У нових моделях шоломів вводиться система автоматичного підбору і зміни захисних шарів, вони можуть швидко змінюватись в залежності від перепон, які заважають астронавту [11].

На рис.7.1. наведений приклад того як виглядає екіпірований астронавт.

Костюм, другого типу, для перебування космонавтів у середині корабля під час динамічних змін є набагато простішою системою але не менш якісною. Якщо порівнювати ці дві моделі, то шолом легший і має різні розміри, колір оранжевий для помітного пересування космонавтів, також є герметичний але більш рухомий для легкого пересування космонавтів, блискавка для легкого і швидкого одягання костюма, полегшена система управління для створення комфортних умов (температура, відходження вуглекислого газу), рукавички більш зносостійкі.

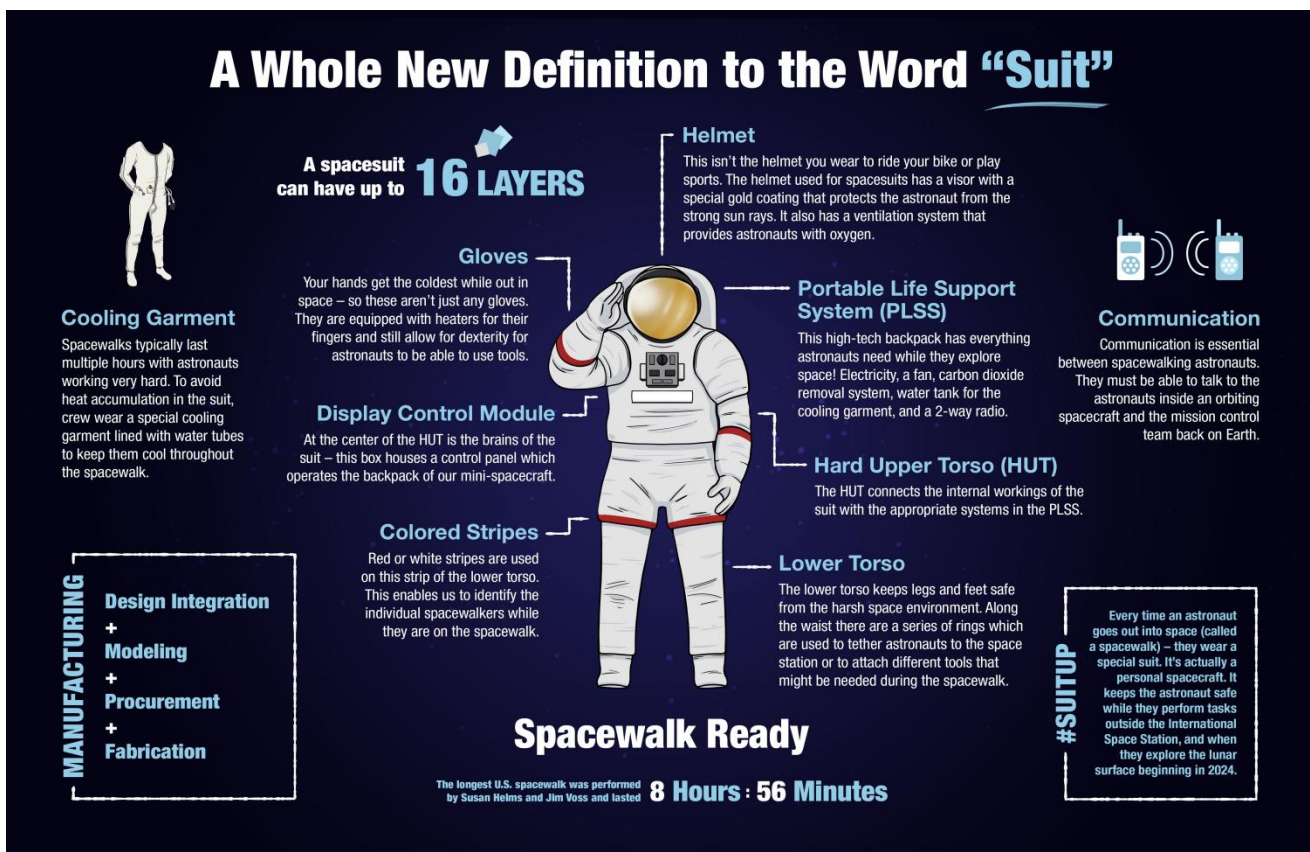


Рисунок 7.1 – Схематичне розташування елементів космічного скафандру типу EVA

Нова версія костюмів типу Orion (рис.7.2) шиється індивідуально під розміри астронавтів. Ці костюми є набагато компактнішими, при цьому їх функціонал може забезпечити потребами космонавта навіть у випадку надзвичайних ситуацій з подачею кисню у судні до 6ти днів(до прильоту рятувної бригади). Ці костюми є мінімальною нормою по вимогам для костюмів за прикладом, яких будуть розробляться костюми для висадки на Марс [16].



Рисунок 7.2 – Фото костюму Orion

Охорона праці для космонавтів-зварників є збірним результатом правил для двох різних професій, тому вивчення, заради вдосконалення, та використання нових правил є вкрай важливим для безпечного проведення космічних місій з використанням зварювальних процесів.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській дисертації було досліджено актуальні питання, які виникають при вивченні теми “Освоєння людиною позаземних умов для майбутньої колонізації. Ремонтні роботи”. Проводився аналіз сучасного стану технологій зварювання для умов відмінних від Землі.

Таким чином, у роботі детально розглянуто та проаналізовано можливі види зварювання в умовах Землі, Марсу, Місяця і орбітальної станції (в середині судна і зовнішні роботи) та різноманітні фізико-хімічні процеси, що відбуваються у зварній конструкції під час маніпуляцій, тощо.

Для отримання відповідей були змодельовані 16 моделей. За допомогою цих моделей можна побачити, як в металевій конструкції протікають різні процеси, такі як: нагрів, розподіл тепла, охолодження, розподіл ефективного стресу. Можливий контроль цифрових значень температур в °C та навантаження в МПа.

Аналізуючи отриманні дані можна зробити такі висновки:

а) технології для ремонту у космосі є адаптовані із земних, за допомогою таких дослідів можливо винайти нові унікальні пристрої, які будуть працювати лише в умовах відкритого космічного простору, без додаткової адаптації;

б) комп’ютерне моделювання є одним із основних етапів вдалого конструювання, воно дає можливість не тільки детально вивчити проекти але і заощаджує кошти на досліді, оскільки комп’ютерне середовище повністю моделює досліджуване.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Колонізація космосу; Найбільш підходячи умови для освоєння людиною: веб-сайт. URL:

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%83#%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%82%D0%B0%D1%88%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D1%96%D1%97

2. Перше зварювання у космосі: веб-сайт. URL:

<https://uk.xn----7sbiewaowdbfdjyt.pp.ua/42908/6/nezaversheni-statti-z-astronomii.html>

3. Розвиток зварювання в космосі: веб-сайт. URL:

<http://xn--80affkvlgiu5a.xn--plai/svarka-v-kosmose-istoriya-razvitiya/>

4. К 32 Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 437 с.

5. Технологічні процеси галузей промисловості. веб-сайт. URL:

<http://ubooks.com.ua/books/000147/inx44.php>

6. СТРУКТУРА СИСТЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДАМИ. Опис процесу зварювання РДЗ : веб-сайт. URL:

<https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnohiiy/svit-zvaryuvannya/zvaryuvannya-elektrodamy>

7. Електронно-променеве зварювання. Рисунок 5. Установка для електронно-променевого зварювання: веб-сайт. URL:

<https://studfile.net/preview/5370379/page:5/>

8. Ручна дугова зварка металевими електродами з покриттям: веб-сайт. URL:

<http://um.co.ua/9/9-8/9-88195.html>

9. Чищення поверхні металу перед зварюванням: веб-сайт. URL:

<http://osvarke.net/rabota-s-metallom/ochistka-pered-svarkoj/>

10. Хімічні і фізичні процеси протікаючи в металі у космосі. Чому метали зліпаються у відкритому космосі? Реакція металу у космосі: веб-сайт. URL:

<https://futuro.in.ua/videos/733-chomu-metaly-zlypayutsya-v-kosmosi.html>

- 11.Spacewalk Spacesuit Basics.: веб-сайт. URL:
<https://www.nasa.gov/feature/spacewalk-spacesuit-basics>
- 12.Does metal corrode or rust in space? Welding in space: веб-сайт. URL:
<https://www.sciencefocus.com/space/does-metal-corrode-or-rust-in-space/>
- 13.Екологія робочого місця зварника.к. т. н. Ю. А. Полукаров (НТУУ КПІ): веб-сайт. URL:<https://ecoweld.com.ua/ua/a383382-ekologiya-rabochego-mesta.html>
- 14.Позакорабельна діяльність астронавтів: веб-сайт. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0_%D0%B4%D1%96%D1%8F%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C
- 15.Угода про порятунок космонавтів, повернення космонавтів та повернення об'єктів, запущених у космічний простір(Москва, Лондон, Вашингтон, 22 квітня 1968 року):веб-сайт. URL: <http://consultant.parus.ua/?doc=00XOXC5329>
- 16.Orion Suit Equipped to Expect the Unexpected on Artemis Missions: веб-сайт. URL:
<https://www.nasa.gov/feature/orion-suit-equipped-to-expect-the-unexpected-on-artemis-missions>
- 17.Сумісність металу та припою: веб-сайт. URL: https://metallischekiy-portal.ru/articles/svarka/paika/sovmestimost_metalla_i_pripoa/4
- 18.Атмосфера на Місяці. Гравітація на Місяці. Місячні умови: веб-сайт. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0_%D0%9C%D1%96%D1%81%D1%8F%D1%86%D1%8F
- 19.К 32 Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 437 с.;стр.30.
- 20.ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ВАКУУМНО-КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ Конспект лекцій
- 21.WELDING IN SPACE,JULY 22, 2015.:веб-сайт. URL:
<https://awo.aws.org/2015/07/welding-in-space/>

22.Еволюція технології відкритого зварювання у космосі: веб-сайт. URL:
<https://wikimetall.ru/metallrobrabotka/svarka-v-kosmose.html>

23.Welding in Space - Do We Have the Technology?Welding tehnology: веб-сайт.
URL:

https://www.youtube.com/watch?v=eVzUmQ6Oi5c&list=PLv0F5IlypPRFNqpFN_FJnLn7pjzPozkny&index=1

24.WELDING IN SPACE- Can we weld in space?Open space and welding: веб-сайт.
URL:

https://www.youtube.com/watch?v=4pnwY9lchd0&list=PLv0F5IlypPRFNqpFN_FJnLn7pjzPozkny&index=2

25.Чому метали злипаються в космосі? [Veritasium]: веб-сайт. URL:
https://www.youtube.com/watch?v=k5x9ziu5SkE&list=PLv0F5IlypPRFNqpFN_FJnLn7pjzPozkny&index=3

26.Tutorials Simufact.welding 5:веб-сайт.URL:

<https://www.simufact.com/simufactwelding-tutorials-log-in.html>

27.Характеристика металу Д6.Характеристика 2024: веб-сайт. URL:
http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1438