

Національний університет кораблебудування

імені адмірала Макарова

Херсонська філія

Кафедра зварювання

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

(освітній рівень)

на тему: Дослідження методом скінчених елементів термодформаційних процесів при виправленні дефектів лиття у виробках з жароміцних нікелевих сплавів

Виконав: студент VI курсу, групи 6121м
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
за освітньо-професійною програмою
Інжиніринг зварювання та споріднених
процесів

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Долгова Світлана Олегівна

(прізвище та ініціали)

Керівник Лебедев Володимир Олександрович

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Херсон - 2020 року

**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонська філія**

Факультет суднобудівний
Кафедра зварювання
Освітній рівень магістр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
зварювання

к.т.н., проф.

Єрмолаєв Г.В.

“ ”

20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Долговій Світлани Олегівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Дослідження методом скінчених елементів термодетформаційних процесів при виправленні дефектів лиття у виробках з жароміцних нікелевих сплавів

керівник проекту Лебедев Володимир Олександрович, д.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені розпорядженням ХФ НУК від 12.10.2020 року № 36

2. Строк подання студентом проекту 07.12 2020 р.

3. Вихідні дані до проекту Матеріал: ЧС88У. Габаритні розміри: диск діаметром 100мм, товщиною 5мм.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз способів виправлення дефектів лиття жароміцних нікелевих сплавів. 2. Комп'ютерне моделювання термічної задачі при виправленні дефектів лиття сплаву ЧС88У 3. Комп'ютерне моделювання силової задачі при виправленні дефектів лиття сплаву ЧС88У 4. Загальні положення по техніці безпеки при зварюванні та споріднених процесах

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Мета й задачі роботи; Обладнання для проведення експериментальних досліджень; Планування експерименту, обробка експериментальних даних; Методика проведення експерименту; Визначення геометричних параметрів зварних швів; Математична модель; Результати моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

озділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		ання видав	завдання прийняв
1	д.т.н, Лебедєв Володимир Олександрович		
2	д.т.н, Лебедєв Володимир Олександрович		
3	д.т.н, Лебедєв Володимир Олександрович		
4	д.т.н, Лебедєв Володимир Олександрович		
5	д.т.н, Лебедєв Володимир Олександрович		

7. Дата видачі завдання 15.10.2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ /п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз використання лазерного зварювання.	22.10.2020р.	
2	Методика проведення експерименту	29.10.2020р.	
3	Проведення експерименту і обробка результатів	12.11.2020р.	
4	Комп'ютерне моделювання деформованого стану прилазерному зварюванні тонких пластин	19.11.2020р.	
5	Охорона праці і техніка безпеки.	30.11.2020р.	
6	Графічна частина	02.12.2020р.	
7	Оформлення пояснювальної записки	04.12.2020р.	

Студент Долгова С.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) Лебедєв В.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зміст

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИПРАВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ЛИТТЯ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ	8
1.1. Визначення та застосування жароміцних нікелевих сплавів	8
1.2. Хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів	9
1.3. Вплив легування на жароміцність	12
1.4. Особливості виплавки жароміцних сплавів	14
1.5. Хімічний склад та температурно-залежні властивості сплаву ЧС88У	16
1.6. Методи та джерела живлення, що використовуються при виправленні дефектів лиття	18
Висновки, постановка мети і завдання досліджень	21
2. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМІЧНОЇ ЗАДАЧІ ПРИ ВИПРАВЛЕННІ ДЕФЕКТІВ ЛИТТЯ СПЛАВУ ЧС88У	24
2.1. Вибір комп'ютерного методу моделювання	24
2.2. Методика комп'ютерного моделювання теплового стану	28
2.3. Комп'ютерне моделювання теплового стану при виправленні дефектів	31
Висновки	37
3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВОЇ ЗАДАЧІ ПРИ ВИПРАВЛЕННІ ДЕФЕКТІВ ЛИТТЯ СПЛАВУ ЧС88У	39
3.1. Методика комп'ютерного моделювання напружено- деформованого стану	39
3.2. Комп'ютерне моделювання напруженого стану при виправленні дефектів	41
Висновки	64
4. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПО ТЕХНІЦІ БЕЗПЕКИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	72
ДОДАТКИ	76

					MP 8.132.6121м.04.04 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Структура і властивості матеріалів виробів формуються як на стадії лиття, так і при подальшій термічній обробці. Тому вдосконалення існуючих технологій виготовлення литих виробів з жароміцних нікелевих сплавів, створення нових технологічних методів і прийомів впливу на формування їх структури, для підвищення втомних властивостей - завдання дуже важливе і актуальне.

В даний час для оптимізації структури, підвищення міцності і втомних властивостей сплавів використовуються різні технологічні методи.

Так для виключення впливу структурного фактора жароміцних сплавів - наявності границь зерен - застосовується технологія лиття лопаток з спрямованою кристалізацією. При литті можуть виникати дефекти такі як поверхневі і наскрізні незаливи, газові раковини, тріщини.

Якісно виправити дефекти лиття і експлуатаційні ушкодження виробів можливо різними методами. Один з найбільш використовуваних є паяння, але це трудо- та енергозатратний метод, тому все частіше використовують локальні джерела нагрівання. На відміну від паяння в пічці при виправленні дефектів з використанням тепла електричної дуги, плазмового потоку, ацетиленокисневого полум'я та інших теплових джерел, температура у вузлі розподіляється нерівномірно, що може привести к виникненню дефектів у вигляді гарячих тріщин.

Тому метою роботи було дослідження впливу різних джерел нагрівання при виправленні дефектів лиття на утворення гарячих тріщин жароміцного нікелевого сплаву ЧС88У.

					MP 8.132.6121м.04.04 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз способів виправлення дефектів лиття жароміцних нікелевих сплавів

1.1. Визначення та застосування жароміцних нікелевих сплавів

Жароміцними сплавами називають велику групу складнолегованих сплавів, на основі елементів VIII групи періодичної системи елементів (Fe, Co, Ni) з добавками великої кількості легуючих елементів.

Головною особливістю таких сплавів є збереження високого опору пластичної деформації і руйнування при впливі високих температур і агресивних окислювальних середовищ [1].

Жароміцні сплави використовують при виготовленні багатьох деталей газових турбін реактивної авіації, в суднових газотурбінних установках, стаціонарних газових турбінах, при перекачуванні нафти і газопродуктів, при гідрогенізації палива, в нагрівальних металургійних печах і багатьох інших установках [2]. Крім газових турбін повітряного, морського, автомобільного транспорту та промислового призначення жароміцні нікелеві сплави знаходять застосування в космічних кораблях, ракетних двигунах, атомних реакторах і підводних човнах [3]. Ці матеріали експлуатуються в умовах високих динамічних силових навантажень при високих температурах, близьких до температури плавлення [4].

За технологією отримання заготовок розрізняють деформуючі, ливарні і порошкові жароміцні нікелеві сплави [5-7]:

Деформуючі - застосовують для отримання листів, дроту, стрічки і різних деталей отриманих куванням, штампуванням або пресуванням.

Ливарні - застосовуються для отримання деталей литтям в керамічні або металеві форми під тиском. Ливарні нікелеві сплави мають більш високу жароміцністю в порівнянні з аналогічними властивостями сплавів, що деформуються, і дозволяють відливати з них тонкостінні лопатки складної

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конфігурації з розвиненою внутрішньою порожниною і з мінімальними припущеннями під механічну обробку.

Порошкові - отримують методами порошкової металургії, а вироби з них шляхом спікання або сплаву порошкового матеріалу. [8, 9].

Різні марки жароміцних нікелевих сплавів відрізняються за властивостями, перш за все жароміцністю, а також корозійною стійкістю, механічними властивостями (пластичність, тривала міцність, термічна втома, втомна довговічність та ін.).

Експлуатаційні властивості жароміцних нікелевих сплавів залежать від технології їх виробництва: методів виплавки, умов розливання і кристалізації, умов механічної, термічної або хіміко-термічної обробки, фазового складу, макро- і мікроструктури, але первинно властивості будь-якого сплаву формуються вибором легуючих елементів і мікродобавок і їх кількісного співвідношення в системі [10].

1.2. Хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів

Жароміцні сплави являють собою складнолеговані багатокомпонентні системи на основі нікелю. Жароміцні нікелеві сплави мають наступні основні компоненти структури [11, 12]:

- γ -твердий розчин на основі нікелю;
- γ' - зміцнюючу фазу;
- карбіди типу MeC , Me_6C , $Me_{23}C_6$;
- η , σ , δ , ТПУ і інші фази.

Всі компоненти, що використовуються при легуванні жароміцних нікелевих сплавів, умовно можна розділити на три групи: елементи утворюють γ' -фазу, елементи твердого розчину і карбідообразуючі елементи. До першої групи відносяться Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr; до другої - Co, Cr, Mo, W; до третьої - Al, Ti, Ta, Nb, Hf.

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливу групу складають мікролегуючі компоненти, які вводять з метою зміцнення міжфазних і межзеренових кордонів. До них відносять С, В, Zr і деякі рідкоземельні елементи, такі як La, Ce, Y [11, 12-15].

Вплив кожного легуючого елемента в жароміцних нікелевих сплавах багатогранний. Один і той же хімічний компонент може одночасно бути і карбідообразуючим елементом і входити до складу твердого розчину, підвищуючи його міцність. У таблиці 1.1 представлені основні функції легуючих елементів.

Таблиця 1.1 - Вплив різних елементів на властивості жароміцних нікелевих сплавів.

Елемент	Короткий опис ефектів від легування
Co	Робить позитивний вплив на жароміцність, технологічність (гнучкість), а також на розширення температурного інтервалу для здійснення термічної і деформаційної обробки, підвищення стійкості до сольової корозії.
Cr	Головним чином підвищує стійкість до високотемпературної газової та сульфідної корозії, збільшує опір росту втомної тріщини. В основному входить до складу γ -фази. Крім того, присутній в карбідах $Me_{23}C_6$ і ТПУ-фазах.
Al	Сприяє утворенню високодисперсної фази. Основний γ' -утворюючий елемент. Створює тугоплавкі з'єднання з киснем на поверхні.
Ti	Сприяє утворенню високодисперсної фази. Основний γ' -утворюючий елемент. Створює додаткову зміцнюючу фазу на основі карбіду типу MeC .
Mo	Підвищує термічну стійкість твердого розчину шляхом гальмування процесів знеміцнення при високих температурах, підвищують температуру рекристалізації твердого розчину, утворює карбіди $Me_{23}C_6$
Ta	Сприяє підвищенню термічної стійкості твердого розчину. Утворення і підвищення стабільності γ' -фази, збільшення опору повзучості і опору росту втомної тріщини. Є також карбідообразуючим елементом.

Продовження таблиці 1.1

C	Утворює важкорозчинні карбіди TiC, Cr ₂₃ C ₆ , Cr ₇ C ₃ і ін., в присутності W і Mo - подвійні карбіди типу Me ₆ C; перерозподіл карбідів в жароміцних нікелевих сплавах в інтервалі гартівних температур сильно впливають на тривалу міцність і пластичність сплавів. Контроль роста зерна при підвищених температурах.
S	При великому вмісті призводить до різкого зниження жароміцності, утворюючи з залізом, нікелем і кобальтом легкоплавкі евтектики, знижує міцність кордонів зерен.
P, Pb, Bi, Te, Sn, Se, Tl, Sb, As та ін.	Навіть малі кількості цих домішок мають негативний вплив, як на тривалу міцність, так і на пластичність.

1.3. Вплив легування на жароміцність

В результаті складного легування у цих сплавів досягнуті найвищі жароміцні властивості в порівнянні з жароміцних властивостями сплавів на залізній і навіть кобальтовою засадах.

Присадка 20% Cr до нікелю порівняно мало зміцнює твердий розчин при високих температурах і підвищення межі міцності становить ~ 25-30%. Хром покращує окалиностійкість і, крім того, підвищує енергію зв'язку атомів в твердому розчині системи нікель - хром - залізо.

Введення титану в нікельхромові сплави в кількості 2,5-3,0% сприяє утворенню високодисперсних інтерметаллідних фаз при помірних температурах, збільшує тим самим опір сплаву пластичної деформації і підвищує тривалу міцність при 8000С до 15 кг / мм². Введення в нікельхромові сплави титану разом з бором підвищує її до 20 кг / мм².

Збільшення вмісту титану або алюмінію чи їх суми разом з бором іттугоплавкими елементами (W, Mo або Nb) ще більше підвищує жароміцність (σ_{100} при 8000С = 50 кг / мм²).

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Встановлено, що характеристична температура, межі тривалої міцності і внутрішнє тертя зі збільшенням легування (з введенням титану в нікель і нікельхромістие сплави) підвищуються.

Незважаючи на межзерновий характер руйнування, ці сплави зберігають високу пластичність.

Вплив титану і алюмінію на структуру, фазовий склад нікелевих і нікельхромістих сплавів вивчалось рядом дослідників.

Область твердих розчинів, багатих нікелем, при 1150⁰С поширюється в подвійній системі нікель - титан до 13% Ti, а в потрійній системі нікель - хром - титан при 20% Cr приблизно до 10% Ti.

Зі зниженням температури розчинність титану в подвійній і в потрійній системі різко падає. Так, при 750⁰С в подвійній системі Ni - Ti розчинність титану становить вже 10%, а в потрійних сплавах з 20% Cr - приблизно 4%.

Жароміцні сплави, крім титану, як правило, в своєму складі мають алюміній. Алюміній значно впливає на розчинність титану в нікелі.

Так, при 1150⁰С розчинність титану в нікелі знижується з 13 до 8% при вмісті алюмінію в кількості 5%. При 750⁰С це явище ще більш яскраво виражено. [16]

Постійне прагнення підвищити жароміцні властивості за рахунок легування призвело в кінці 80-х років до появи сплавів II покоління, що містять новий легуючий елемент реній до 3% (мас.) [17]. Було встановлений, що з усіх легуючих елементів Re найбільш ефективно підвищує жароміцні властивості нікелевих сплавів. Маючи низький коефіцієнт дифузії і концентруючись в γ -твердому розчині ($K_{Re}=0.1$), реній гальмує дифузионную рухливість атомів в γ -фазі, і отже, зменшує швидкість коагуляції частинок γ' -фази. Подальший розвиток цього напрямку легування призвел, зовсім недавно, до розробки жароміцних нікелевих сплавів III покоління, в яких концентрація Re збільшена до 6% (мас.) [18].

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4. Особливості виплавки жароміцних сплавів

Формування литої структури жароміцних нікелевих сплавів починається при кристалізації з утворенням у відносно невеликому інтервалі температур кристалів γ -твердого розчину в формі дендритних гілок. Далі одночасно з затвердінням рідини междендритних областей утворюються монокарбід МС за евтектичною реакцією: $Ж = \gamma + МС$.

Закінчується формування литої структури жароміцних нікелевих сплавів кристалізацією фаз евтектичного походження, які виділяються в глобулярній або дендритообразній формі: $(\gamma + \gamma')$. Потім в процесі охолодження з температури нижче γ' -сольвус (температурна розчинність γ' -фази в γ -розчині) первинний γ -твердий розчин розпадається з виділенням дисперсних частинок γ' -фази. Цей процес, протікаючи з невеликим температурним переохолодженням (10-20 ° С) щодо γ' -сольвус, жароміцних нікелевих сплавів носить спонтанний характер, пов'язаний з гомогенним зародженням і подальшим зростанням виділень γ' -фази при малих шляхах дифузії атомів [19].

Найважливішим кроком у вдосконаленні структури жароміцних сплавів було отримання матеріалів взагалі без будь-яких меж зерен, тобто монокристалів. Для цього знадобилася не тільки модернізація технології спрямованої кристалізації з метою виростити монокристали із заданою орієнтацією, а й розробка спеціальних складів жароміцних сплавів, а також режимів їх термічної обробки.

Так як в монокристалах відсутні кордону зерен, то немає необхідності вводити в сплав елементи, зміцнюючі їх. Ця обставина істотно спростило систему легування жароміцних сплавів для вирощування монокристалів. Крім того, використовуючи анізотропію фізико-механічних властивостей, можна вибрати таку раціональну орієнтацію монокристалла (осьову або азимутальну) щодо направлення дії головних напружень, яка забезпечила б найкращий комплекс механічних властивостей і максимальний ресурс роботи виробу.

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак навіть ідеальне орієнтування поздовжніх кордонів зерен не прибирають поперечні компоненти в місцях стикування гілок дендритів. Наступним кроком вдосконалення структури лопаток було отримання їх методом спрямованої кристалізації у вигляді монокристалів, у яких були відсутні кордону зерен і відпала необхідність їх зміцнення.

Для отримання моноотливок (монокристалів) з розплавів були основані такі методи, названі за прізвищами їх творців:

Метод Бриджмена - Стокбаргера - нормальна спрямована кристалізація. Він полягає в тому, що метал або сплав необхідного складу, розплавлений в контейнері - тиглі, чаші всього циліндричної форми з конічним дном, повільно переміщається із зони розплавлення. При цьому на дні контейнера, охолоджують першим, виникають нечисленні центри кристалізації, які в міру опускання тигля ростуть за рахунок поглинання розплаву. Між ними йде геометричний відбір через швидкість росту кристалів, що розрізняються за орієнтуванням. В результаті може залишитися всього один кристал, який, розростаючись, займе весь обсяг циліндричної частини контейнера. У такому випадку процес вважається успішним, так як отриман монокрістал сплаву. Але часто не всі зерна виклініваються в процесі росту, і виходить направлено закристалізований злиток з невеликим числом стовпчастих зерен. Іноді їх після відповідного розрізання можна також використовувати як монокристали. Застосовуючи тигель з більш складною будовою донної частини, наприклад, використовуючи перетискання, можна збільшити ймовірність отримання монокристалів.

Даний метод універсальний і дозволяє вирощувати монокристали більшості жароміцних нікелевих сплавів. На жаль, вирощені монокристали можуть мати такі ж недосконалості структури, які є в злитках (ізоляція, пористість, разорієнтовка кристалічної решітки).

Одна з різновидів методу Бриджмена - метод Чалмерса, що відрізняється горизонтальним розташуванням тигля, який частіше за все у вигляді відкритого човника. Метал кристалізується по мері видалення човника з

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагрітої зони печі. Цей спосіб зручний для отримання кристалів заданої орієнтації, так як розташували кристалічну приманку на одному кінці човника, можна повернути його на заданий кут відносно поздовжнього напрямку тигля. Використовуючи тиглі складної форми, монокристали вирощують у вигляді готових зразків для механічних випробувань.

Метод Чохральського полягає в тому, що до контейнера, який містить рідкий метал з постійною температурою, підводиться охолоджений запал, який потім повільно піднімається. Внаслідок сили поверхневого натягу він захоплює частину рідкого металу, який потім твердне. Таким чином, довжина стержня зростає, а кристалізується на ньому метал поступово віддаляється з розплаву. Цей метод вимагає більш суворого дотримання температурного режиму ванни, оскільки діаметр і досконалість зростаючого монокристалла складним чином залежать від швидкості теплопровідності, яка визначається температурою розплаву, довжиною кристала, швидкістю його перетворення і ряду інших факторів, але зазвичай досконалість отриманих монокристалів буває вище, ніж у кристалів, вирощених за методом Бріджмена [20].

1.5. Хімічний склад та температурно-залежні властивості сплаву ЧС88У

Сплав ЧС88У (ХН57КВЮТМБРЛ-ВИ) призначений для виготовлення робочих лопаток сучасних суднових і енергетичних газотурбінних двигунів, що мають при експлуатації температуру до 1150 °С. Сплав має підвищені характеристики жароміцності і пластичності при задовільній корозійній стійкості [21,22,23].

Хімічний склад сплаву ЧС88У показаний в таблиці 1.2. Механічні властивості і тривала міцність сплаву представлені в таблицях 1.3 та 1.4 відповідно. Фізико-механічні властивості в області високих температур в таблиці 1.5.

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сплаву ЧС88У згідно ТУ 14-1-482890.

Марка сплаву	Масова частка елементів, %										
	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	C	Hf	B
ЧС88У	основа	15,4-	10,0-	4,7-	1,6-	2,8-	4,2-	0,1-	0,04-	0,2-	0,06-
		16,3	11,5	5,9	2,3	3,3	5,0	0,3	0,09	0,4	0,1
	Масова частка елементів, % (не більше)										
	It	Ce	Zr	Fe	Si	S	Mn	P	Cu	N	Pb
	0,03	0,015	0,05	0,9	0,3	0,008	0,3	0,0008	0,1	0,01	0,001

Таблиця 1.3 – Механічні властивості сплаву ЧС88У (середні значення) .

Зразки	Температура, °C	Границя плинності, $\sigma_{0,2}$, МПа	Тимчасовий опір, σ_b , МПа	Відносне подовження, δ , %	Відносне звуження, ψ , %
У стані лиття	20	919	1193	10,5	12,5
Стандартна ТО	20	897	1113	5,7	9,7
Стандартна ТО	600	897	1113	6,0	10,0
Стандартна ТО	725	837	1147	10,3	10,45
Стандартна ТО	800	912	985	13,4	26,18
Стандартна ТО	900	657	717	24,3	37,7

Таблиця 1.4 – Тривала міцність сплаву ЧС88У [24].

Зразки	Температура, °C	Тимчасовий опір σ , МПа	Тривала міцність, τ_r , ч
У стані лиття	900	274	152
Стандартна ТО	900	274	271
Стандартна ТО	800	382	1000

Особливістю жароміцних дисперсійно зміцнених нікелевих сплавів є їх схильність до утворення гарячих тріщин. Одна з проблем жароміцних нікелевих сплавів полягає в їх схильності до утворення термічних тріщин при зварюванні, викликаних структурними і термічними напруженнями [25]. При цьому виділяють два основних параметри, що впливають на утворення тріщин

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- це деформаційна здатність $v_{кр}$ (мм/с) і коефіцієнт схильності до утворення тріщин $K_{тр}$ (%) [26].

Таблиця 1.4 – Фізико-механічні властивості сплаву ЧС88У в області високих температур.

Температура, °С	Модуль пружності, 105МПа	КЛТР, 10 ⁻⁶ 1/°С	Границя плинності, МПа	Відносне подовження, %
1050	1,48	14,8	112	3,5
1100	1,42	15,2	55,5	1
1125	1,35	15,3	39,1	0,5
1150	1,29	15,5	32,3	0
1200	1,2	15,6	23,4	0

1.6. Методи та джерела живлення, що використовуються при виправленні дефектів лиття

При виготовленні литих виробів в них можуть утворюватися різні зовнішні дефекти металу. Які, як правило, призводять до погіршення характеристик деталей і вузлів машин, аж до їх повної непридатності. Якісно виправити дефекти лиття і експлуатаційні ушкодження виробів можливо різними методами. Один з найбільш використовуваних є паяння. Паяння жароміцних нікелевих сплавів зазвичай виконують у вакуумних печах при загальному та рівномірному нагріванні усього вузла до температури паяння, а охолодження відбувається з піччю. Це досить трудомісткий процес з великими енергетичними затратами, тому все частіше використовують локальні джерела нагрівання. На відміну від паяння в пічці, тут проводять заплавлення дефектів з локальним нагріванням з використанням тепла електричної дуги, плазмового потоку, ацетиленокисневого полум'я та інших теплових джерел, при яких температура у вузлі розподіляється нерівномірно. Розподіл теплового потоку при цих джерелах практично однаковий по формі.

Тому при дослідженні термодформаційних процесів з локальним нагріванням необхідно розв'язувати значно складнішу задачу, порівняно з паянням, поєднуючи розподіл температури з розподілом напружень (об'єднана задача).

При зварюванні металів в результаті нерівномірного нагрівання і розширення його виникають зварювальні напруження і деформації.

Залишкові напруження і пластичні деформації в металі знижують міцність, жорсткість і корозійну стійкість зварних конструкцій при їх експлуатації.

В даній роботі розглянуто три джерела живлення для виправлення дефектів лиття, а саме: ацетиленово-кисневе полум'я, малоамперна аргонова дуга прямої полярності та мікроплазмова дуга.

Ацетилено-кисневе полум'я, яке має температуру близько 3200 С і відновну атмосферу, дозволяє розплавляти метал, одночасно формуючи і утримуючи зварювальну ванну в будь-яких просторових положеннях, внаслідок своєї високої температури, що дозволяє швидко нагрівати метал, має цінні технологічні властивості [27].

Ацетилено-кисневе полум'я складається з трьох зон: зона 1 (ядро) оточена тонкою сліпуче світиться оболонкою, має вільний кисень і продукти розпаду ацетилену; зона 2 (відновна) має найвищу температуру і містить продукти неповного згорання; зона 3 (зона повного згорання) має довгий факел жовто-червоного кольору, в якому остаточно згорає ацетилен за рахунок також кисню повітря. Равдяки своїй хімічній активності викликає вигорання деяких легуючих елементів з рідкого металу зварювальної ванни наприклад хрому, титану, що забезпечують загальну корозійну стійкість і стабілізацію стали проти міжкристалітної корозії [28].

Малоамперна плазмова дуга, формується спеціальним плазмотроном з вольфрамовим електродом, має конусоподібну форму з вершиною, обернену до виробу. Така форма її забезпечується конструктивними особливостями плазмотрона, правильним вибором плазмообразуючого і захисного газів та їх витратою. Найбільш часто в якості плазмообразуючого газу використовується

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аргон. У нижнього зрізу сопла плазмова дуга існує тільки в струмені аргону. За мірою наближення до анода (виробу) плазмообразуючий і захисний газу перемішуються і плазмова дуга горить вже в суміші цих газів. Чим ближче до анода, тим більше в суміші міститься захисного газу. Якщо захисний газ має більший коефіцієнт теплопровідності, ніж плазмообразуючий, то ступінь стиснення дуги в міру наближення до анода збільшується, і вона набуває конусоподібну форму (форму списа) [29].

Основними недоліками малоамперної аргонової дуги, що утрудняють здійснення якісного зварювання металів малої товщини, є низька стабільність (в часі і в просторі) дуги на малих токах і мала щільність струму в анодному плямі. Підвищення щільності струму шляхом правильного вибору захисного газу веде до збільшення падіння напруги на дузі і до ще більшого зниження стійкості її горіння. Крім того, вільно горить дуга з вольфрамовим катодом не дозволяє застосовувати її в якості захисних середовищ хімічно активні газу, які істотно підвищують щільність струму в анодній плямі.

Перевагами мікроплазмової дуги є висока концентрація енергії і голкоподібна форма малоамперної стислої дуги забезпечує отримання вузького шва і малої зони термічного впливу, що знижує деформацію виробів на 25-30% в порівнянні з аргонодуговим зварюванням. Основні характеристики кожного з обраних методів зазначені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Теплові характеристики та коефіцієнт зосередженості (k) розглянутих джерел [30].

Тип джерела	Потужність	Коефіцієнт зосередженості	Час нагрівання
	$q_m, \text{Вт/см}^2$	$k, \text{см}^{-2}$	$t_n, \text{с}$
Ацетилено-кисневе полум'я	510	0,3	4,4
Мікроплазмова дуга	3350	7	2,5
Малоамперна аргонова дуга	9900	32	0,1

Висновки, постановка мети і завдання досліджень

1. Жароміцні сплави це сложнолегованні сплави, на основі елементів VIII групи періодичної системи елементів (Fe, Co, Ni) з добавками великої кількості легуючих елементів.

2. Сплав ЧС88У (ХН57КВІЮТМБРЛ-ВІ) призначений для виготовлення робочих лопаток сучасних суднових і енергетичних газотурбінних двигунів, що мають при експлуатації температуру до 1150 ° С.

3. Особливістю жароміцних дисперсійно зміцнених нікелевих сплавів є їх схильність до утворення гарячих тріщин.

4. При виготовленні литих виробів в них можуть утворюватися різні зовнішні дефекти металу. Якісно виправити дефекти лиття і експлуатаційні ушкодження виробів можливо різними методами.

5. Паяння жароміцних нікелевих сплавів досить економічно затратний процес на відміну від зварювання, яке проводять з локальним нагріванням, при якому температура у вузлі розподіляється нерівномірно.

Тому метою роботи було дослідження впливу різних джерел нагрівання при виправленні дефектів лиття на утворення гарячих тріщин жароміцного нікелевого сплаву ЧС88У.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розглянути три джерела нагрівання, які могли б вирішити цю проблему, а саме: ацетиленово-кисневе полум'я, малоамперна аргонна дуга прямої полярності та мікроплазмова дуга.

2. Обрати метод та програмне забезпечення для розробки досліджуваної моделі та моделювання термічної та силової задачі.

3. Дослідити температурний стан при впливі обраних джерел нагрівання.

4. Дослідити напружено-деформований стан та вплив обраних джерел нагрівання.

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Виконати аналіз результатів досліджень і розробити рекомендації щодо виправлення дефектів лиття.

					MP 8.132.6121м.04.04.01. ПЗ	Арк.
						22
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Комп'ютерне моделювання термічної задачі при виправленні дефектів лиття сплаву ЧС88У

2.1. Вибір комп'ютерного методу моделювання

Моделювання призводить до вирішення лінійних або нелінійних рівнянь або систем рівнянь в приватних похідних. Існують традиційні математичні засоби, що дозволяють отримати рішення в певних випадках (аналіз Фур'є, розкладання в ряд та ін.), Але для вирішення конкретних проблем, що виникають в науці і техніці, неможливо обійтися без використання чисельних методів. З ростом продуктивності ЕОМ чисельне моделювання набуває особливого значення, так як дозволяє доповнити або навіть замінити прямий експеримент. Останній часто вартісний, його постановка буває трудомною або взагалі неможливою.

Розроблено багато методів чисельного рішення рівнянь. Найбільш часто використовувані з них - методи кінцевих різниць і кінцевих елементів.

Метод кінцевих різниць був розроблений раніше і на перший погляд є найбільш простим в реалізації. Ідея його полягає в розбитті прямокутної сіткою області, в якій вирішується рівняння, і дискретизація диференціального оператора. Вирішуючи лінійну систему рівнянь, знаходять наближені рішення в вузлах решітки. Основні труднощі пов'язані з урахуванням граничних умов, якщо межа області має складну геометричну форму [31].

Після докладного математичного дослідження виявилось, що при негладких вхідних даних задачі метод кінцевих елементів часто сходиться швидше, ніж метод кінцевих різниць, а іноді взагалі має оптимальну швидкість збіжності.

Типова інженерне завдання в методі кінцевих елементів починається з підготовки моделі - віртуального аналога реальної конструкції, технологічного виробу, деталі механізму та ін.

					MP 8.132.6121м.04.04.02. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З геометричної точки зору, розрахункова модель являє собою поле точок, пов'язаних між собою примітивами (відрізками прямих ліній, трикутниками, прямокутниками і ін.). Так утворюється якась сітчаста структура - геометрія вихідної конструкції апроксимується з накладеною на неї сіткою і подальша робота здійснюється вже не з вихідною системою, а з отриманою сіткою.

Крім геометрії, примітиви, що з'єднують вузлові точки моделі, мають також відомі механічні властивості. Це означає, що зв'язавши жорсткості всіх елементів сітки в єдине ціле (в рамках прийнятих в моделі припущень), можна встановити напружено-деформований стан всієї системи. Так ми можемо отримати будь-які чинники, що нас цікавлять: поздовжні і поперечні сили, згинальні і крутильні моменти, напруги, деформації та ін.

Кількість вузлів і елементів, з яких складається розрахункова модель, заздалегідь відомо. Для деяких складних систем воно може вимірюватися тисячами і навіть мільйонами, але воно, так чи інакше, звичайно. Ця обставина, а також те, що заздалегідь відомий принцип "роботи" кожного окремого елемента системи, породило назву - метод кінцевих елементів. А саму сітку називають, як правило, кінечно-елементною.

З математичної точки зору, область, в якій шукається рішення системи диференціальних рівнянь МСЕ, розділяється на підобласті (елементи) і для кожного елемента вибирається апроксимуюча функція довільного виду. Найбільш простий і "грубий" випадок - поліном першого ступеня: поза елементом обрана функція дорівнює нулю, а на кордонах (у вузлах) функція приймає значення, які є рішенням задачі. Звичайно, вони заздалегідь невідомі. Коефіцієнти полінома апроксимуючої функції знаходять з умов рівності значень сусідніх функцій у вузлах.

Далі складається система лінійних алгебраїчних рівнянь, в яких число невідомих дорівнює числу ступенів свободи системи. Розміри сітки обмежуються не тільки конкретним завданням, а й фізичними можливостями комп'ютера (в першу чергу, розміром доступної пам'яті).

У науковій і технічній літературі теорія методу кінцевих елементів викладається через матричне числення. Етапи, описані вище, обов'язково

					MP 8.132.6121м.04.04.02. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

містять збір матриць жорсткості і мас конструкції. Матриця жорсткості є таблицею, в якій записані вузлові реакції кінцевого елемента на почергове одиничне обурення кожного його вузла. Висловлюючись простіше, матриця жорсткості кінцевого елемента - це система взаємозв'язків всіх його точок на "механічному" рівні. Знаючи локальну матрицю жорсткості кожного окремого елемента, комп'ютерна програма (CAE) формує глобальну матрицю жорсткості, підсумовуючи жорсткості всіх елементів, що стикаються в загальних (суміжних) вузлах, з урахуванням їх орієнтації в просторі. У підсумку виходить загальна система взаємозв'язків між усіма вузлами розрахункової моделі.

CAE - англomовна аббревіатура, дослівно означає Computer-Aided Engineering. Так прийнято називати софт, вирішуючий різні інженерно-технічні завдання (аналіз, розрахунки, симуляції різноманітних фізичних процесів і т. П.).

В переважній більшості, розрахункові модулі сучасного CAE-софта засновані на чисельних методах вирішення диференціальних рівнянь, а саме МСЕ.

CAE-системи майже нерозривно пов'язані з CAD-системами (Computer-Aided Design), оскільки оцінка міцності або динамічний аналіз є частиною більш загального циклу проектування та конструювання виробу. Нерідко вони інтегровані один в одного на рівні інтерфейсу користувача. Революційне значення CAE для сучасної техніки і інжинірингу полягає в тому, що CAE-софт перевіряє працездатність виробу або конструкції без істотних витрат часу і коштів на натурні випробування, так як програма на основі методу скінченних елементів оцінює поведінку комп'ютерної моделі в умовах, близьких до реальних.

Популярність МСЕ сприяла створенню комерційних пакетів програм, серед яких можна відзначити наступні часто використовувані:

- в механіці: NASTRAN, ASKA
- в теплотехніці: TITUS
- в електромгнетизмі: FLUX, MAGNET 11, PE2D

					MP 8.132.6121м.04.04.02. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- інші: MICROFLUX, GE2D, ANSYS.

У 1970 році з'явився скінчено-елементний програмний пакет під назвою NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis), який далі розвивався компанією MSC (MacNeal-Schwendler Corporation). Програма Nastran забезпечує виконання повного набору інженерних розрахунків, включаючи розрахунок напружено-деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, рішення задач теплопередачі, дослідження сталих і несталих процесів, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, аналіз частотних характеристик, відгуку на динамічні і випадкові впливи.

У 1976 р розроблений комплекс DYNA3D (пізніше названий LS DYNA). Програма призначена для розв'язання тривимірних динамічних нелінійних задач механіки деформованого твердого тіла, механіки рідини і газу, теплопереносу, а також пов'язаних задач. У LS DYNA реалізовані явний і неявний метод скінченних елементів з можливістю побудови лагранжевої, ейлерову і гібридної сітки. Програма має вбудовані процедури автоматичної перебудови і згладжування скінчено-елементної сітки при виродження елементів, високоефективні алгоритми розв'язання контактних задач, широкий набір моделей матеріалів, можливості для користувача програмування. З 1996 р. вирішувач LS DYNA вбудований в пакет програм ANSYS, де використовується для вирішення завдань динамічного аналізу. У 2006 р вирішувач LS DYNA також увійшов до складу пакету програм NASTRAN.

Лідером серед програм аналізу на макрорівні вважається комплекс Adams, розроблений і розвивається компанією Mechanical Dynamics Inc. (MDI). Компанія створена в 1977 р. Основне призначення Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) кінематичний і динамічний аналіз механічних систем з автоматичним формуванням і вирішенням рівнянь руху.

До числа лідерів програм, що використовують МСЕ, відноситься також програмний комплекс ANSYS, який є скінчено-елементною системою, яка охоплює такі різні напрямки, як міцність, теплофізика, гідрогазодинаміка і електромагнетизм; має можливість вирішення пов'язаних задач, по всіх перерахованих напрямках, а також має високий показник «ефективність /

					MP 8.132.6121м.04.04.02. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вартість». Серед безлічі скінчено-елементних програмних комплексів ANSYS був першим сертифікований за міжнародними стандартами ISO 9000 та ISO 9001 [32-34].

ANSYS загальнодоступний програмний продукт дозволяє моделювати об'єкти проектування різних фізичних полів. В даний час рішення Ansys охоплюють практично всі сегменти інженерної галузі: від важкого машинобудування, оборонної промисловості та аерокосмічної техніки до мікроелектроніки, медицини і симуляторів для тестування ПО.

Програмна система KE аналізу ANSYS розробляється американською компанією Ansys inc.

Враховуючи складність задачі і можливості сучасних комп'ютерних методів моделювання НДС, в роботі використано метод скінчених елементів (МСЕ) і програмний комплекс (ANSYS) (<https://www.ansys.com/academic/free-student-products>).

2.2. Методика комп'ютерного моделювання теплового стану

В якості фізичної моделі було обрано диск діаметром 200 мм і товщиною 5 мм. Загальний вигляд зразка наведено на рис.2.1.

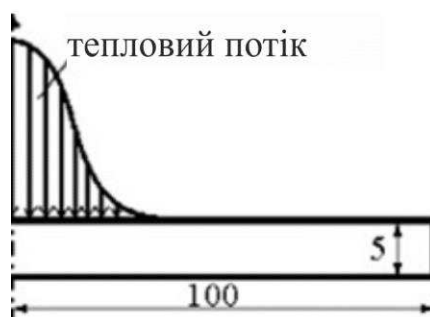


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд досліджуваного зразка

Внаслідок симетрії зразка щодо осі розв'язувалась осісиметрична задача із заданими відповідними граничними умовами. Розміри моделі: диск радіусом $r = 100$ мм і товщиною $h = 5$ мм. Схема розбивки на скінчені елементи (СЕ) моделі наведено на рис. 2.2.

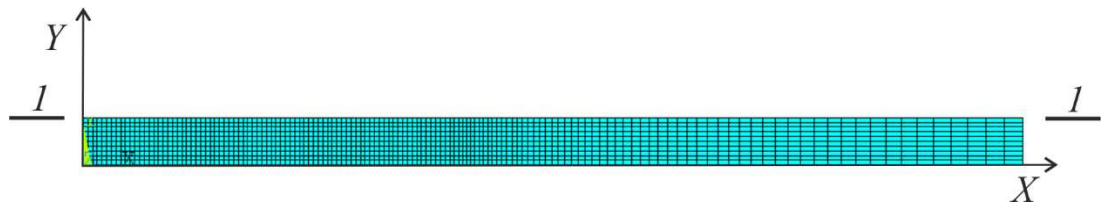


Рисунок 2.2 – Переріз скінчено-елементної моделі

З урахуванням специфіки завдання, наявності великих градієнтів температур у вузькій зоні поблизу джерела тепла використовувалася розбивка зі змінними розмірами СЕ. По товщині моделі проводимо розбивку на 10 елементів, біля зони термічного впливу елементи мають квадратну форму, по мірі віддалення від неї, для більш раціонального використання комп'ютерної техніки, елементи набувають витягнутої форми. При вирішенні температурної задачі використовувався 8-ми вузловий елемент PLANE77. Це більш висока версія двовимірного чотири вузлового теплового елемента (PLANE55). Елемент має одну ступінь свободи - температуру в кожному вузлі. Елементи з 8 вузлами мають сумісну температурну форму і добре підходять для моделювання криволінійних кордонів. Восьми-вузловий термоелемент застосовується для двовимірного, стаціонарного або перехідного термічного аналізу. Геометрія, розташування вузлів і система координат перетину кінцевого елемента показані на рис. 2.3.

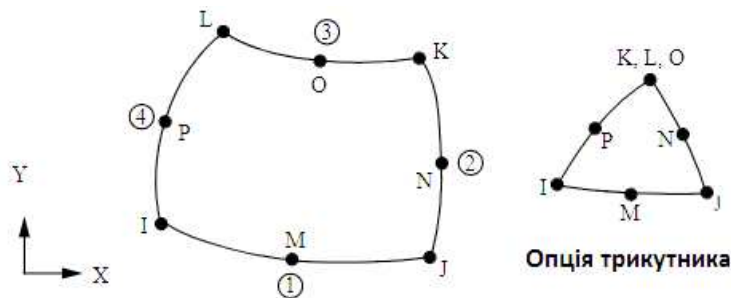


Рисунок 2.3 Геометрія, розташування вузлів і систем координат кінцевого елемента PLANE77

Для вирішення температурної задачі з використанням елемента PLANE77 необхідні такі властивості матеріалів: коефіцієнт теплопровідності, густина, теплоємність або ентальпія. Ентальпія розраховувалася за формулою:

$$H = \int \rho \cdot c(T) \cdot dT,$$

де ρ – густина кг/м³; $c(T)$ – залежність теплоємності від температури Дж/(кг).

Модель навантажували тепловим потоком вздовж вертикальної осі Y . Тепловий потік точно описується нормальним законом розподілу (рис. 2.4), параметри якого тісно пов'язані з тепловими характеристиками джерела тепла (ефективною тепловою потужністю q_m і коефіцієнтом зосередженості питомого теплового потоку k):

$$q(r) = q_m \cdot e^{-kr^2}$$

$$q_m = \frac{k}{\pi} \cdot q_u$$

де q_m – інтенсивність теплового потоку на осі дії джерела тепла.

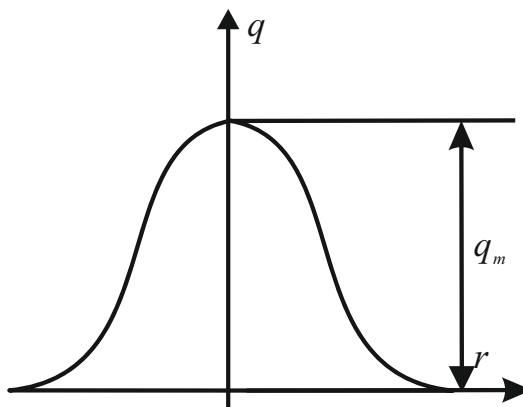


Рисунок 2.4 – Нормально-круговий розподіл теплового потоку джерела тепла з коефіцієнтом зосередженості k .

Здатність зварного з'єднання без руйнування сприймати деформації, викликані термодформаційним циклом зварювання, визначає рівень технологічної міцності металу. Теорія технологічної міцності металів при зварюванні була розроблена проф. М.М. Прохоровим. [35]. Згідно з цією теорією опір зварного з'єднання утворенню гарячих тріщин визначається такими основними факторами, як характер наростання деформації при

охлажденні (темп деформації) зварного з'єднання, пластичність металу в температурному інтервалі крихкості і величина цього інтервалу.

Температурний інтервал крихкості (ТІК) при кристалізації металу обмежений зверху температурою початку зрощування кристалітів, що менше температури ліквідуса, та знизу температурою реального солідуса. У цьому інтервалі температур метал шва перебуває в твердорідкому стані і має низьку пластичність.

Насправді багато металів мають ще один спад пластичності при високих температурах (рис.2.5,*а*). Так для жароміцних нікелевих сплавів характерне утворення підсолідусних тріщин. Виходячи з температури відновлення пластичності сплаву при охолодженні (рис.2.5,*б*), для аналізу вірогідності появи тріщин, виникаючих в охолоджуваному металі, обрано температурний інтервал 1200...1100 °С. [36].

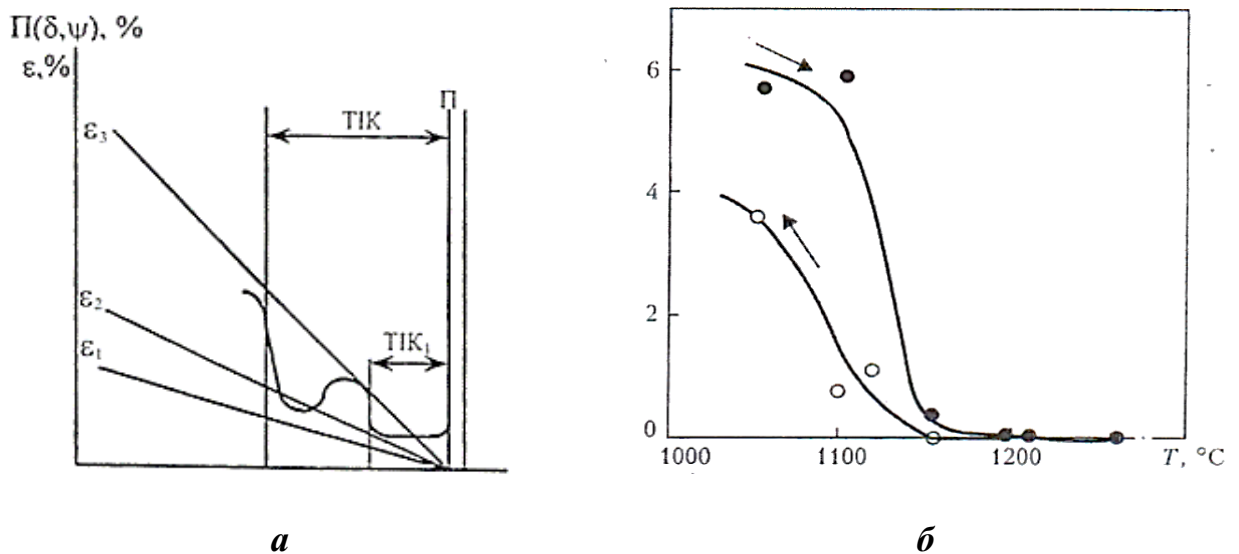
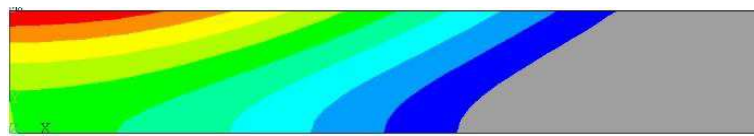


Рисунок 2.5 – Ілюстрація утворення кристалізаційних та підсолідусних тріщин (*а*) й зміна пластичності сплаву ЧС88У при його нагріванні та охолодженні (*б*)

2.3. Комп'ютерне моделювання теплового стану при виправленні дефектів

За результатами моделювання побудовані температурні поля в момент часу після закінчення нагрівання і охолодження до $T_{max}=1200^{\circ}\text{C}$ (рис.2.6),

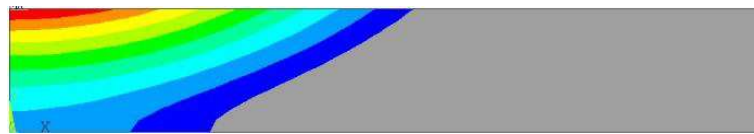
$T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ (рис.2.7), $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (рис.2.8), $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ (рис.2.9),
 $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (рис.2.10).



a



б



в



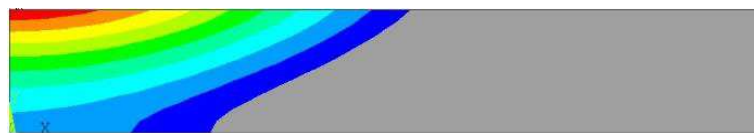
Рисунок 2.6 – Поля розподілу температур в моменти часу після закінчення нагрівання до $T_{max}=1200^{\circ}\text{C}$ при використанні: *a* – ацетиленово-кисневого полум'я; *б* – малоамперної аргонної дуги *в*– мікроплазмової дуги



a



б

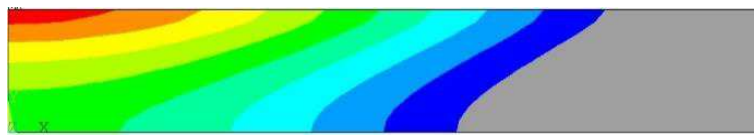


в



Рисунок 2.7 – Поля розподілу температур в моменти часу після закінчення нагрівання до $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ при використанні *a* – ацетиленово-кисневого полум'я; *б* – малоамперної аргонної дуги *в*– мікроплазмової дуги

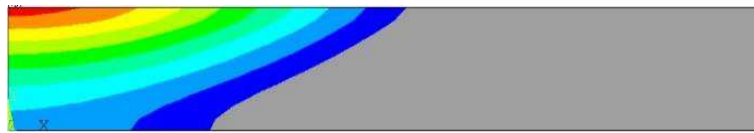
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



a



б



в

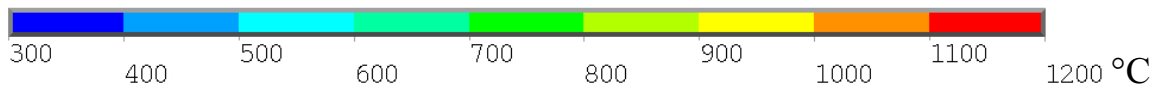


Рисунок 2.8 – Поля розподілу температур в моменти часу після закінчення нагрівання до $T_{max}=1150^{\circ}C$ при використанні *a* – ацетиленово-кисневого полум'я; *б* – малоамперної аргонової дуги *в*– мікроплазмової дуги



a



б



в



Рисунок 2.9 – Поля розподілу температур в моменти часу після закінчення нагрівання до $T_{max}=1125^{\circ}C$ при використанні *a* – ацетиленово-кисневого полум'я; *б* – малоамперної аргонової дуги *в*– мікроплазмової дуги

Аналіз полів розподілу температур (рис.2.6-2.10), в момент часу після закінчення нагрівання показав, що при дії ацетилено-кисневого полум'я протягом 4,4 с максимальна температура на поверхні нагрівання досягає $1204^{\circ}C$ (рис.2.6,*a*). На зворотному боці виробу максимальна температура на осі нагріву становить $680^{\circ}C$. При впливі малоамперної аргонової дуги

максимальна температура у 1195,9 °С (рис.2.6 б), досягається за 2 секунди. На зворотному ж боці максимальна температура осі нагріву 300 °С. При використанні мікроплазмової дуги температура 1207 °С на поверхні нагрівання досягається за 2,5 с. При цьому на зворотному боці температура становить 400 °С (рис.2.6,в). Тобто нагрів мікроплазмовою дугою виконується з більшою біля у 1,7 разів швидкістю в порівнянні з ацетилено-кисневим полум'ям, а температура на зворотному боці при тому пропорційно менше у 1,7 разів. При нагріві малоамперною аргоною дугою швидкість нагріву близько у 1,25 разів більша ніж при використанні мікроплазмової дуги, пропорційно і нижча температура на зворотному боці в 1,3 рази.



а



б



в

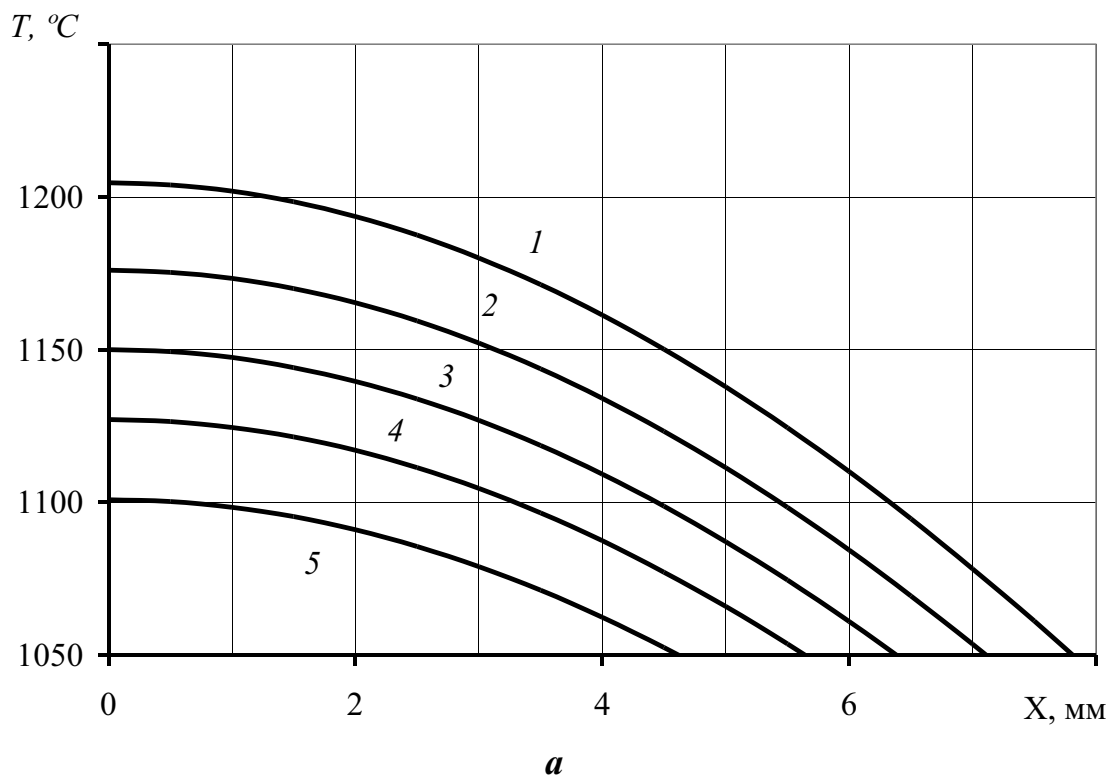


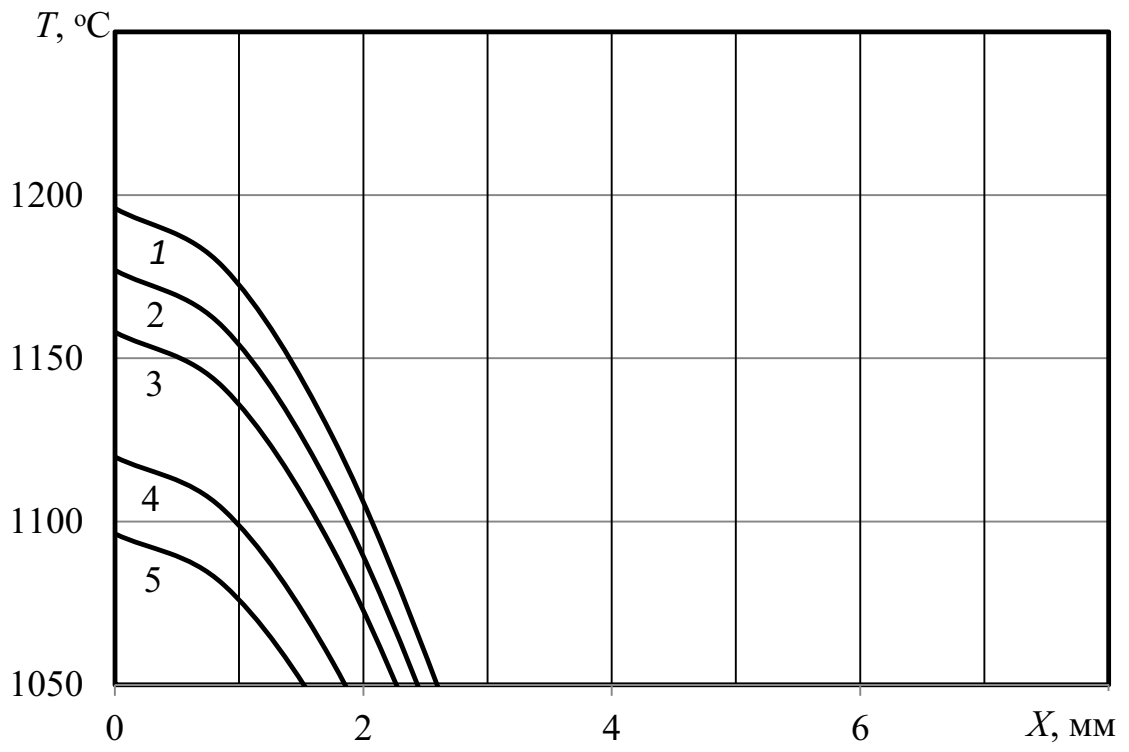
Рисунок 2.10 – Поля розподілу температур в моменти часу після закінчення нагрівання до $T_{max}=1100^{\circ}C$ при використанні **а** – ацетилено-кисневого полум'я; **б** – малоамперної аргонової дуги **в**– мікроплазмової дуги

Для більш повного аналізу температур побудовані епюри розподілу температур вздовж верхньої поверхні зразку (по шляху 1-1) після закінчення нагріву до $1200^{\circ}C$ (1) та після охолодження до $T_{max}=1175^{\circ}C$ (2), $T_{max}=1150^{\circ}C$ (3), $T_{max}=1125^{\circ}C$ (4), $T_{max}=1100^{\circ}C$ (5) при використанні ацетилено-кисневого полум'я (**а**), малоамперної аргонової дуги (**б**) та мікроплазмової дуги (**в**). Відповідно час після закінчення нагрівання складає: для ацетилено-кисневого полум'я 1 – 0 с, 2 – 0,005 с, 3 – 0,015 с, 4 – 0,03 с, 5 – 0,055 с; для

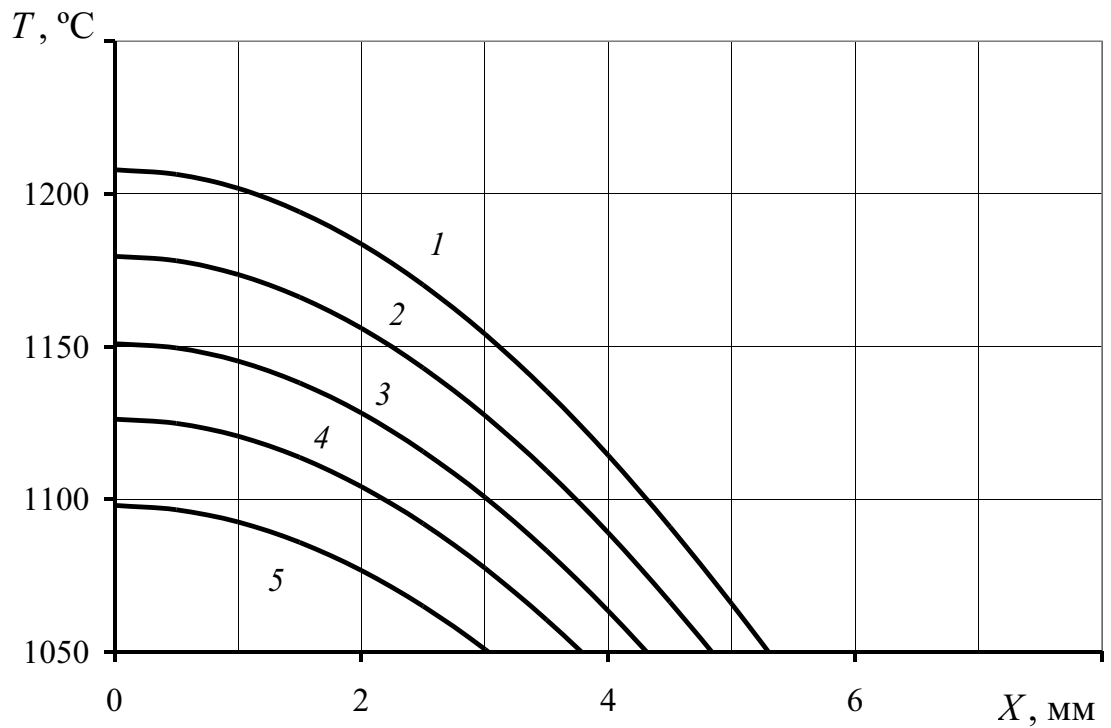
малоамперної аргонної дуги 1 – 0 с, 2 – 0,0025 с, 3 – 0,0025 с, 4 – 0,075 с, 5 – 0,0125 с; для мікроплазмової дуги 1 – 0 с, 2 – 0,0025 с, 3 – 0,0075 с, 4 – 0,015 с, 5 – 0,0275 с (рис.2.11).

Аналіз епюр розподілу температур вздовж лінії 1-1 (рис.2.11) показує, що при використанні ацетиленово-кисневого полум'я радіус (ширина) зони нагріву до температур, при яких пластичність і міцність металу зразка дуже мала (від 1200 °С до 1100 °С) дорівнює 6,32 мм. При використанні в якості джерела мікроплазмової дуги за рахунок більш високої концентрації тепла, радіус (ширина) цієї зони складає 4,36 мм, тобто у 1,45 разів менше. При цьому за використання малоамперної аргонної дуги радіус раніше зазначеної зони дорівнює 2,63, що у 1,8 разів менше ніж при використанні мікроплазмової дуги та 2,7 менше ніж ацетиленово-кисневого полум'я. Під час охолодження співвідношення радіусів зон з температурою вище 1100°С для двох перших способів нагріву залишається близьким до 1,45...1,52. При співвідношенні радіусів зон з температурою вище 1100°С для мікроплазмової дуги та малоамперної аргонної дуги близько 1,8...1,86.





а



б

Рисунок 2.11– Епюри розподілу температур по лінії 1-1 після закінчення нагріву і в процесі охолодження при використанні ацетиленово-кисневого полум'я (*а*) малоамперної аргонної дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Висновки

1 Розглянуто три джерела нагрівання при виправленні _____, обран метод та програмне забезпечення для розробки досліджуваної моделі та моделювання термічної та силової задачі.

2 Досліджено температурний стан при впливі обраних джерел нагрівання.

3 При нагріві малоамперною аргоною дугою швидкість нагріву близько у 1,25 разів більша ніж при використанні мікроплазмової дуги. Нагрів мікроплазмовою дугою виконується з більшою біля у 1,7 разів швидкістю в порівнянні з ацетилено-кисневим полум'ям

4 Радіус зони нагріву до температур, при яких пластичність і міцність металу зразка дуже мала (від 1200 °С до 1100 °С) дорівнює при використанні ацетиленово-кисневого полум'я 6,32 мм, мало амперної аргоною дугою 2,63мм, та при мікроплазмовій дузі 4,36 мм.

					MP 8.132.6121м.04.04.02. ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комп'ютерне моделювання силової задачі при виправленні дефектів лиття сплаву ЧС88У

3.1. Методика комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану

Результати рішення температурної задачі використовувалися в якості граничної умови для розв'язання силової задачі. Використовувався елемент PLANE183. Це 2-D, 8-вузловий або 6-вузловий елемент вищого порядку. Він має поведінку квадратичного переміщення і добре підходить для моделювання нерегулярних сіток (таких як ті, що створюються різними системами CAD / CAM). Цей елемент визначається вісьмома вузлами або шістьма вузлами. Він може використовуватися як плоский елемент (плоска напруга, плоска деформація та узагальнена плоска деформація) або як осісиметричний елемент (із крученням або без нього). У більшості випадків елемент має два ступені свободи на кожному вузлі: переклади у вузлових напрямках x та y . Однак для осісиметричного з торсіонним елементом елемент має три ступені свободи в кожному вузлі: переклади у вузлових напрямках x та y та обертання u напрямку вузла u .

Елемент відрізняється пластичністю, гіпереластичністю, повзучістю, посиленням напруги, великим відхиленням та великими деформаційними можливостями. Він також має змішану формулювальну здатність для імітації деформацій майже нестисливих еластопластичних матеріалів та повністю нестисливих гіпереластичних матеріалів з його допомогою можна моделювати нерегулярні сітки.

Вісім вузлів в цьому елементі мають два ступені свободи в кожному вузлі: переміщення в напрямку осей X і Y вузлової системи координат. Даний елемент може застосовуватися для моделювання осесиметричного напруженого стану або для моделювання плоского деформованого стану, плоского напруженого стану і узагальненого плоского деформованого стану.

					MP 8.132.6121м.04.04.03. ПЗ	Арк. 39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Елемент має властивості гіперпружних пластичних та деформацій повзучості, збільшення жорсткості при наявності навантажень, великих деформацій і великих переміщень. Геометрія, розташування вузлів і система координат перетину кінцевого елемента показані на рис. 3.1.

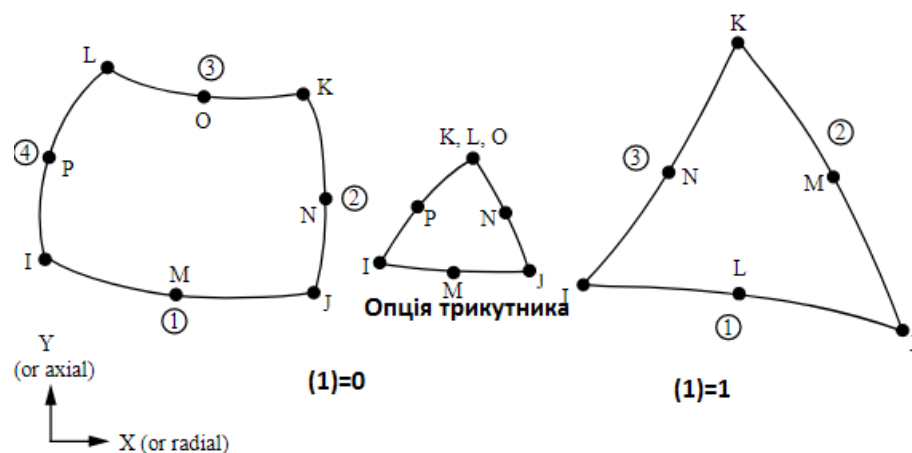


Рисунок 3.1 Геометрія, розташування вузлів і систем координат кінцевого елемента PLANE183

Розміри моделі і параметри сітки скінчених елементів використовувалися ті ж самі, що і в температурній задачі.

Силова задача розв'язувалася з урахуванням нагріву зразка до 1200 °C і подальшого охолодження до кімнатної температури. В якості граничної умови використовувалося температурне поле у відповідний момент часу з теплової задачі.

При оцінці вірогідності виникнення тріщин в процесі охолодження використовували три основних фактори:

- пластичні деформації подовження в зоні нагріву,
- рівень максимальних напружень розтягу у зоні нагріву, якими являються головні напруження σ_1 ,
- коефіцієнт жорсткості напруженого стану

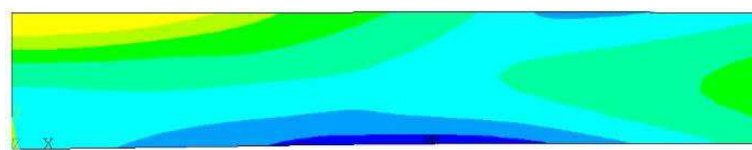
$$K_{ж} = \sigma_1 / \sigma_{\text{ЭКВ}},$$

де $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ - еквівалентні напруження, в зоні нагріву.

					MP 8.132.6121м.04.04.03. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Комп'ютерне моделювання напруженого стану при виправленні дефектів

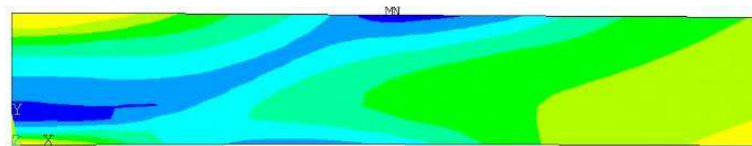
Як відомо [30], при $\kappa_{ж} < 1$ міцність металу знижується, а пластичність підвищується в порівнянні з лінійним напруженим станом, при якому проводяться механічні випробування і визначаються характеристики міцності і пластичності. Імовірність крихкого руйнування (утворення тріщин) знижується або відсутня, якщо метал пластичний ($\delta > 0$). При $\kappa_{ж} = 1$ міцність і пластичність його визначаються стандартними характеристиками, ймовірність утворення тріщин тим менше, чим більше відносне подовження δ . При $\kappa_{ж} \Rightarrow 1$ міцність металу підвищується, а пластичність знижується в порівнянні з лінійним напруженим станом. Імовірність крихкого руйнування (утворення тріщин) підвищується, вона тим вище, чим менше метал пластичний (δ наближається до 0).



a



б



в

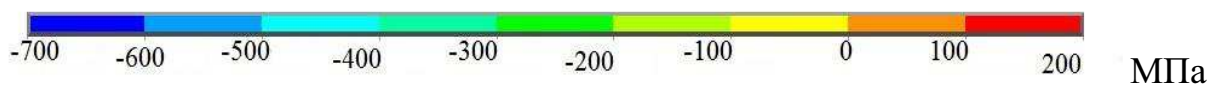
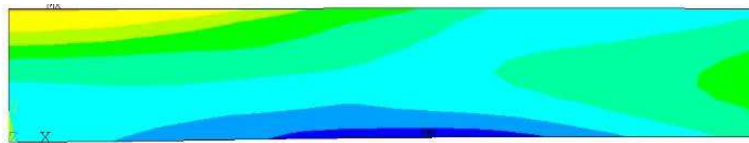
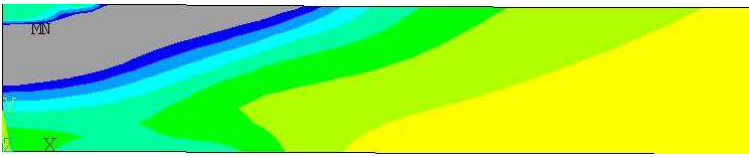


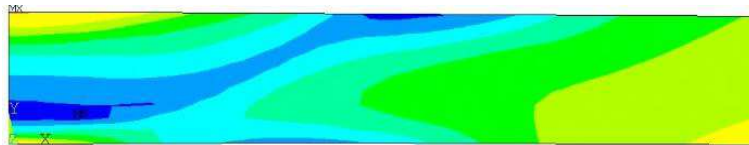
Рисунок 3.2 – Поля розподілу радіальних напружень σ_x в момент часу після закінчення нагрівання при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



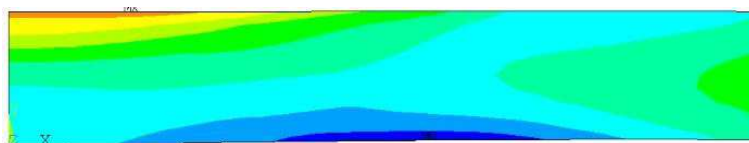
б



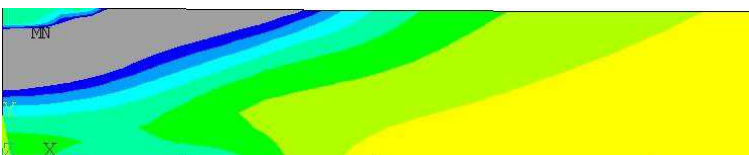
в



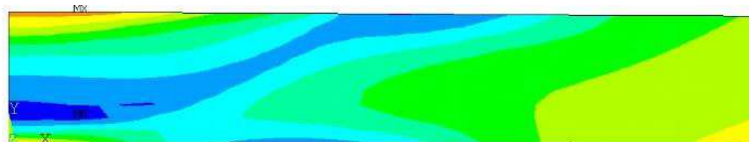
Рисунок 3.3 – Поля розподілу радіальних напружень σ_x в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1175^\circ\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонової дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



б



в

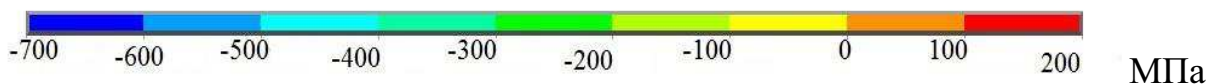
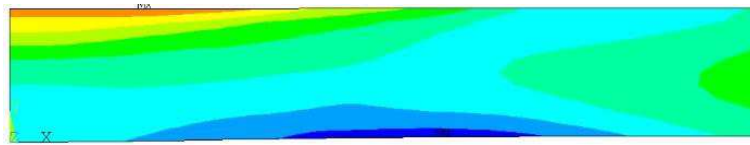
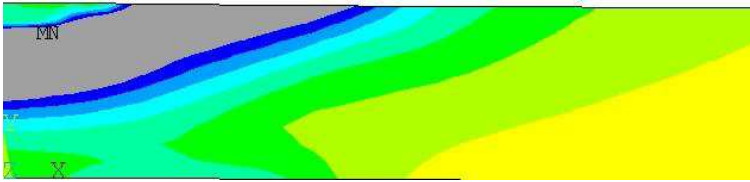


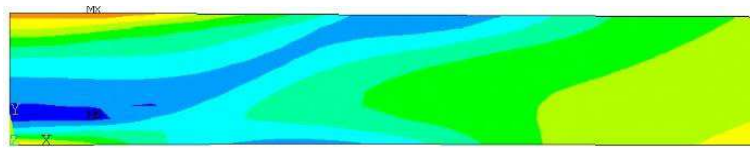
Рисунок 3.4 – Поля розподілу радіальних напружень σ_x в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1150^\circ\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонової дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



б



в

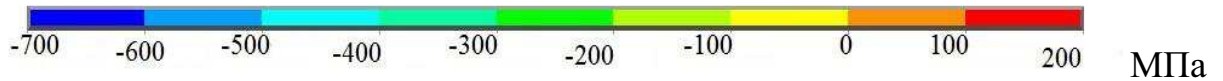
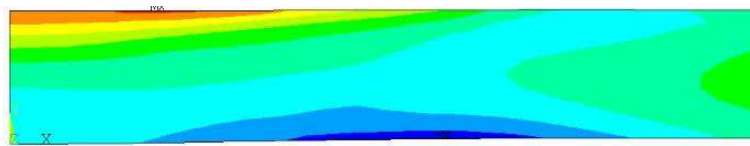
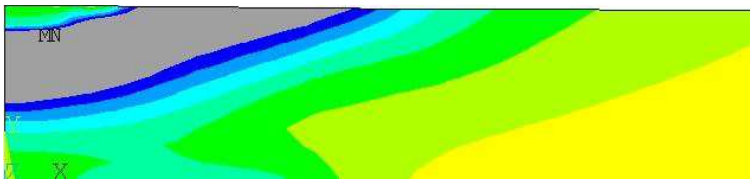


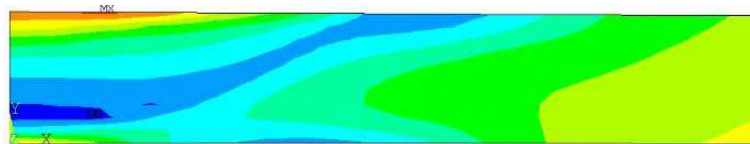
Рисунок 3.5 – Поля розподілу радіальних напружень σ_x в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (***a***) полум'я малоамперної аргонової дуги (***б***) й мікроплазмової дуги (***в***)



a



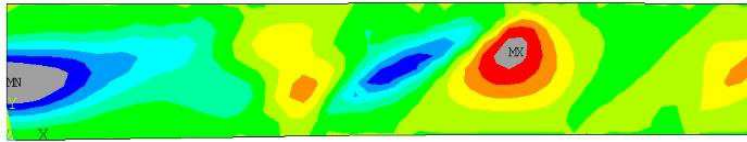
б



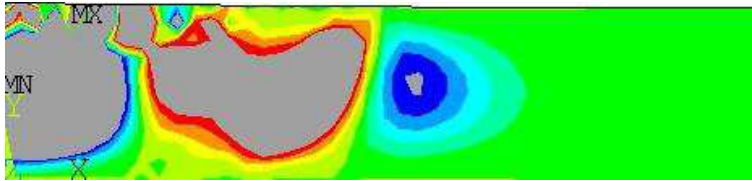
в



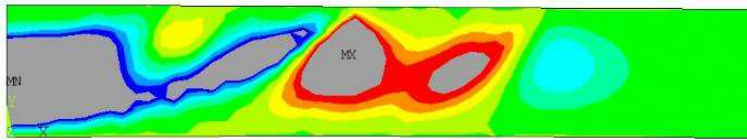
Рисунок 3.6 – Поля розподілу радіальних напружень σ_x в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1110^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (***a***) полум'я малоамперної аргонової дуги (***б***) й мікроплазмової дуги (***в***)



a



б



в

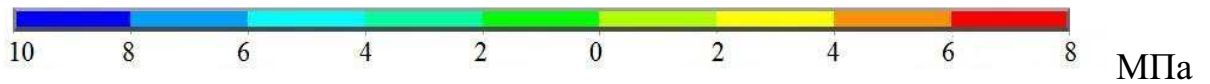
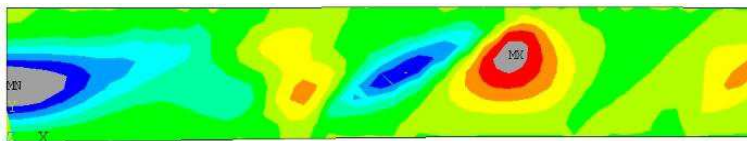
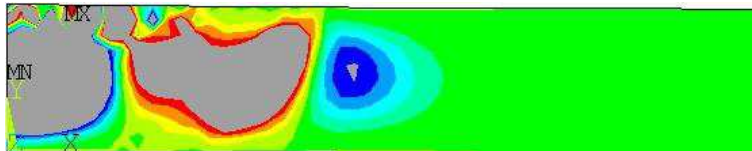


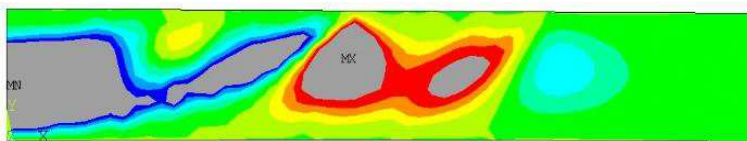
Рисунок 3.7 – Поля розподілу осьових напружень σ_y в моменти часу після закінчення нагрівання при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



б



в

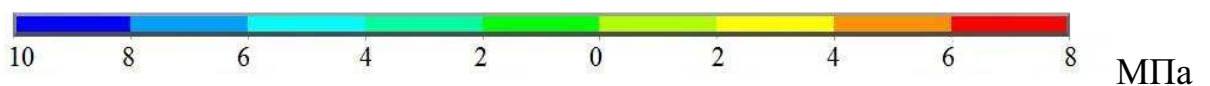
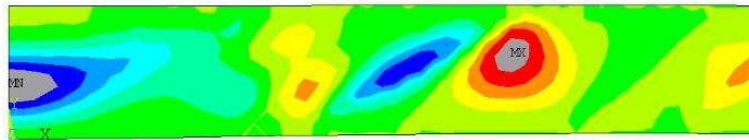
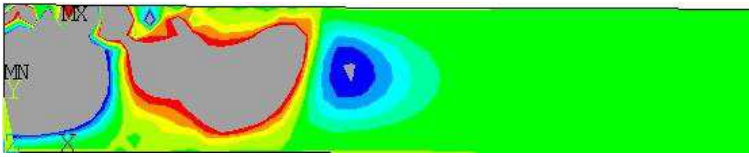


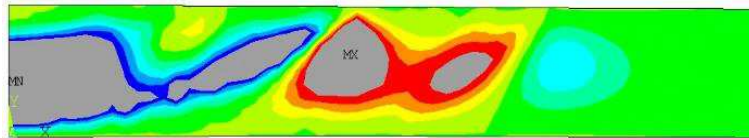
Рисунок 3.8 – Поля розподілу осьових напружень σ_y в моменти часу при охолодженні до $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



б



в

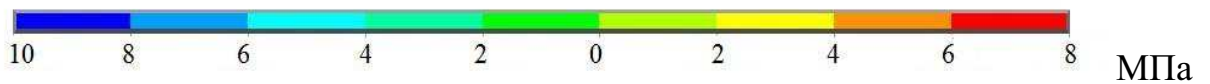
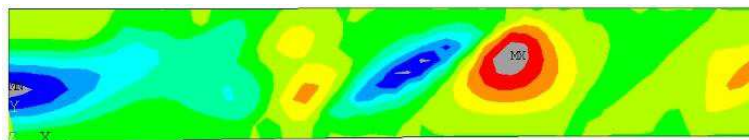
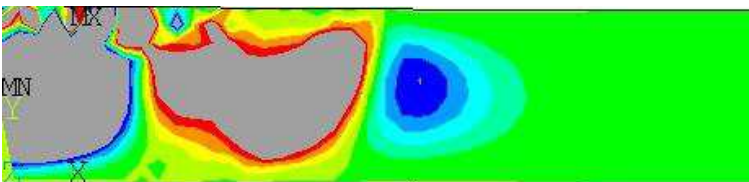


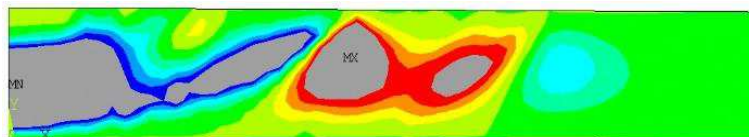
Рисунок 3.9 – Поля розподілу осьових напружень σ_y в моменти часу при охолодженні до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



б



в

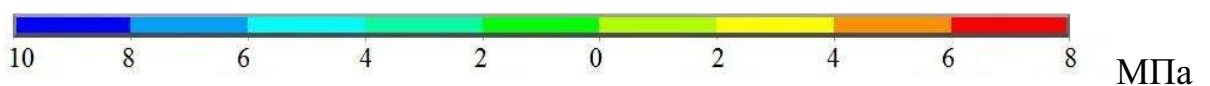
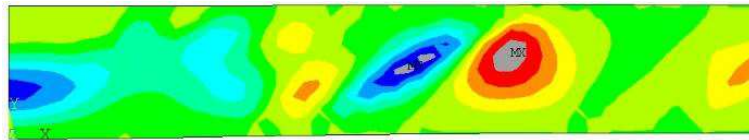
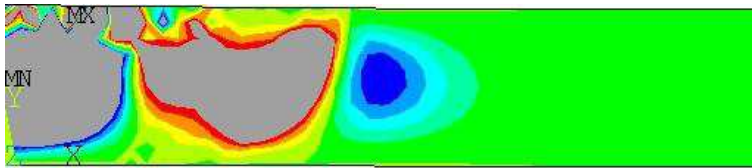


Рисунок 3.10 – Поля розподілу осьових напружень σ_y в моменти часу при охолодженні до $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)

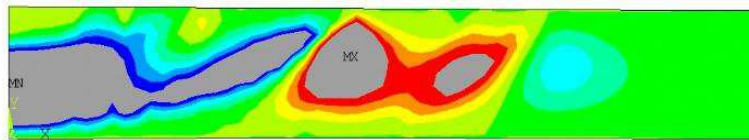
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



a



б



в

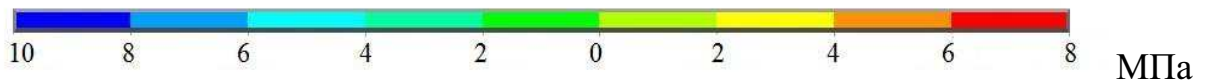
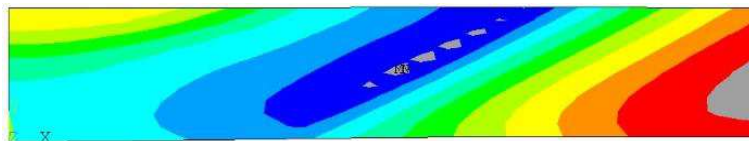
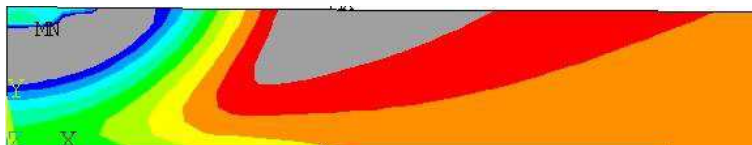


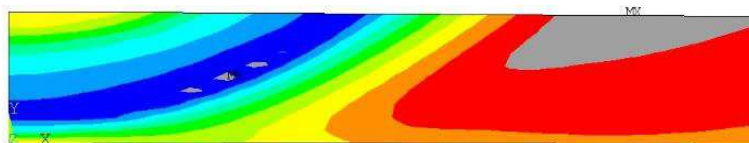
Рисунок 3.11 – Поля розподілу осьових напружень σ_y в моменті часу при охолодженні до $T_{max}=1110^\circ\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонової дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



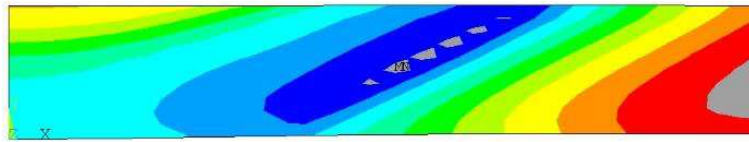
б



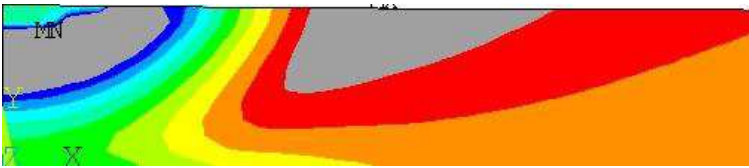
в



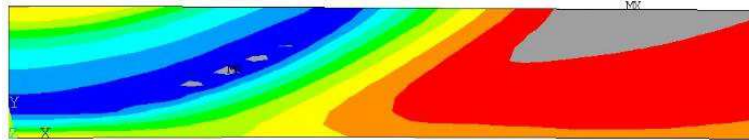
Рисунок 3.12 – Поля розподілу окружних напружень σ_z в момент часу після закінчення нагрівання при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонової дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



б



в

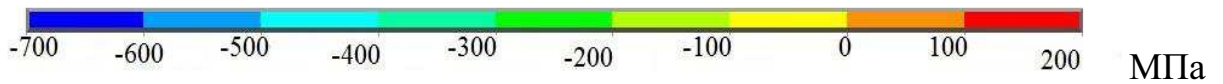
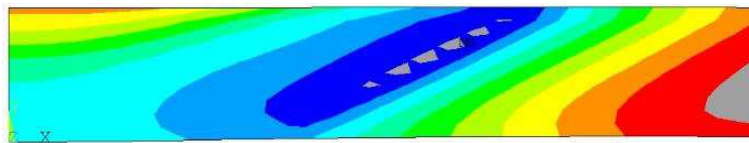
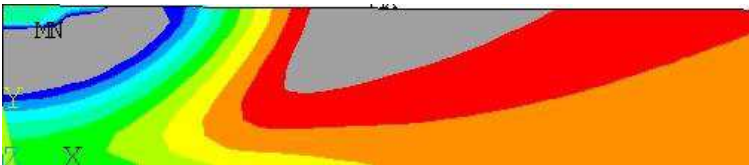


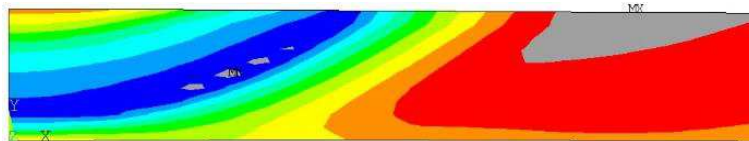
Рисунок 3.13 – Поля розподілу окружних напружень σ_z в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонної дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



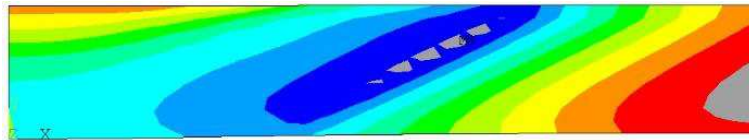
б



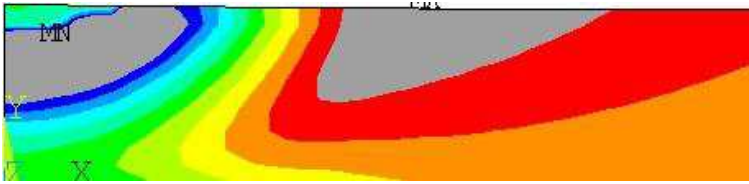
в



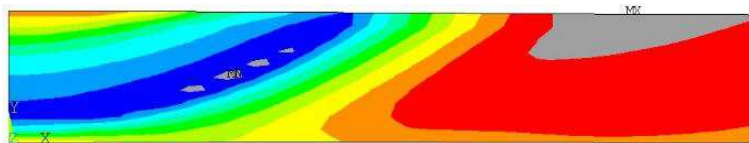
Рисунок 3.14 – Поля розподілу окружних напружень σ_z в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонної дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



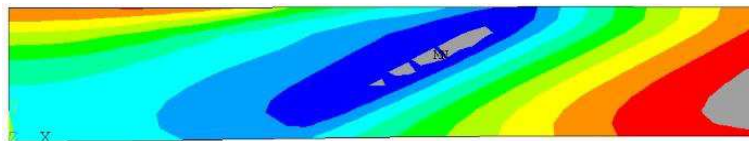
б



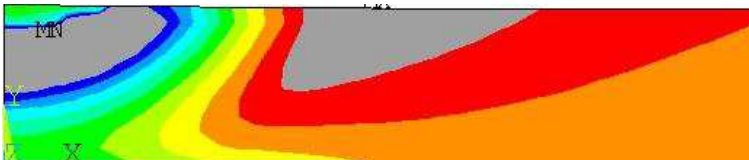
в



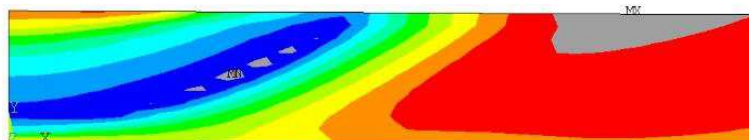
Рисунок 3.15 – Поля розподілу окружних напружень σ_z в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (**a**) полум'я малоамперної аргонної дуги (**б**) й мікроплазмової дуги (**в**)



a



б



в

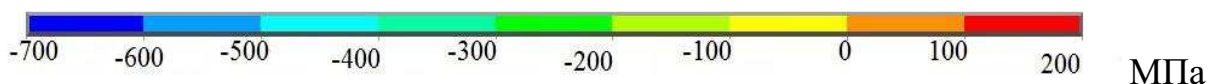
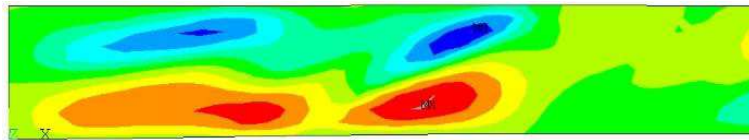
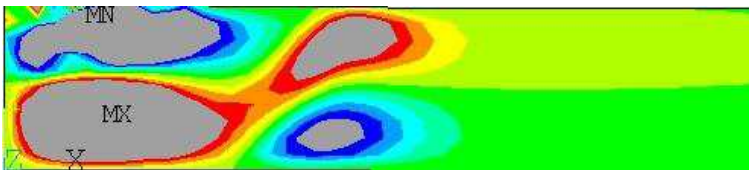


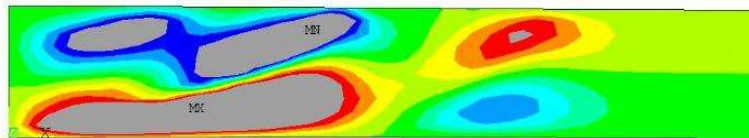
Рисунок 3.16 – Поля розподілу окружних напружень σ_z в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1110^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (**a**) полум'я малоамперної аргонної дуги (**б**) й мікроплазмової дуги (**в**)



a



б



в

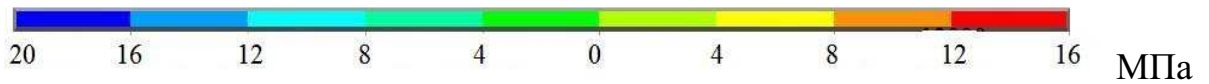
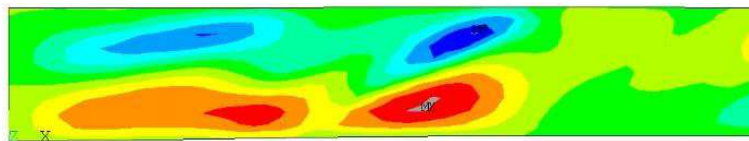
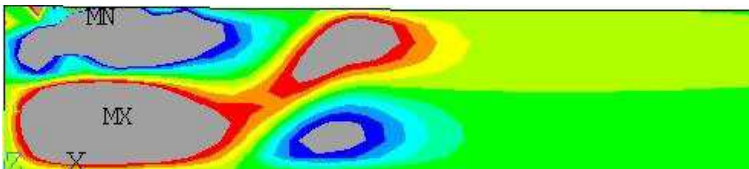


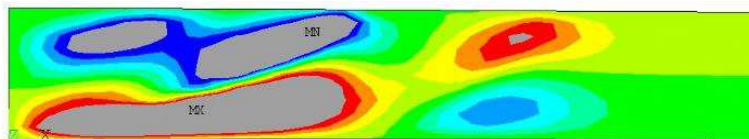
Рисунок 3.17 – Поля розподілу дотичних напружень τ_{xy} в моменти часу після закінчення нагрівання при використанні ацетиленово-кисневого (***a***) полум'я малоамперної аргонної дуги (***б***) й мікроплазмової дуги (***в***)



a



б



в

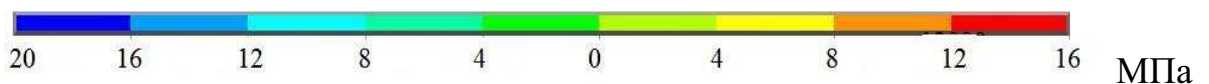
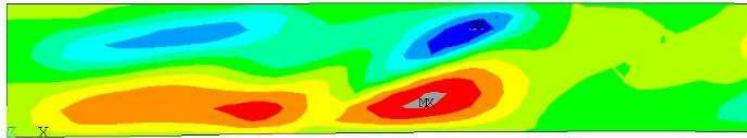
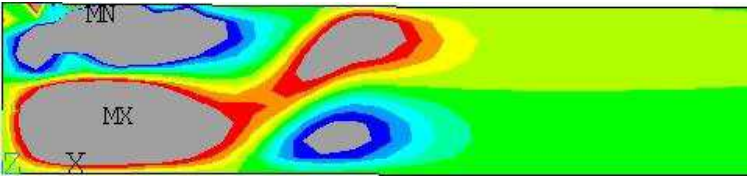


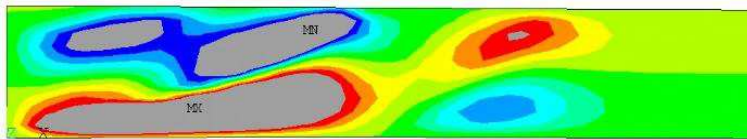
Рисунок 3.18 – Поля розподілу дотичних напружень τ_{xy} в моменти часу при охолодженні до $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (***a***) полум'я малоамперної аргонної дуги (***б***) й мікроплазмової дуги (***в***)



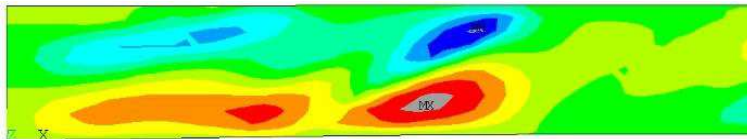
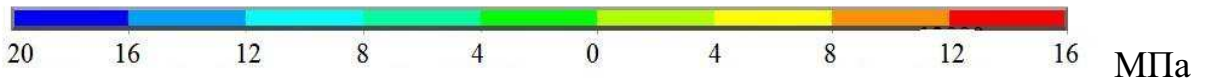
a



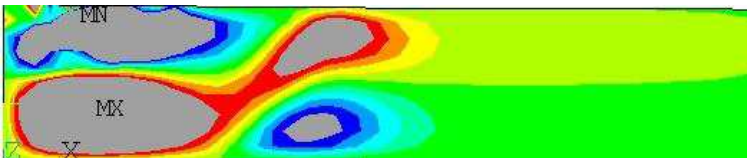
б



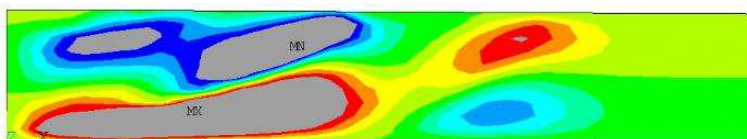
в



a



б



в

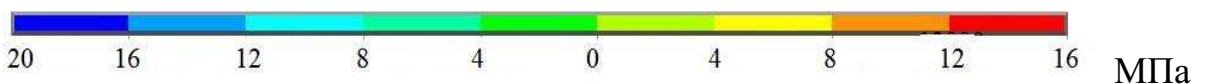
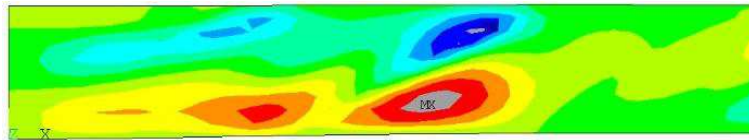
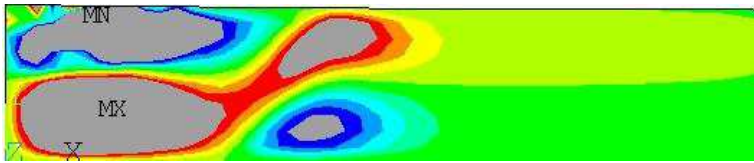


Рисунок 3.19 – Поля розподілу дотичних напружень τ_{xy} в моменти часу при охолодженні до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (**a**) полум'я малоамперної аргонної дуги (**б**) й мікроплазмової дуги (**в**)

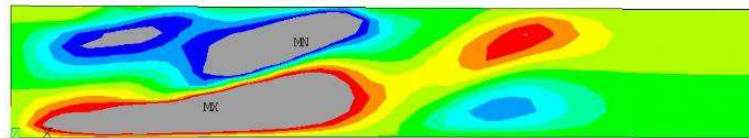
Рисунок 3.20 – Поля розподілу дотичних напружень τ_{xy} в моменти часу при охолодженні до $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (**a**) полум'я малоамперної аргонної дуги (**б**) й мікроплазмової дуги (**в**)



a



б



в

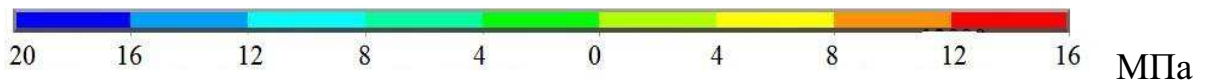
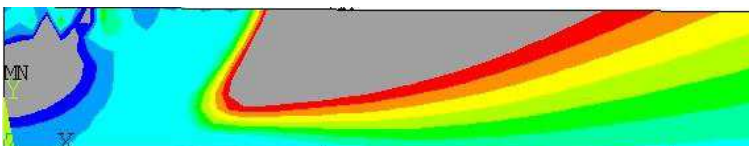


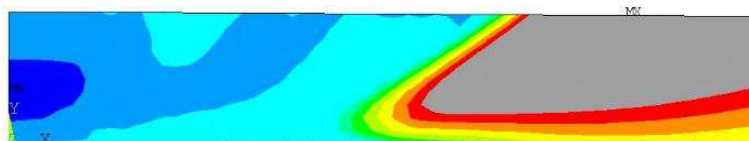
Рисунок 3.21 – Поля розподілу дотичних напружень τ_{xy} в моменті часу при охолодженні до $T_{max}=1110^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (***a***) полум'я малоамперної аргонової дуги (***б***) й мікроплазмової дуги (***в***)



a



б



в

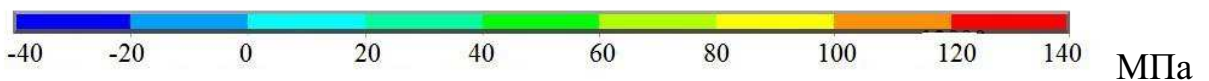
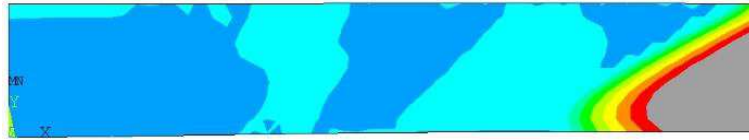
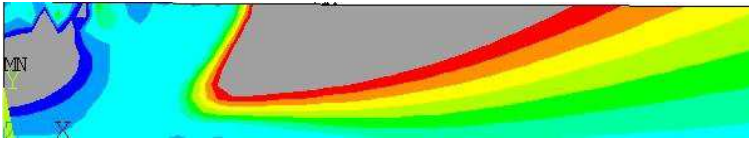


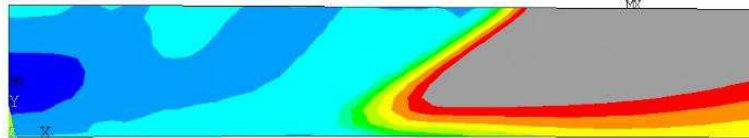
Рисунок 3.22 – Поля розподілу головних σ_l напружень в момент часу після закінчення нагрівання при використанні ацетиленово-кисневого (***a***) полум'я малоамперної аргонової дуги (***б***) й мікроплазмової дуги (***в***)



a



б



в

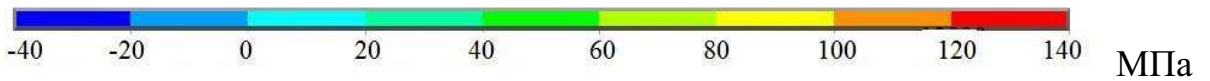
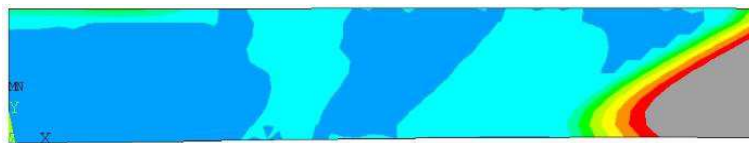
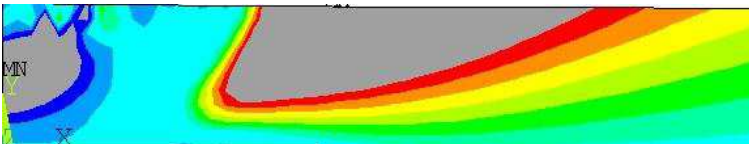


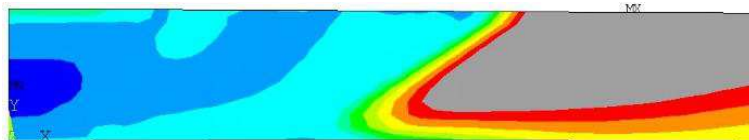
Рисунок 3.23 – Поля розподілу головних σ_1 напружень в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



б



в

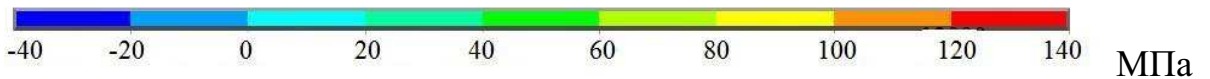
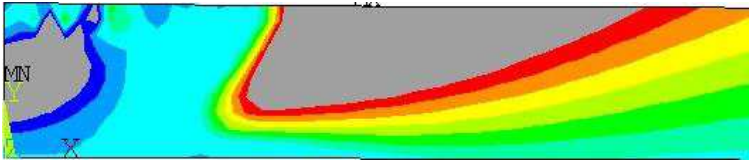


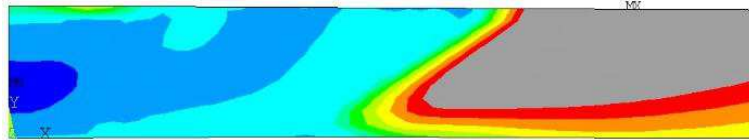
Рисунок 3.24 – Поля розподілу головних σ_1 напружень в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



б



в

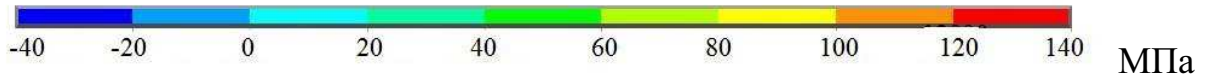
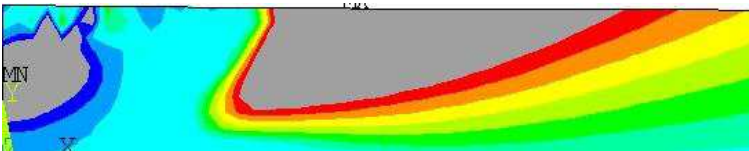


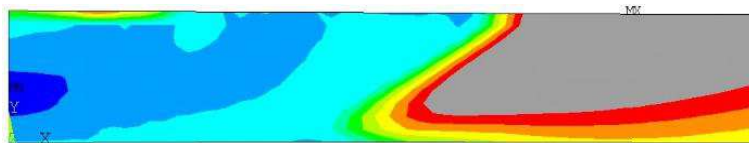
Рисунок 3.25 – Поля розподілу головних σ_I напружень в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



б



в

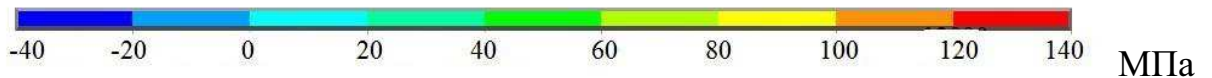
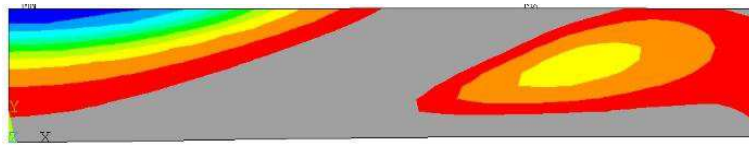
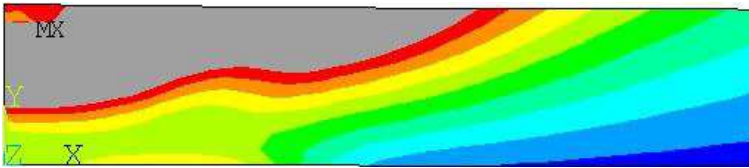


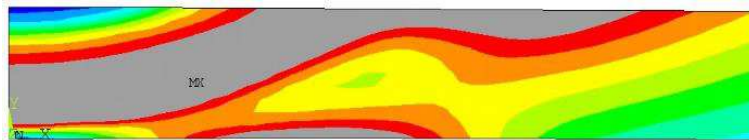
Рисунок 3.26 – Поля розподілу головних σ_I напружень в момент часу при охолодженні до $T_{max}=1110^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (*a*) полум'я малоамперної аргонової дуги (*б*) й мікроплазмової дуги (*в*)



a



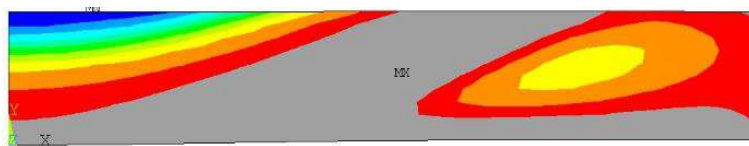
б



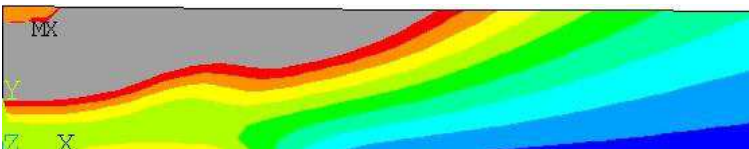
в



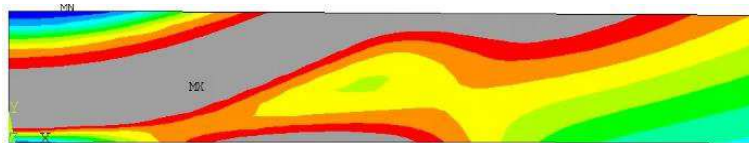
Рисунок 3.27 – Поля розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в моменті часу після закінчення нагрівання при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонової дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



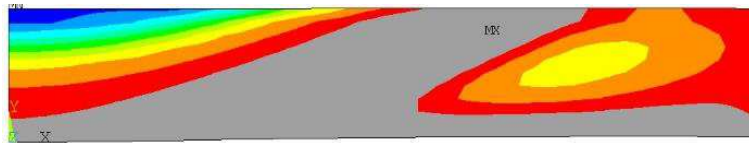
б



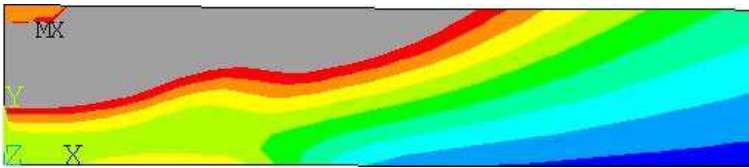
в



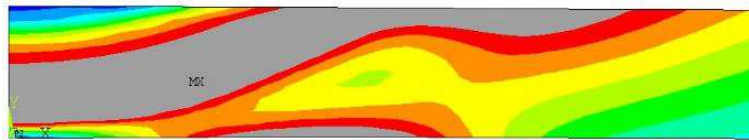
Рисунок 3.28 – Поля розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в моменті часу при охолодженні до $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонової дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



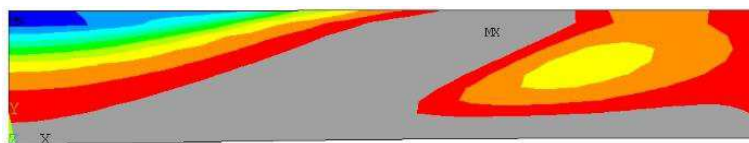
б



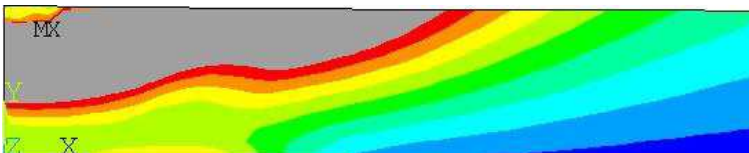
в



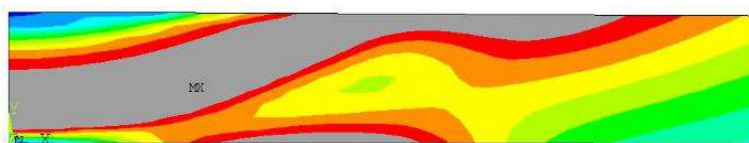
Рисунок 3.29 – Поля розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в моменті часу при охолодженні до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонної дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



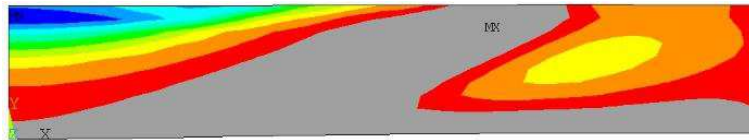
б



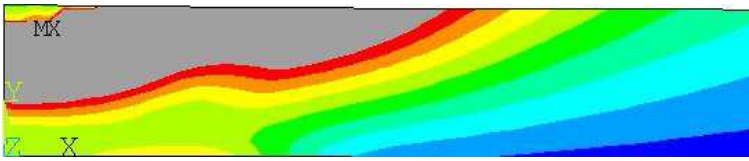
в



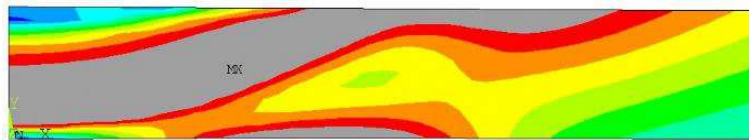
Рисунок 3.30 – Поля розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в моменті часу при охолодженні до $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонної дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)



a



б



в



Рисунок 3.31 – Поля розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ в моменті часу при охолодженні до $T_{max}=1110^{\circ}\text{C}$ при використанні ацетиленово-кисневого (а) полум'я малоамперної аргонової дуги (б) й мікроплазмової дуги (в)

3.3 Порівняння результатів

Аналіз полів напружень, що виникають в процесі охолодження після закінчення нагрівання і до максимальної температури $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.2...3.31), показав, що характер їх розподілу практично не змінюється, як при нагріві ацетиленово-кисневим полум'ям, так і малоамперною аргоною дугою, та мікроплазмовою дугою. При тому розподіл у першому варіанті більш рівномірний, ніж у інших двох. В зоні нагрівання (поблизу осі зразка) максимальні напруження зосереджені на верхній поверхні зразка (по лінії 1-1).

Епюри розподілу радіальних σ_x і головних σ_I напружень вздовж верхній поверхні зразка в момент закінчення нагріву (1) і в процесі охолодження до температур $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ (2), $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (5) при використанні ацетиленово-кисневого полум'я й мікроплазмової дуги показано на рисунках 3.32 і 3.33. Там же пунктиром нанесено границі зон нагріву до температури 1100°C в відповідні моменту часу. За використання

малоамперної аргонової дуги данні напруження менші ніж потенціально небезпечні, тому епюри данного методу не розглядається.

Аналіз епюр показує, що небезпека (можливість) виникнення тріщин виникає вже при охолодженні зони нагріву до температури 1175°C, коли поблизу центру нагріву виникають невеликі (біля 5 МПа) напруження розтягу. В процесі охолодження рівень напружень розтягу помітно зростає, досягаючи 45, 80 і 120 МПа при зниженні максимальної температури до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (5) відповідно, зростає вірогідність виникнення тріщин.

При цьому рівень напружень при нагріванні ацетиленово-кисневим полум'ям й мікроплазмовою дугою мало відрізняється, а радіус зони цих напружень при нагріві ацетиленово-кисневим полум'ям у 2,3 рази більший, ніж при нагріві мікроплазмовою дугою (рис. 3.34 і 3.35). По мірі зниження температури радіус зони розтягу зростає і перевищує 8мм при нагріві ацетиленово-кисневим полум'ям і не більше 7 мм при нагріві мікроплазмовою дугою, але небезпечна з точки зору утворення тріщин зона навпаки зменшується, наближаючись до 0. При нагріві ж малоамперною аргоновою дугою радіальні та головні напруження, в зоні нагріву, не досягають значень, які можуть призвести до виникнення тріщин, як ми можемо бачити на рисунках 3.2-3.6, 22-26.

Таким чином, напруження розтягу перевищують границю плинності при охолодженні вже до максимальних температур $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), в результаті чого виникають пластичні деформації розтягу (рис. 3.36).

Порівняння епюр пластичних деформацій при двох варіантах нагріву показує, що при усіх температурах в процесі охолодження рівень максимальних радіальних пластичних деформацій ϵ_x в центрі зони нагріву при застосуванні ацетиленово-кисневого полум'я декілька менший (на 17 %) ніж при мікроплазмової дуги, що зменшує вірогідність утворення тріщин. Аналогічна картина і з пластичними окружними деформаціями ϵ_z (рис. 3.37), вони також відсутні при використанні малоамперною аргоновою дугою та

					MP 8.132.6121м.04.04.03. ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

менше при нагріві ацетиленово-кисневим полум'ям ніж мікроплазмовою дугою тому вірогідність утворення тріщин також менше.

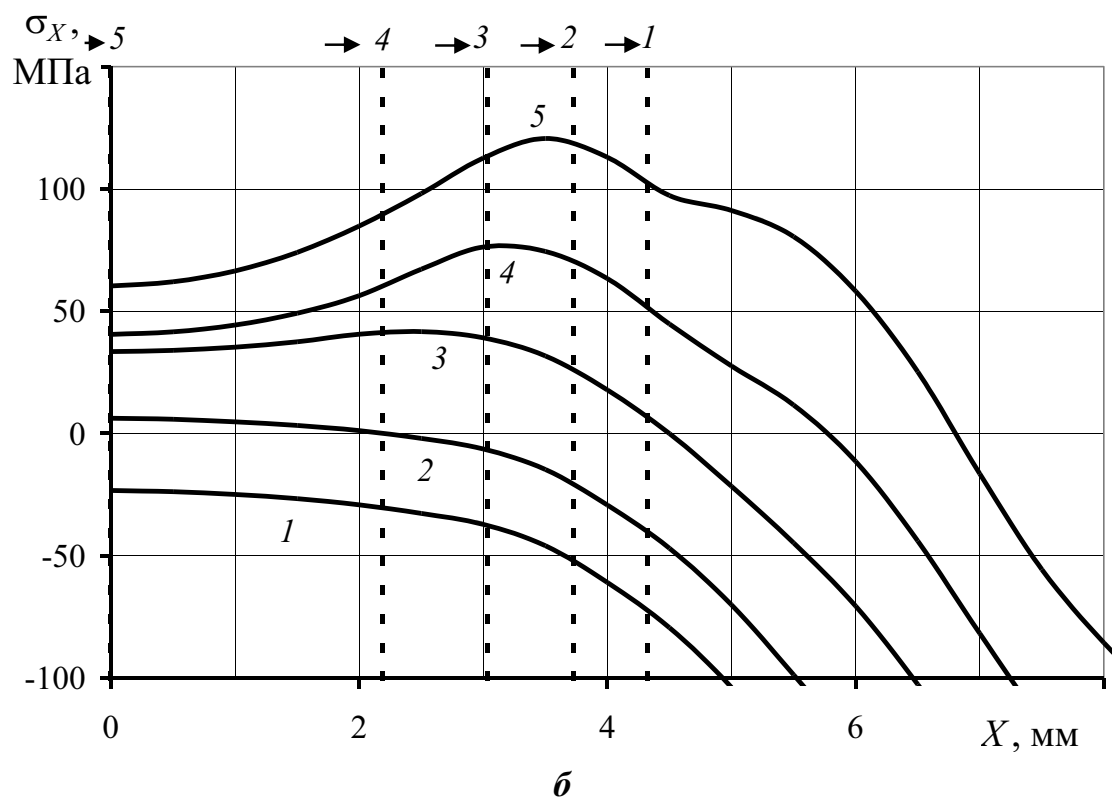
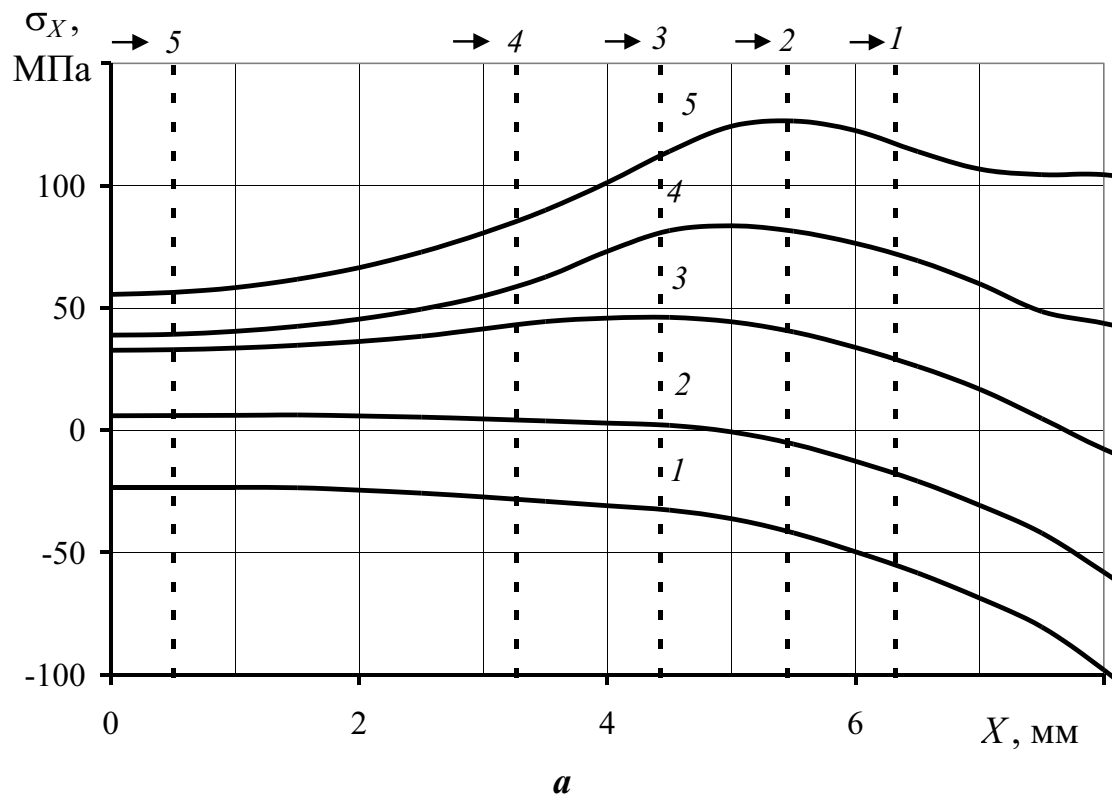


Рисунок 3.34 – Епюри розподілу радіальних напружень σ_x по лінії 1-1 в момент закінчення нагріву (1) і в процесі охолодження: $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ (2), $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (5) при використанні ацетиленово-кисневого полум'я (а) й мікроплазмової дуги (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

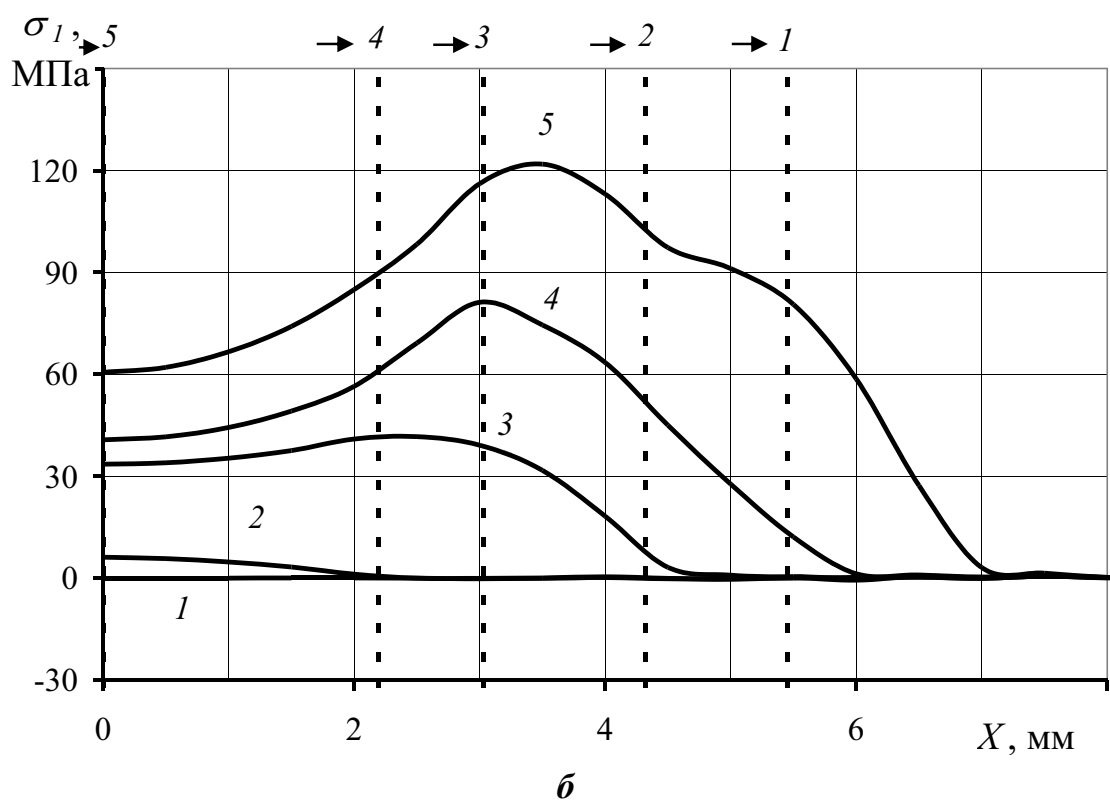
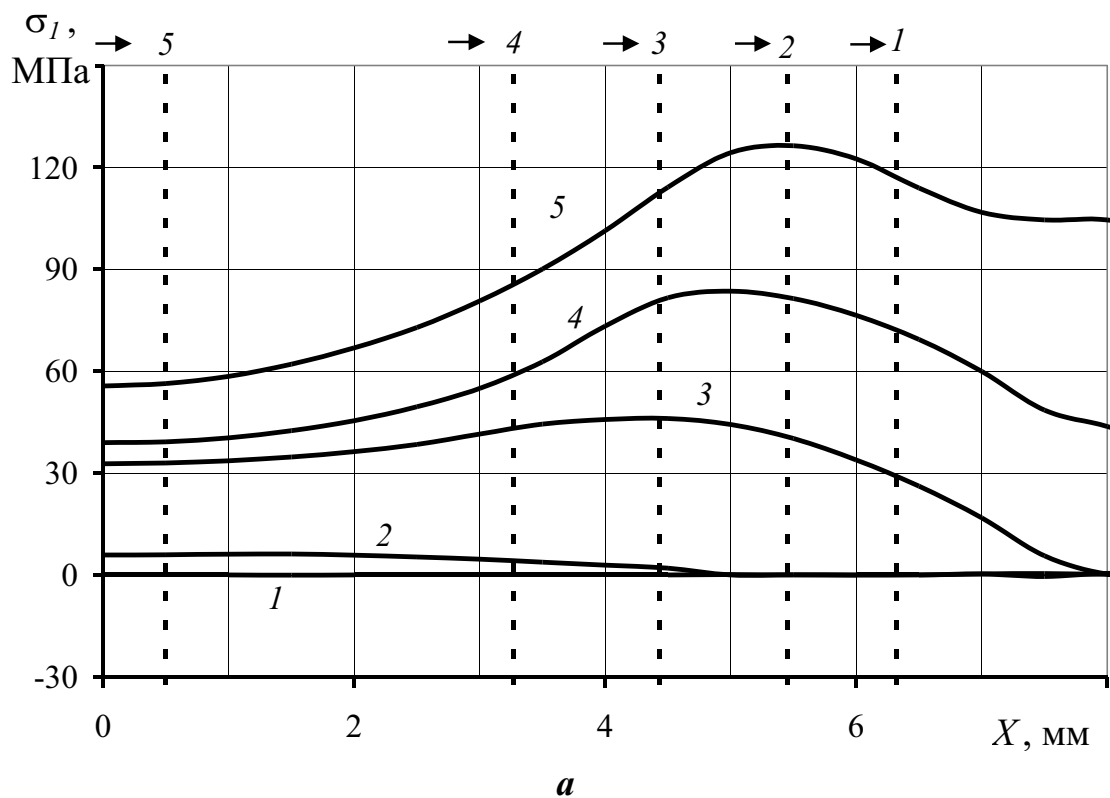


Рисунок 3.35 – Епюри розподілу напружень σ_1 по лінії 1-1 в момент закінчення нагріву (1) і в процесі охолодження: $T_{max}=1175^\circ\text{C}$ (2), $T_{max}=1150^\circ\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^\circ\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^\circ\text{C}$ (5) при використанні ацетиленово-кисневого полум'я (а) й мікроплазмової дуги (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

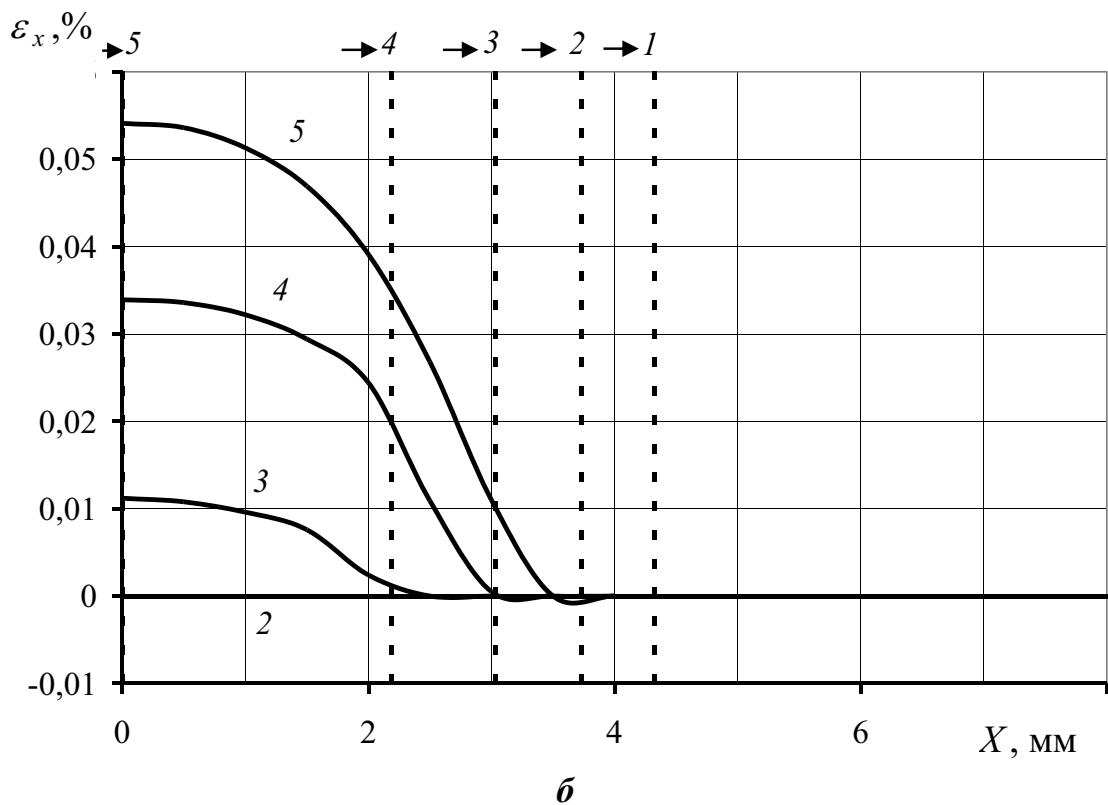
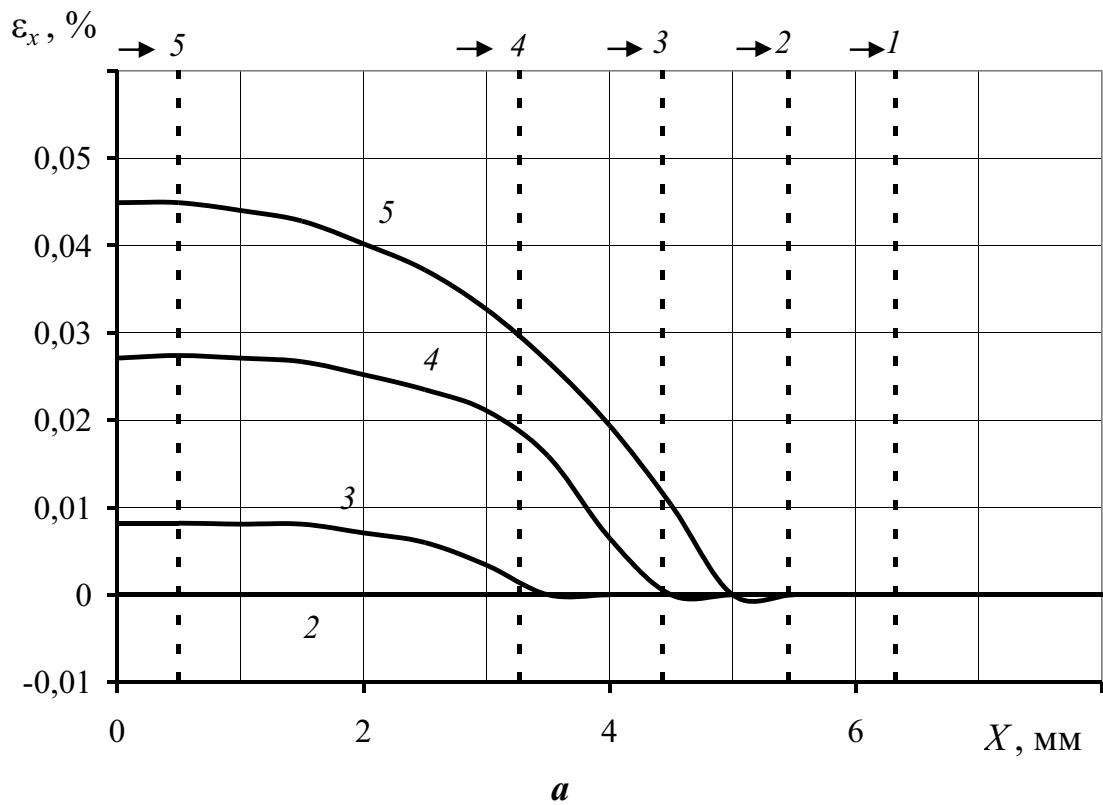


Рисунок 3.36 – Епюри розподілу радіальних пластичних деформацій ε_x по лінії 1-1 в момент закінчення нагріву (1), $T_{max}=1175^\circ\text{C}$ (2), $T_{max}=1150^\circ\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^\circ\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^\circ\text{C}$ (5) при використанні ацетиленово-кисневого полум'я (а) й мікроплазмової дуги (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

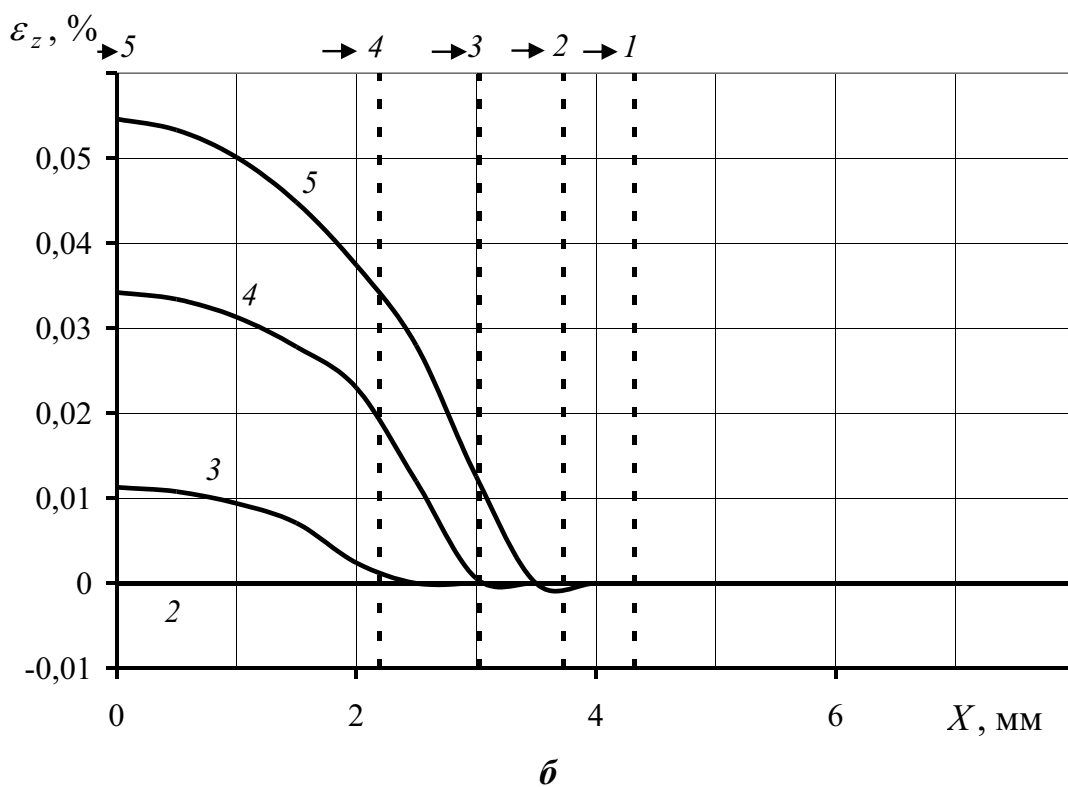
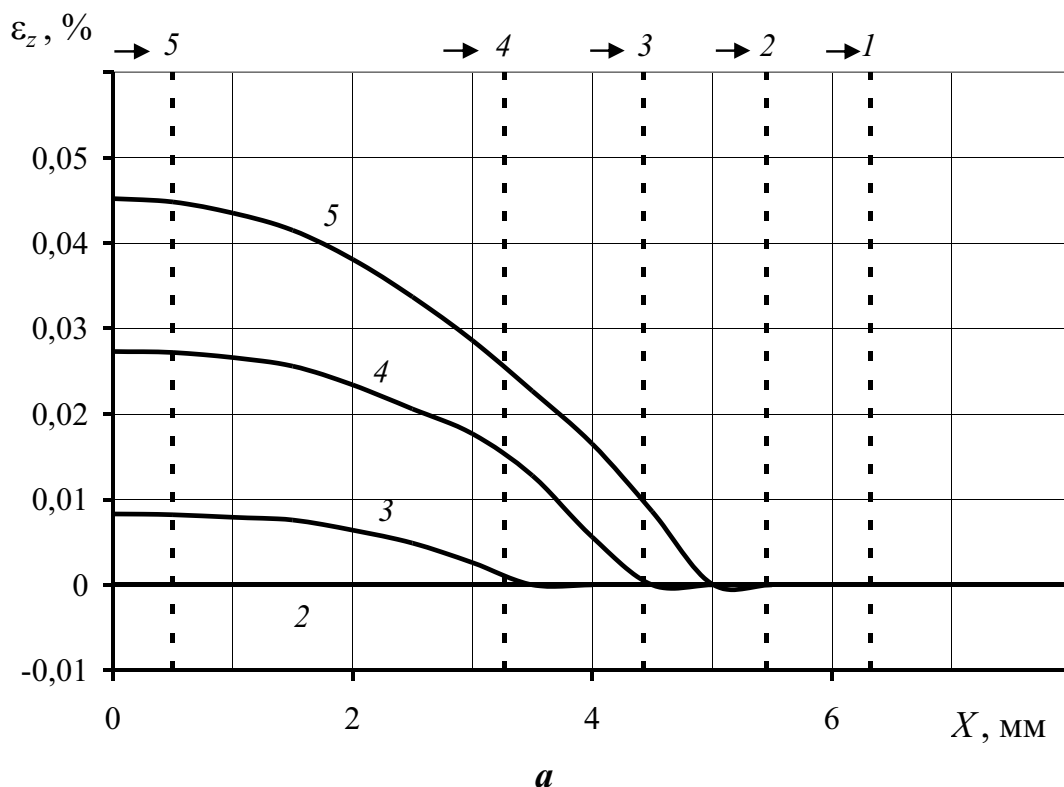


Рисунок 3.37 – Епюри розподілу окружних пластичних деформацій ε_z по лінії 1-1 в момент закінчення нагріву (1), $T_{max}=1175^\circ\text{C}$ (2), $T_{max}=1150^\circ\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^\circ\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^\circ\text{C}$ (5) при використанні ацетиленово-кисневого полум'я (а) й мікроплазмової дуги (б)

З урахуванням максимальних головних напружень розтягу σ_l (рис. 3.35) і еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ (рис. 3.38) побудовано епюри розподілу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

коефіцієнтів жорсткості $K_{жс} = \sigma_1 / \sigma_{екв}$ вздовж верхній поверхні зразка (рис. 3.39).

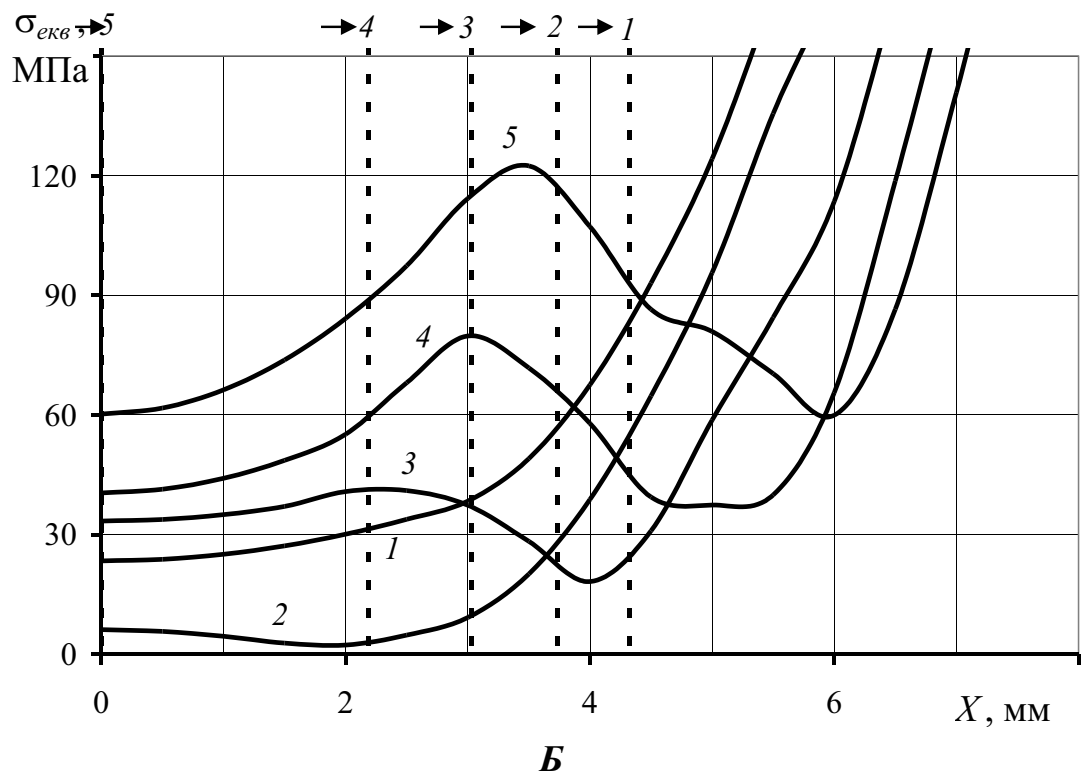
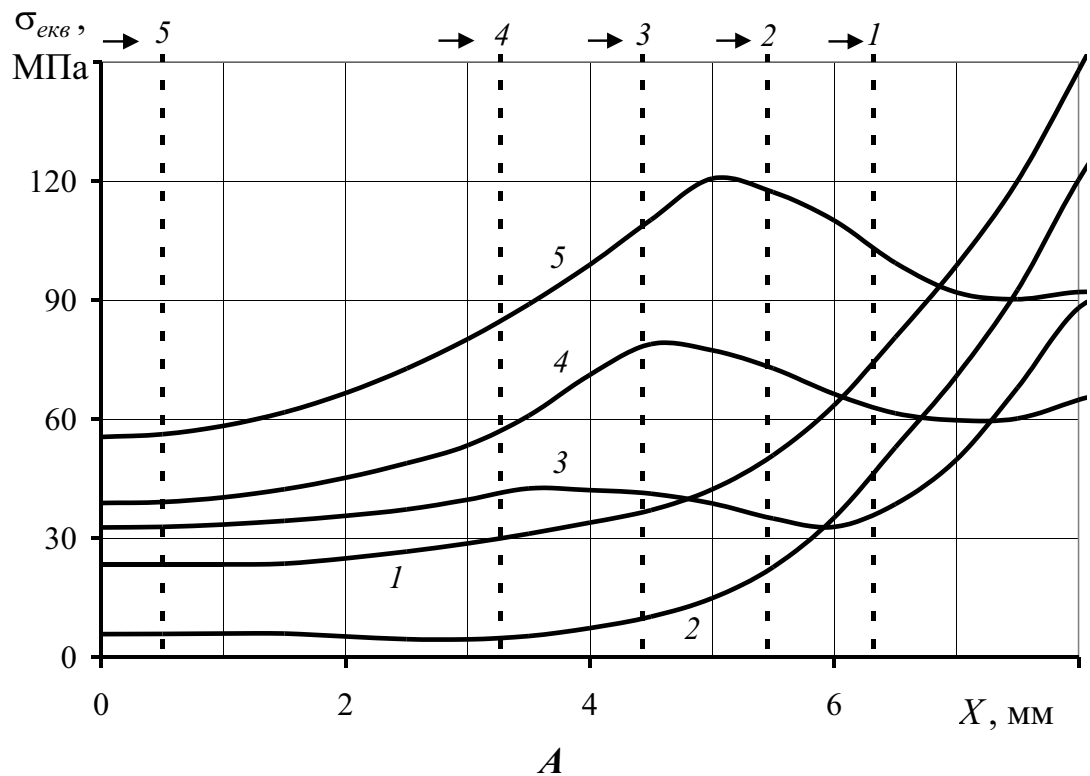


Рисунок 3.38 – Епюри розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ по лінії 1-1 в момент закінчення нагріву (1), $T_{max}=1175^\circ\text{C}$ (2), $T_{max}=1150^\circ\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^\circ\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^\circ\text{C}$ (5) при використанні ацетиленово-кисневого полум'я (а) й мікроплазмової дуги (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

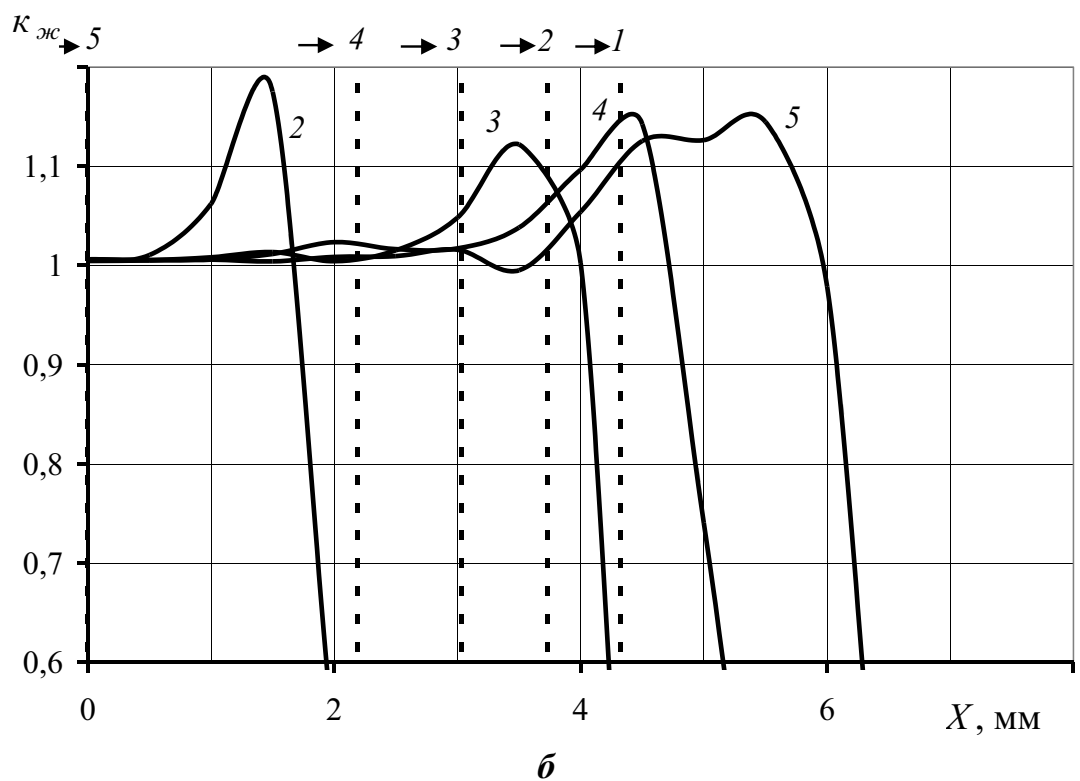
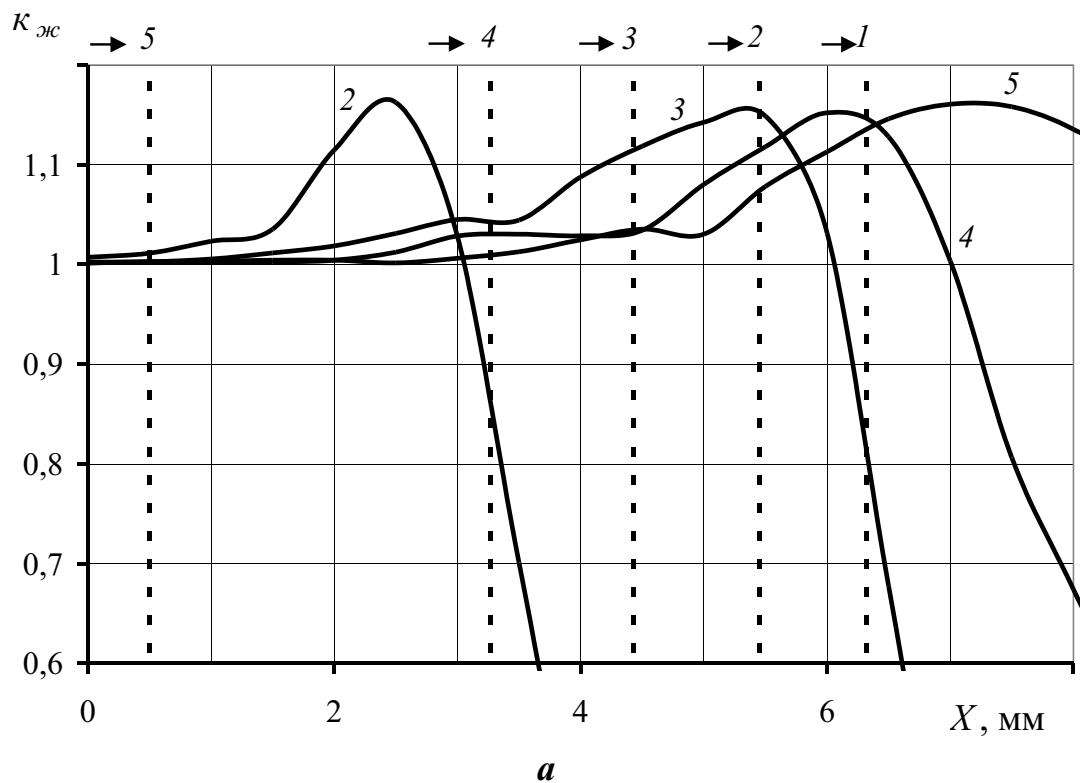


Рисунок 3.39 – Епюри розподілу коефіцієнтів жорсткості напруженого стану $K_{жс} = \sigma_1 / \sigma_{екв}$ по лінії 1-1 в момент закінчення нагріву (1), $T_{max}=1175^{\circ}\text{C}$ (2), $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (5) при використанні ацетиленово-кисневого полум'я (а) й мікроплазмової дуги (б), час після закінчення охолодження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР 8.132.6121м.04.04.03. ПЗ

Арк.
63

Аналіз епюр показує, що в середній частині зони нагріву при двох способах нагрівання і всіх температурах в процесі охолодження коефіцієнти жорсткості близькі до 1 і зростають до максимальних значень (біля 1,18) за межами зони утворення пластичних деформацій, тобто зміна жорсткості не впливає на вірогідність утворення тріщин.

Висновки

1 Проведено дослідження, побудовані поля розподілу напружень, та епюри розподілу коефіцієнтів жорсткості напружень

2 Небезпека (вірогідність) виникнення тріщин з'являється вже при охолодженні зони нагріву до температури 1175°C, коли поблизу центру нагріву виникають невеликі (біля 5 МПа) напруження розтягу. В процесі охолодження рівень напружень розтягу помітно зростає, досягаючи 45, 80 і 120 МПа при зниженні максимальної температури до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (5) відповідно.

3 Напруження розтягу перевищують границю плинності при охолодженні до максимальних температур $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), в результаті чого виникають пластичні деформації розтягу, а саме радіальні й окружні пластичні деформації для двох джерел нагрівання. За використання малоамперної аргонової дуги дані напруження менші ніж потенціально небезпечні.

4 В середній частині зони нагріву при усіх способах нагрівання і температурах в процесі охолодження коефіцієнти жорсткості близькі до 1 і зростають до максимальних значень (біля 1,17) за межами зони утворення пластичних деформацій, що не впливає на вірогідність утворення тріщин.

5 При використанні малоамперної аргонової дуги, у зоні термічного впливу не виникають пластичні деформації розтягу які б сприяли виникненню гарячих тріщин, тому даний метод потребує додаткових досліджень При усіх температурах в процесі охолодження рівень максимальних пластичних деформацій в центрі зони нагріву при застосуванні ацетиленово-кисневого полум'я декілька менший (на 17 %) ніж при мікроплазмової дуги. Так при

					MP 8.132.6121м.04.04.03. ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використанні ацетиленово-кисневого полум'я максимальні радіальні й окружні пластичні деформації в зоні температурного інтервалу крихкості при температурі на осі 1150°C – 0,0082 й 0,0083 % відповідно, при температурі 1125°C – 0,0274 й 0,0273 %, при температурі 1110°C – 0,045 й 0,0452 %. При використанні мікроплазмової дуги максимальні радіальні й окружні пластичні деформації в зоні температурного інтервалу крихкості при температурі на осі 1150°C – 0,0112 й 0,0113 % відповідно, при температурі 1125°C – 0,034 й 0,0342 %, при температурі 1110°C – 0,054 й 0,0546 %. Тобто при використанні ацетиленово-кисневого полум'я вірогідність утворення тріщин менша ніж при використанні мікроплазмової дуги. Тому для виправлення поверхневих дефектів жароміцних нікелевих сплавів використовувати ацетиленово-кисневого полум'я доцільніше ніж мікроплазмову дугу

					MP 8.132.6121м.04.04.03. ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Загальні положення по техніці безпеки при зварюванні та споріднених процесах

Порушення техніки безпеки при проведенні зварювальних робіт часто призводить до найсумніших наслідків - пожеж, вибухів і як наслідок травм і загибелі людей. При зварюванні можливі наступні травми - ураження електричним струмом, опіки від шлаку і крапель металу, травми механічного характеру. Для запобігання цього важливо неухильно дотримуватися запобіжних заходів:

1. Надійна ізоляція всіх, проводів, пов'язаних з джерелами струму і зварювальної дуги, заземлення корпусів зварювальних апаратів. Перетин заземлюючих проводів повинен бути не менше 25 мм. Підключенням, відключенням та ремонтом зварювального обладнання займається тільки черговий електрик. Зварникам забороняється проводити ці роботи.

2. Застосування в джерелах живлення автоматичних вимикачів високої напруги, які в момент холостого ходу розривають зварювальний ланцюг і подають на утримувач напругу в 12 В.

3. Надійний пристрій електродотримача з гарною ізоляцією, яка гарантує, що не буде випадкового контакту струмоведучих частин електродотримача зі зварюваним виробом або руками зварника.

4. Робота в справному сухому спецодязі і рукавицях. При роботі в тісних відсіках і замкнутих просторах обов'язково використання гумових калош і килимків, джерел освітлення з напругою не більше 6-12 В.

5. При роботі на електронно-променевих установках запобігання небезпеки поразки рентгенівськими променями, поглинання шкідливих випромінювань, пов'язаних з горінням дуги. Особливу небезпеку в сенсі ураження очей представляє світловий промінь квантових генераторів, так як навіть відбиті промені лазера можуть викликати важке пошкодження очей та шкіри.

					MP 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Захисні стекла, вставлені в щитки і маски, зовні закривають простим склом для оберігання їх від бризок розплавленого металу. Щитки виготовляють з ізоляційного металу - фібри, фанери і за формою і розмірами вони повинні повністю захищати обличчя і голову зварника.

Для ослаблення різкого контрасту між яскравістю дуги і малої яскравістю темних стін (кабіни) останні повинні бути пофарбовані у світлі тони (сірий, блакитний, жовтий) з додаванням у фарбу окису цинку з метою зменшення відображення ультрафіолетових променів дуги, що падають на стіни.

При роботі поза кабіною для захисту зору оточуючих та допоміжних робочих повинні застосовуватися переносні щити і ширми.

Утворені при дуговому зварюванні бризки розплавленого металу мають температуру до 1800 град. С. Для захисту від таких бризок зазвичай використовують спецодяг (брюки, куртку і рукавиці) з брезентовим або спеціальної тканини. Куртки при роботі не слід вправляти в штани, а взуття повинне мати гладкий верх, щоб бризки розплавленого металу не потрапляли всередину одягу, так як в цьому випадку можливі важкі опіки.

Висока температура дуги (6000- 8000 ° С) неминуче призводить до того, що частина зварювального дроту, покриттів, флюсів переходить в пароподібний стан. Ці пари, потрапляючи в атмосферу цеху, конденсуються і перетворюються в аерозоль конденсації, частки якої легко потрапляють в дихальну систему зварників. Ці аерозолі становлять головну професійну небезпеку праці зварників. Кількість пилу в зоні дихання зварника залежить головним чином від способу зварювання і зварювальних матеріалів, але до певної міри визначається і типом конструкцій. Хімічний склад електрозварювальної пилу залежить від способів зварювання і видів основних і зварювальних матеріалів. Існують суворі вимоги в області вентиляції при зварювальних роботах. Для уловлювання зварювального аерозолу на стаціонарних постах, а де це можливо, і на нестаціонарних, потрібно встановлювати місцеві відсмоктувачі у вигляді витяжної шафи вертикальної або похилої і ін.

					MP 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При використанні балонів із стисненими газами необхідно дотримуватися встановлених заходів безпеки: не кидати балони, не встановлювати їх поблизу нагрівальних приладів, не зберігати разом балони з киснем і горючими газами, балони зберігати у вертикальному положенні. При замерзанні вологи в редукторі балона з CO₂ відігрівати його тільки через спеціальний електричний обігрівач або обкладаючи ганчірками, намоченими в гарячій воді. Категорично забороняється відігрівати будь які балони зі стисненими газами відкритим полум'ям, так як це майже неминуче призводить до вибуху балона.

Категорично забороняється продувати ємності киснем, що іноді намагаються робити, так як в цьому випадку потрапляння кисню на одяг і шкіру зварювальника при будь-якому відкритому джерелі вогню викликає інтенсивне загоряння одягу і призводить до опіків зі смертельними наслідками.

Вибухонебезпечність існує і при виконанні робіт в приміщеннях, що мають велику кількість пилоподібних органічних речовин (харчової борошна, торфу, кам'яного вугілля). Цей пил при певній концентрації може давати вибухи великої сили. Крім ретельної вентиляції для виробництва зварювальних робіт в таких приміщеннях потрібен спеціальний дозвіл пожежної охорони.

Важливе значення має впровадження комплексної механізації і автоматизації, що значно зменшує небезпеку травм пов'язаних зі складальними і транспортними операціями.

					MP 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні висновки

У магістерській роботі було досліджено жароміцний сплав ЧС88У (ХН57КВЮТМБРЛ-ВИ) призначений для виготовлення робочих лопаток сучасних суднових і енергетичних газотурбінних двигунів, що мають при експлуатації температуру до 1150 ° С. При виготовленні литих виробів в них можуть утворюватися різні зовнішні дефекти металу. Якісно виправити дефекти лиття і експлуатаційні ушкодження виробів можливо різними методами.

Метою роботи було дослідження впливу різних джерел нагрівання при виправленні дефектів лиття на утворення гарячих тріщин жароміцного нікелевого сплаву ЧС88У.

Було розглянуто три джерела нагрівання, які могли б вирішити цю проблему, а саме: ацетиленово-кисневе полум'я, малоамперна аргонова дуга прямої полярності та мікроплазмова дуга.

При нагріві малоамперною аргоною дугою швидкість нагріву близько у 1,25 разів більша ніж при використанні мікроплазмової дуги. Нагрів мікроплазмовою дугою виконується з більшою біля у 1,7 разів швидкістю в порівнянні з ацетиленово-кисневим полум'ям

Радіус зони нагріву до температур, при яких пластичність і міцність металу зразка дуже мала (від 1200 °С до 1100 °С) дорівнює при використанні ацетиленово-кисневого полум'я 6,32 мм, мало амперної аргонової дуги 2,63мм, та при мікроплазмовій дузі 4,36 мм.

Небезпека (вірогідність) виникнення тріщин з'являється вже при охолодженні зони нагріву до температури 1175°С, коли поблизу центру нагріву виникають невеликі (біля 5 МПа) напруження розтягу. В процесі охолодження рівень напружень розтягу помітно зростає, досягаючи 45, 80 і 120 МПа при зниженні максимальної температури до $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), $T_{max}=1125^{\circ}\text{C}$ (4), $T_{max}=1100^{\circ}\text{C}$ (5) відповідно.

					МР 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напруження розтягу перевищують границю плинності при охолодженні до максимальних температур $T_{max}=1150^{\circ}\text{C}$ (3), в результаті чого виникають пластичні деформації розтягу, а саме радіальні й окружні пластичні деформації для двох джерел нагрівання. За використання малоамперної аргонової дуги данні напруження менші ніж потенціально небезпечні.

В середній частині зони нагріву при усіх способах нагрівання і температурах в процесі охолодження коефіцієнти жорсткості близькі до 1 і зростають до максимальних значень (біля 1,17) за межами зони утворення пластичних деформацій, що не впливає на вірогідність утворення тріщин.

При використанні малоамперної аргонової дуги, у зоні термічного впливу не виникають пластичні деформації розтягу які б сприяли виникненню гарячих тріщин, тому даний метод потребує додаткових досліджень.

При усіх температурах в процесі охолодження рівень максимальних пластичних деформацій в центрі зони нагріву при застосуванні ацетиленово-кисневого полум'я декілька менший (на 17 %) ніж при мікроплазмової дуги. Так при використанні ацетиленово-кисневого полум'я максимальні радіальні й окружні пластичні деформації в зоні температурного інтервалу крихкості при температурі на осі 1150°C – 0,0082 й 0,0083 % відповідно, при температурі 1125°C – 0,0274 й 0,0273 %, при температурі 1110°C – 0,045 й 0,0452 %. При використанні мікроплазмової дуги максимальні радіальні й окружні пластичні деформації в зоні температурного інтервалу крихкості при температурі на осі 1150°C – 0,0112 й 0,0113 % відповідно, при температурі 1125°C – 0,034 й 0,0342 %, при температурі 1110°C – 0,054 й 0,0546 %. Тобто при використанні ацетиленово-кисневого полум'я вірогідність утворення тріщин менша ніж при використанні мікроплазмової дуги. Тому для виправлення поверхневих дефектів жароміцних нікелевих сплавів використовувати ацетиленово-кисневого полум'я доцільніше ніж мікроплазмову дугу

					MP 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список литературы

1. http://www.igic.ras.ru/docs/dissov/dissertation/dvoretckov_dissertatciya.pdf
2. Беттеридж У. Жаропрочные сплавы [Текст] Москва.: Металлургиздат, 1961. - 381 с.
3. Болтон У. Конструкционные материалы металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты [Текст]. - Москва.: Додэка-XXI, 2004. - 320 с.
4. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов [Текст]. - М.: Машиностроение, 1998. - 464 с.
5. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Попов Н.А. Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов [Текст]. - Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета, 2016. - 160 с.
6. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок [Текст] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. - 2011. - № S2. - С. 98-103.
7. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии [Текст] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. - 2017. - № S. - С. 116-129.
8. Родионов А.И., Ефимочкин И.Ю., Буякина А.А., Летников М.Н. Сфероидизация металлических порошков (обзор) [Текст] // Авиационные материалы и технологии. - 2016. - № S1 (43). -С. 60-64.
9. Разуваев Е.И., Бубнов М.В., Бакрадзе М.М., Сидоров С.А. ГИП и деформация гранулированных жаропрочных никелевых сплавов [Текст] // Авиационные материалы и технологии. - 2016. - № S1 (43). - С. 80-86.

					MP 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] . Учебник для вузов. - Москва.: МИСИС, 2005. - 432 с.
11. Логунов, А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин /А.В. Логунов. – Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии». – 2017. – 854 с.
12. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст] /Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля: Пер. с англ. В 2-х кн. Кн. 2. – Москва.: Металлургия. – 1995. – 384 с.
13. Reed, Roger C. The Superalloys, Fundamentals and Applications. /Roger C Reed. – New York: Cambridge [Текст]. – 2006. – 372 p
14. Donachie, Matthew J. SUPERALLOYS. A Technical Guide. Second Edition. / Matthew J. Donachie, Stephen J. Donachie [Текст]. – USA: ASM International. – 2002. – 402 p.
15. Geddes, B. Superalloys. Alloying and Performance [Текст]. /B. Geddes, H. Leon. – USA: ASM International. – 2010 – 184 p.
16. https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/instit_fakul_kaf_shkoly/ips/novye_vozmozhnosti_dlya_kazhdogo/materialoved_term_obr_i_met_issl_met_i_spl/tema9/zharoprochn_nikelevye_splavy.pdf
17. Erickson G.L.,Harris K. DS and SX superalloys for industrial gas turbines // Materials for Advanced Power Engineering [Текст] . Part II. Proc. of a Conf. Belgium, 3-6 okt. 1994. – Kluwer Academic Publishers. 1994. P. 1055-1074.
18. Erickson G.L. A new third generation single crystal, casting superalloy [Текст] // J. of Metals. 1995. V. 47. April. N 4. P. 36-39.
19. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия[Текст] / Е.Н. Каблов. Москва. : МИСиС, 2001. 632 с.
20. https://studme.org/161567/tehnika/materialovedenie_monokristallicheskie_zharoprochnye_nikelevye_splavy.

					MP 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Монастырская, Е. В. Структура, фазовый состав и свойства коррозионностойкого жаропрочного сплава ЧС88У// [Текст] / МиТОМ - Е.В. Монастырская, Г.И. Морозова, Ю.Б. Власов №8, 2006.
22. Клыпина, А. М. Оценка качества металла литых рабочих лопаток из никелевого сплава ЧС88У-ВИ // Электрические станции: Производственнотехнический журнал [Текст] / А.М. Клыпина, Л.Д. Чистякова, Д.А. Казанский - 2009. - N 1. - 28 - 36 с.
23. Паспорт на сплав ЧС88У-ВИ // ЦНИИКМ «Прометей», Ленинград 1990 г.
24. Структура, фазовый состав и свойства коррозионностойкого жаропрочного сплава ЧС88У. ВИАМ/2006-204528.
25. Багдасаров Ю.С., Якушин Б.Ф., Сорокин Л.И. Выбор критерия оценки сопротивляемости никелевых сплавов образованию трещин при термической обработке после сварки [Текст] // Сварочное производство. 1982. №8. С.11-13.
26. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов [Текст] / под ред. Э.Л. Макарова. – Москва.: Металлургия, 1991. – 528с.
27. Сварка трубопроводов и конструкций : учебник [Текст] / В. Л. Березин, А. Ф. Суворов. - Москва. : Недра, 1976. - 359 с. : ил. - Библиогр.: с. 354.
28. Коррозия сварных соединений в окислительных средах [Текст]; Юрченко, Ю.Ф.; Агапов, Г.И.; Изд-во: Москва.: Машиностроение, 1976. – 152с.
29. <http://websvarka.ru/talk/topic/5264-plazmennaiia-svarka/>
30. Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций: учебное пособие 2-е издание [Текст] / Л.А. Копельман. Санкт-Петербург: Изд. «Лань», 2010. – 464 с.
31. <http://masters.donntu.org/2000/fvti/sugonyak/du/mke&mge.htm>
32. Чигарёв, А.В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. [Текст] / А.В. Чигарёв, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

					МР 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. Басов, К.А. ANSYS: Справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
34. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. [Текст] / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
35. Прохоров Н.Н. Горячие трещины при сварке [Текст],- Москва.: Машгиз. 1952.-220 с.
36. Актуальные проблемы исследования физико-механических свойств материалов для сварных и паяных конструкций / Г.М. Григоренко, В.В. Квасницкий, С.Г. Григоренко и др. [Текст]. // Проблемы сварных и родственных процессов и технологий: матер. междунар. техн конф. – Николаев: НУК, 2009. – С. 41 – 42.

					МР 8.132.6121зм.02.04.04. ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		