

С. В. Аджамський^{1,2}, Ph. D., с.н.с, ORCID 0000-0002-6095-8646

Р. В. Подольський^{1,3}, Ph. D., н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641

Г. А. Кононенко^{1,3,4}, д.т.н., ст. дослідник, ORCID 0000-0001-7446-4105

Є.С. Клемешов³, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-6486-5319

О. А. Сафронова³, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-4032-4275

¹ ТОВ «Адитивні лазерні технології України»

² Інститут транспортних систем і технологій НАН України

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

⁴ НТУ «Дніпровська політехніка»

РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ДЕТАЛЯХ СКЛАДНОГО ПЕРЕРІЗУ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗІ СТАЛІ 316 L ЗА SLM-ТЕХНОЛОГІЄЮ

Анотація. Залишкові внутрішні напруження є однією з особливостей металевих матеріалів, виготовлених шляхом пошарового сплавлення за SLM-технологією, але вони можуть значно впливати на механічні властивості та геометричні параметри, тому необхідно проводити заходи задія зменшення залишкових напружень. За результатами аналітичних досліджень встановлено, що найбільш ефективним способом зменшення залишкових напружень є термічна обробка. Мета дослідження. Дослідити вплив термічної обробки за різними режимами на зміну внутрішніх напружень I роду за допомогою обчислювань та методом прямих вимірювань як відхилення фактичних геометричних параметрів від заданих розмірів деталі складної форми, виготовленої за SLM -технологією зі сталі AISI 316L. Ідея досліджень. Відомі дослідження впливу внутрішніх напружень в залежності від геометрії деталі переважно виконувались на елементах простої форми. Авторами розроблена модель виробу складного перерізу, що дозволяє оцінити вплив товщини стінки та типу переходу від меншого до більшого перерізу. Матеріал та методика досліджень. Деталь складної форми була виготовлена з металевого порошку сталі 316L за SLM -технологією відповідно до розробленої моделі. З використанням програм QForm та JmatPRO розраховано відхилення геометрії деталі, які виникають під дією залишкових напружень після термічного оброблення за дослідними режимами (нагрів до 899°C, витримка 1 год., охолодження у воді; нагрів до 650°C, 2 год., вода; нагрів до 550°C, 4 год., вода) та виконаний контроль фактичних відхилень геометрії на виробі з застосуванням 3-D сканеру та програмного забезпечення Geomagic ControlX. На основі отриманих результатів надані рекомендації щодо термічної

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

обробки, яка забезпечить ефективне зниження залишкових напружень та збереження вихідної структури, яка формується при виготовленні за SLM-технологією.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення, нержавіюча сталь 316L, залишкові внутрішні напруження, термічна обробка.

Посилання для цитування: Розробка раціональних режимів термічної обробки для зменшення залишкових напружень в деталях складного перерізу, виготовлених зі сталі 316L за SLM-технологією / С. В. Аджамський, Р. В. Подольський, Г. А. Кононенко, Є.С. Клемшов, О. А. Сафронова // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 501-516. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-501-516>.

Актуальність. Залишкові внутрішні напруження є однією з особливостей металевих матеріалів, виготовлених шляхом пошарового сплавлення за SLM (selective laser melting – англ., селективне лазерне плавлення), але вони можуть значно впливати на механічні властивості та геометричні параметри [1]. Накопичення внутрішніх залишкових напружень, що утворились під час процесу виготовлення, в результаті локального нагріву і охолодження (швидкості охолодження від 10^3 до 10^8 K/c) [2] може спричинити пошкодження та навіть можливий вихід з ладу деталей під час експлуатації [3]. Таким чином, зменшення залишкових внутрішніх напружень вважається одним з найбільш актуальних та важливих проблем у галузі АМ (additive manufacturing - англ. адитивне виробництво) [3-4]. Таким чином питання зменшення шкідливого впливу залишкових внутрішніх напружень потребує фундаментального розуміння їх впливу на геометричні параметри та службові характеристики матеріалів АМ.

Мета дослідження. Дослідити вплив термічної обробки за різними режимами на зміну внутрішніх напружень І роду за допомогою обчислювань та методом прямих вимірювань як відхилення фактичних геометричних параметрів від заданих розмірів деталі складної форми, виготовленої за SLM-технологією зі сталі AISI 316L. Надати рекомендації щодо режимів термічної обробки, яка забезпечить ефективне зниження залишкових напружень та збереження вихідної структури, яка формується при виготовленні за SLM-технологією.

Стан питання. В останні роки виробництво металевих виробів на основі пошарового виготовлення перетворилося з швидкого прототипування в АМ [5]. На відміну від традиційних виробничих технологій, АМ пропонує набагато більшу свободу проектування. Вперше конструкція виробів більше не сильно обмежена методом

виробництва, тобто окремими деталями високої складності, наприклад комірчастої конструкції, складна внутрішня структура або охолоджуючі канали можуть бути реалізовані без урахування конкретних правил проектування. Крім того, деталі, розроблені за допомогою комп'ютерних технологій (CAD), можуть бути піддані процедурам топологічної оптимізації [6] і реалізовані без додаткових витрат на технологічне обладнання та операції при виготовленні. Це дає безліч переваг: складна геометрія, зниження ваги, короткий час виконання замовлення, зменшення відходів, інтеграція функцій і т. д. При застосуванні SLM -технології метал піддається впливу лазера, що призводить до його плавлення. Коли метал остигає, виникають напруження стиснення, які можуть призводити до зміни початкової форми (викривлення) виробу [7]. Будова металу деталей, виготовлених за SLM-технологією, має такі особливості, як дрібнозерниста структура, шаруватість, текстура в напрямку росту чи побудови виробу. Також такі вироби схильні до виникнення внутрішніх напружень через градієнт температур та складну геометрію, перехід від великого перерізу до малого. Наявність внутрішніх напружень може призводити до зниження міцності, корозійної стійкості, втомної міцності та стійкості до корозійного розтріскування. Тому для деталей зі сталі AISI 316L, виготовлених за SLM -технологією, необхідні дослідження для попередження утворення та зменшення залишкових напружень.

З результатів аналітичного огляду [8] відомо, що дослідження впливу внутрішніх напружень в залежності від геометрії деталі виконували багато дослідників. Але слід зазначити, переважно ці дослідження виконувались на елементах простої форми, що в свою чергу є неповноцінним аналізом, що пов'язано з відсутністю врахування особливостей геометрії деталей, які виготовлені шляхом АМ. Наприклад, автори роботи [8] провели дослідження на простій фігурі (призма) з розмірами 24 мм × 46 мм × 21 мм, виготовленій зі сталі 316L з метою визначення розподілу внутрішніх напружень на середній висоті шляхом застосування методу рентгенівської дифракції. В рамках цих досліджень було проаналізовано 2 призми, що виготовлені з різними стратегіями сканування, а саме: стратегія спірального сканування, з направленням заповнення від кордонів до центру та навпаки. В результаті даних досліджень авторами [8-9] було встановлено, що для двох стратегій сканування спостерігався подібний розподіл внутрішніх напружень розтягування по крайовим ділянкам та стискаючих по центру. Цей розподіл характеризується стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі, які врівноважується силою внутрішніх напружень розтягування на поверхні (рис. 1).

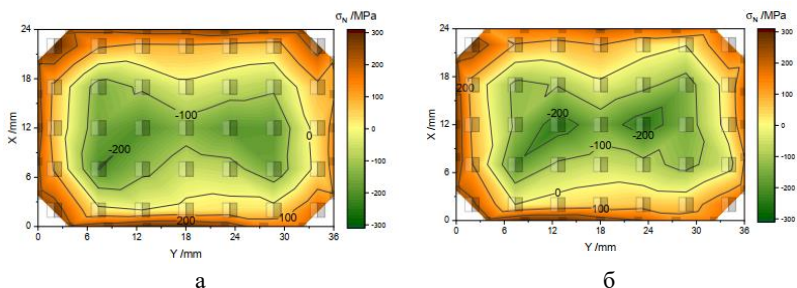


Рисунок 1 – Розподіл внутрішніх напружень в напрямленні побудови з застосуванням стратегії сканування спіральна: а – від центру до кордонів, б – від кордонів до центру [8]

Автори роботи [2] вважають, що для мінімізації внутрішніх напружень при реалізації SLM -технології передбачено низку можливостей: зміна геометрії CAD-моделі та управління параметрами процесу: зміна розміру фокусної плями, застосування різних типів треків, поворот і зміщення шарів щодо попередніх, різні стратегії друку. В рамках даної роботи керувались твердженням авторів [9], що вплив великих градієнтів температури може призвести до високих значень внутрішніх напружень, що може знизити механічні властивості, такі як міцність, пластичність і довговічність втоми. Матеріал зразка, побудованого по стратегії шахового сканування більш плавно переходить в ділянку самозміцнення, тим самим перешикування кристалічної решітки відбувається при більшому навантаженні, що зберігає запас переходу до незворотних змін матеріалу. За напружень, менших ніж границя плинності, тіло може повернутися до своєї первісної форми і розміру, коли напруження розтягу усунені [10].

При візуальній оцінці деформації (зміни геометрії зразків) в результаті дії залишкових напружень авторами [4] було відзначено, що при прямолінійному порядку друку з поворотом шарів відносно попереднього на 67° через напруження відбувається більше викривлення границі в області тонкого краю в порівнянні із зразками, побудованими при тих самих режимах, але в шаховому порядку.

При дослідженні мікроструктури дослідних зразків, виготовлених з різними параметрами процесу і стратегіями друку встановлено, що зразки не мали дефектів основного тіла (пористість, висока шорсткість). Сформована ванна розплаву основного тіла під впливом лазерного випромінювання шляхом плавлення порошкового шару і матеріалу підкладки має рівномірне проплавлення, чітко побудовані треки.

В результаті автори роботи [4] зробили висновок, що у зразках,

надрукованих із стратегією побудови треків в шаховому порядку з поворотом на 67°, спостерігалось менше викривлення, ніж в зразках з прямолінійною стратегією друку з поворотом на 67°.

Авторами роботи [11] було проведено дослідження на сталі 316L з метою визначення впливу залишкових внутрішніх напружень, спричинених адитивним виробництвом. В рамках цих досліджень [11] авторами було застосовано комплексний підхід для аналізу макронапружень, а саме з застосуванням кореляції цифрового зображення (DIC – аналіз) [12] у поєднанні з видаленням і розрізом робочої пластини та неруйнівного методу, а саме дифракція нейтронами [13]. В результаті авторами [11] було отримана хороша узгодженість між двома методами вимірювання. Щодо впливу стратегії сканування на внутрішні напруження було встановлено, що зменшення залишкових внутрішніх напружень досягалось шляхом зменшення розміру поля сканування, збільшення повороту поля до 45 градусів і збільшення прикладеної енергії на одиницю довжини (потужність/швидкість лазера). Вимірювання дифракції нейтронів показують, що хоча на залишкові напруження в площині впливає обертання острова сканування, осьові залишкові внутрішні напруження не змінюються. Авторами [11] було пояснено таку поведінку в площині розбіжністю між найбільшими тепловими напруженнями (напрямок сканування) та найбільшим розміром деталі.

Автори робіт [13] досліджували вплив на внутрішні залишкові напруження зміни довжини та орієнтації векторів лазерного сканування, виконання попереднього та пост-сканування, сканування полів, зміни товщини шару, нагрівання базової пластини та термообробки (ТО) кінцевих деталей. Результати показали, що всі ці модифікації процесу дали покращені значення залишкових напружень, зокрема модифікація параметрів сканування та зменшення температурного градієнта шляхом попереднього нагрівання робочої пластини. В роботі [110] було встановлено, що ТО призвела до 80% зменшення макронапружень більше, ніж оптимізація параметрів для сканування полів (36%).

Матеріал та методика досліджень. Об'єктом дослідження була нержавіюча сталь аустенітного класу 316L, що виготовлена за SLM - технологією. Матеріалом для виготовлення зразків був порошок сталі 316L з розміром частинок $45 + 15 \mu\text{m}$. Для визначення форми і розмірів частинок вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа PEM-106 (рис. 2, а). На рис. 2, б наведені результати гранулометричного аналізу. Хімічний склад дослідної сталі представлений в таблиці 1 [2].

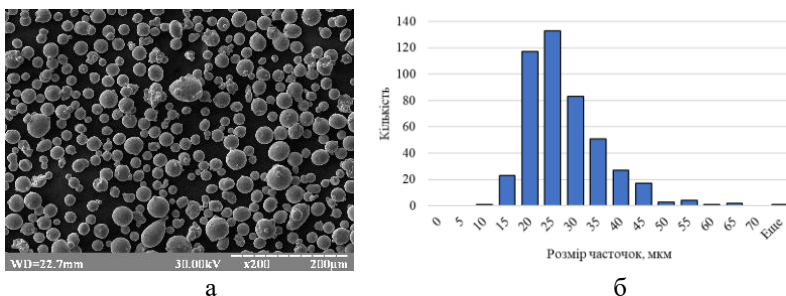


Рисунок 2 - Частинки вихідного матеріалу 316L за збільшення 200 крат (а), результати гранулометричного аналізу (б) [2]

Таблиця 1 – Фактичний хімічний склад досліджуваної сталі 316L, % ваг. [2]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
0,016	0,78	0,64	0,005	0,008	17,79	12,63	0,04	2,35

Параметри виготовлення зразків за SLM - технологією: товщина шару – 0,04 мм, потужність 220 Вт, швидкість сканування – 1070 мм/с, діаметр фокусної плями – 0,1 мм з поворотом наступного шару на 67° відносно попереднього.

В рамках роботи було розроблено CAD-модель (рис. 3), що включають основні конструкційні геометричні параметри з якими стикаються при виготовленні деталей в АМ. Дана модель дозволить прогнозувати вплив зміни внутрішніх напружень I роду в залежності від застосованих параметрів нагріву та охолодження.

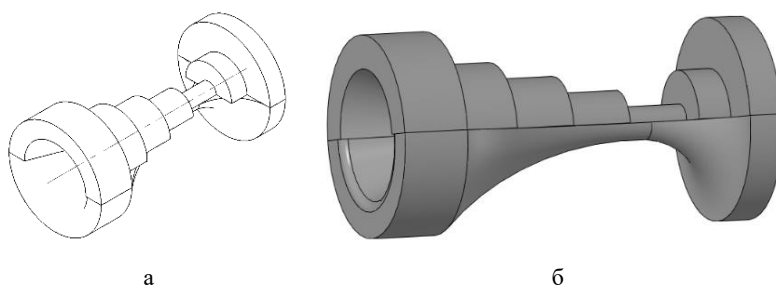


Рисунок 3 – Запропонована CAD-модель для проведення прогнозних обчислень розміру залишкових напружень після виготовлення за різними режимами за SLM - технологією

Моделювання процесу нагріву - охолодження з тепловідводом при випробуваннях проводилось за допомогою математичного розрахунку в середовищі програмного комплексу TO QForm. Аналіз процесу

загартування зразка проводився за такими етапами:

1. Побудова геометричних об'єктів процесу загартування. Побудова геометрії зразка проводилася в програмі SolidWorks. Креслення експортувалося в форматі *.stp в QForm.

2. Завдання початкових умов. Як вихідні умови задавалися типи операцій – розрахунок ТО, термо-пружно-пластична задача. Температура перед початком гартування – 899, 650 та 550 °С.

3. Завдання граничних умов. У фізико-технологічному сенсі маржинальні умови приймалися як охолоджувач - вода, яка подавалася однорідно по всій поверхні деталі. Він характеризується коефіцієнтом тепловіддачі і температурою охолоджуючого середовища. Значення тепловіддачі встановлювалось в залежності від поверхневої температури металу.

4. Моделювання проводилося для сталі 316L. Для цієї марки сталі методом підбору визначалася залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури з урахуванням попередньо отриманого розрахунку фазових діаграм.

Розрахунок фазових діаграм проводився в програмному комплексі JmatPRO з використанням термодинамічних баз даних. Хімічний склад, представлений в таблиці 1, використовували як фактичний. Щоб максимально підвищити точність моделювання, були використанні результати оптичної та електронної мікроскопії та криві швидкості охолодження дослідних зразків після ТО. Слід зазначити, що моделювання проводилось в неізотермічному режимі, враховуючи, що невіпорядкована матриця з гранецентрованою кубічною (далі - ГЦК) решіткою утворюється в об'ємі зразка, а інші фази – переважно по границях зерен.

5. На останньому етапі моделювання проводилася адаптація моделі до реального процесу і аналіз оптимальних результатів моделювання. Проводилася верифікація результатів моделювання і при встановленому розходженні вносилися поправки в зміст моделі, а саме до коефіцієнту тепловіддачі.

Експериментальну ТО було проведено з використанням спеціалізованої лабораторної печі СНОЛ 1,6/1100 - ЗС в захисному середовищі аргон. В рамках роботи було проведено ТО дослідних зразків за наступними режимами: режим, який регламентує стандарт AMS 2759/4В для зняття внутрішніх напружень зразків, виготовлених традиційним способом виробництва: нагрів до 899 °С з витримкою 1 годину та охолодженням у воді; режим для зняття внутрішніх напружень відповідно до аналітичного огляду: нагрів до 650 °С з витримкою 2 години та охолодженням у воді та дослідний режим ТО: нагрів до 550 °С з витримкою 4 години та охолодженням у воді.

Контроль залишкових напружень I роду виконували з застосуванням 3-D Сканеру та програмного забезпечення Geomagic ControlX. Дане програмне забезпечення дозволяє проводити аналіз геометрії тривимірних моделей до фактично застосованої CAD- моделі. Таким чином дані дослідження дозволили визначити вплив параметрів ТО на зміну внутрішніх напружень I роду.

Результати. В результаті проведених досліджень внутрішніх напружень I роду розробленої CAD-моделі (рис. 3) та проведеного первинного сканування після процесу виготовлення з видаленням технологічних підтримок було встановлено, що області поза необхідної геометрії переважно знаходяться на виступаючих ділянках, що позиціоновані по області виготовлення в області Up-skin. Слід зазначити, що дослідний зразок, який не проходить етап ТО зазнав зміну геометрії в області скругленого радіусу у від'ємних значеннях $\sim 0,007$ мм через внутрішні напруження I роду.

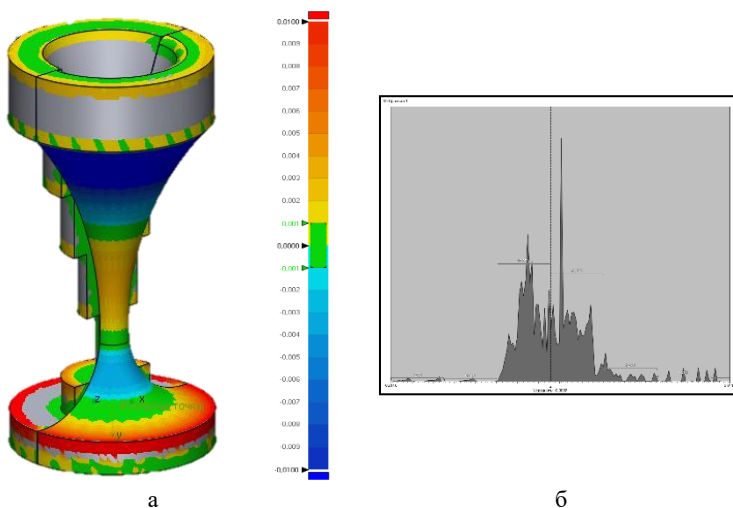


Рисунок 3 – Результати розрахунку внутрішніх залишкових напружень I роду розробленої CAD-моделі після процесу виготовлення за SLM – технологією: а – по об'єму деталі, б – по осьовому перерізу

Виходячи з отриманих результатів було проведено математичне моделювання та фактичну ТО з подальшим скануванням деталей для визначення впливу параметрів ТО на геометричні параметри та внутрішні напруження I роду. В рамках роботи для порівняння розробленої ТО з світовим досвідом було застосовані параметри, що регламентує НТД [14] та рекомендовані як режими для мінімізації

внутрішніх напружень [15] для деталей виготовлених за SLM - технологією. Слід зазначити, що основне завдання ТО для зняття внутрішніх напружень полягає в зменшенні знакозмінних напружень для запобігання викривлення геометричної, зеренної та кристалічної структури без принципової зміни структурного стану.

Як початкові умови для математичного моделювання в програмному комплексі QForm були внесені початкові дані щодо симуляції внутрішніх напружень I роду відповідно до процесу виготовлення. Моделювання переважно виконувалось з метою визначення умов формування інтерметалідної фази та можливого її впливу на деформації розробленої моделі та особливості прогрівання деталі в залежності від змінного перерізу деталі, що є однією з основних особливостей виготовлення деталей за LPBF- технологією.

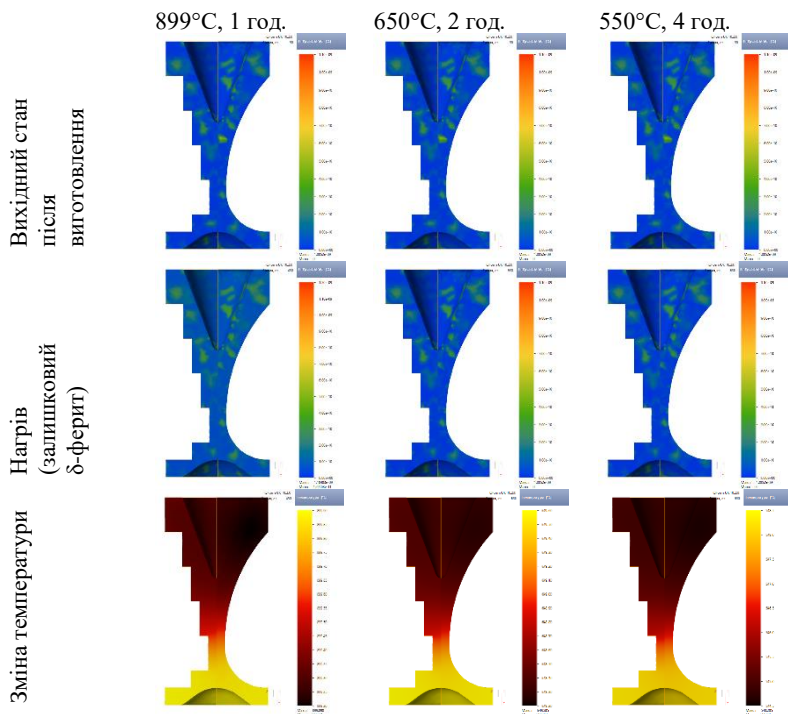


Рисунок 4 – Результати математичного моделювання щодо розподілу відповідних показників по перерізу CAD-моделі після термічної обробки за різними режимами: а – розподіл залишкових напружень у вихідному стані після виготовлення ; б – розподіл кількості залишкового δ -фериту після нагріву; в – розподіл температури після нагріву

В результаті проведеного моделювання (рис. 4) встановлено, що геометрія розробленої моделі дозволяє прогнозувати зміну температурних полів в залежності від перерізу дослідної деталі. Аналіз результатів щодо фазово-структурних перетворень показав, що структура переважно складається з аустеніту, але слід зазначити, що присутня незначна кількість δ -фериту, що зберігається по областях деталі з перерізом більше 6 мм, що вказує на формування даної структури через слабкий відті тепла при виготовленні. В результаті моделювання послідуєчого нагріву встановлено, що структура δ -фериту зберігається, але слід зазначити, що при нагріві до температури 899 °C та витримці 1 годину кількість даної структурної складової короткочасно збільшується. Таким чином, можна зробити висновок, що ТО сталі 316L відповідно до НТД призводить до гомогенізаційних процесів, які викликають формування небажаної структури, що в свою чергу може призвести до збільшення структурних внутрішніх напружень II роду. В той час, як після обробки за дослідними режимами при температурі 650 та 550°C структура не зазнає змін, що підтверджує твердження науковців [16], щодо проходження ТО в області відновлення.

В результаті аналізу геометричних параметрів деталі після фактичної ТО встановлено (рис. 5 та таблиця 2), що фрагмент області скруглення не зазнає значних змін по геометрії (допустимі відхилення 0,001мм) після ТО за температури 899°C, але слід зазначити, що відповідно до результатів робіт [163] було встановлено, що за такої ТО відбувається зміна трекової текстури, що вказує на атомну дифузію. При аналізі деталі після ТО за температури 650°C встановлено, що структура має незначні відхилення по геометрії, що пов'язані зі збереженням внутрішніх напружень I роду. Цей ефект було виявлено на нависаючих областях, що вказує на недостатність прогріву, як встановлено за результатами математичного моделювання (рис. 4). Дослідний зразок після ТО за розробленим режимом (нагрів до температури 550 °C) показав відсутність значних змін по геометрії нависаючих елементів (в сумі відхилення 0,004 мм) при порівнянні за ТО за режимом 650°C (в сумі відхилення 0,007 мм).

З аналізу загальної кількості та величини геометричних відхилень (табл. 2) встановлено, що поза полем допуску (0,001мм) невідповідності геометрії найбільше значення мав зразок після ТО при 650°C, наступний – 550°C та 899°C відповідно.

Таким чином можна зробити висновок, що при проведенні ТО за температур в області відновлення більш значний вплив на релаксацію внутрішніх напружень чинить час витримки дослідних зразків, а не температурні параметри. Виходячи з вище зазначеного, для дослідно-

промислового випробування рекомендовано проведення ТО для зняття внутрішніх напружень за режимом: нагрів до 550°C, витримка 4 години з охолодженням у воді.

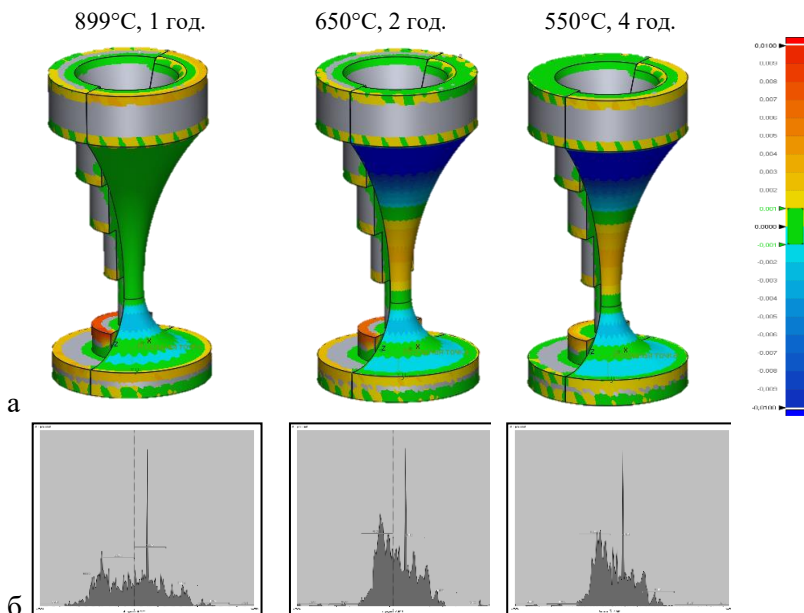


Рисунок 5 - Результати визначення фактичного розподілу відхилень за геометрією відносно заданої моделі по об'єму CAD-моделі (а) та за осьовим перерізом (б) після термічної обробки за різними режимами

Таблиця 2 - Результати аналізу відхилень геометричних параметрів деталі після фактичної термічної обробки від заданої CAD-моделі

ТО	Геометричні параметри, мм				
	Мін. відхилення	Макс. відхилення	Поза полем геометрії відносно CAD-моделі, %	Середнє додатне відхилення	Середнє від'ємне відхилення
899°C	-0,0042	0,0087	56,81	0,0011	0,0016
650°C	-0,0233	0,0077	66,51	0,0013	0,0022
550°C	-0,0230	0,0050	66,10	0,0012	0,0022

Примітка: Допуск $\pm 0,001$ мм

Дослідження, результати яких викладено в статті, фінансувалося Міністерством освіти і науки України в рамках програми «Спільний українсько-австрійський науково-дослідний проект, що виконується в рамках Українсько-австрійського науково-технічного співробітництва»

роботи «Удосконалення режимів термообробки AISI316L виробництва SLM для зниження залишкових напружень» (номер держреєстрації 0123U103227) за договором М/29-2024/КС.0226.24 від 30.05.2024.

Висновки

1. Розроблена модель для визначення залишкових внутрішніх напружень I роду залежно від геометричних параметрів виробу (товщина стінки, тип переходу між елементами виробу різного розміру) після виготовлення за SLM-технологією та після наступної термічної обробки за різними режимами.

2. За результатами моделювання у програмному комплексі QForm досліджено вплив термічної обробки за дослідними режимами (нагрів до 899°C, витримка 1 год, охолодження у воді; нагрів до 650°C, 2 год, вода; нагрів до 550°C, 4 год, вода) на зміну фазового складу та геометрії під дією залишкових внутрішніх напружень I роду, які виникають при виготовленні виробу складної геометрії зі сталі 316L за SLM-технологією. Встановлено, що при нагріві до температури 899 °C відбувається гомогенізація з утворенням нових фаз, що в свою чергу може призвести до збільшення структурних внутрішніх напружень II роду. В той час, як після обробки при температурі 650 та 550°C структура не зазнає змін, що свідчить про проходження термічної обробки в області відновлення.

3. За результатами фактичних вимірювань викривлення геометрії деталі встановлено, що в області плавного переходу від більшого до меншого перерізу, відхилення незначні після термічної обробки за температури 899°C, але при цьому відбувається зміна трекової текстури, що вказує на атомну дифузію. Після обробки за температури 650°C встановлено, що структура має незначні відхилення по геометрії, що пов'язані зі збереженням внутрішніх напружень I роду через недостатність прогріву. Після обробки за температури 550 °C встановлено відсутність значних змін по геометрії нависаючих елементів зі збереженням трекової текстури.

4. Рекомендована термічна обробка деталей складної форми зі сталі 316L, виготовлених за SLM-технологією полягає у нагріві до температури 550 °C, витримці протягом 4 годин та прискореному охолодженні у воді. Запропоновані режими забезпечують зниження залишкових напружень та збереження трекової текстури.

Перелік посилань

1. Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel / Chen W., Voisin T., Zhang Y. et al. // Nat Commun. 2019. No. 10. P. 4338. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12265-8>.
2. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R., Badyuk S. Implementation Of

Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv : Naukova Dumka, 2022. 116 p. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>.

3. Deb Roy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Beese A. M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Prog. Mater. Sci.* 2017. No. 92. P. 112–224.

4. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. *Космічна наука і технологія.* 2021. 27, № 6 (133). С. 105–114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>.

5. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.* 2012. No. 13. P. 89–96.

6. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas.* 2011. P. 348–362.

7. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів. *Автоматичне зварювання.* 2020. №10. С. 14–20. <https://doi.org/10.37434/as2020.10.03>.

8. Separation of the Formation Mechanisms of Residual Stresses in LPBF 316L / Ulbricht A., Altenburg S.J., Sprengel M., Sommer K., Mohr G., Fritsch T., Mishurova T., Serrano-Munoz I., Evans A., Hofmann M., Bruno G. // *Metals.* 2020. No. 10. P. 1234.

9. Effect of hatch length on the development of microstructure, texture and residual stresses in selective laser melted superalloy Inconel 718 / Nadammal N., Cabeza S., Mishurova T., Fritsch T., Kromm A., Seyfert C., Farahbod L., Haberland C., Schneider J., Portella P., Bruno G. // *Materials & design.* 2017. № 134. P. 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.049>.

10. Dovgvy B., Piglione A., Hooper P., Pham M.-S. Comprehensive assessment of the printability of CoNiCrFeMn in Laser Powder Bed Fusion. *Materials & Design.* 2020. № 194. P. 108845. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108845>.

11. An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel / Wu A. S., Brown D. W., Kumar M., Gallegos G. F., King W. E. // *Metall. Mater. Trans. A.* 2014. No. 45. P. 6260–6270

12. Dovgvy B., Piglione A., Hooper P., Pham M.-S. Comprehensive assessment of the printability of CoNiCrFeMn in Laser Powder Bed Fusion. *Materials & Design.* 2020. №194. P. 108845. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108845>.

13. Kruth J.-P., Deckers J., Yasa E., Wauthlé R. Assessing and Comparing Influencing Factors of Residual Stresses in Selective Laser Melting Using a Novel Analysis Method. *Proc. Inst. Mech. Eng.* 2012. №226. P. 980–991. <https://doi.org/10.1177/0954405412437085>.

14. Adjamsky, S. V., Kononenko, G. A., Podolskyi, R. V. et al. Mechanical Properties and Microstructure of the 316L Steel Produced by Different Methods. *Powder Metall Met Ceram* 62, 436–444 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11106-024-00405-9>.

15. Additive manufactured 316l stainless-steel specimens: Microstructure, residual stress and corrosion characteristics after post-processing / Santa-Aho S.,

Kiviluoma M., Jokiaho T., Gundgire T., Honkanen M., Lindgren M., Vippola M. // *Metals*. 2021. №11. P. 182. <https://doi.org/10.3390/met11020182>.

16. T. Ronneberg, C.M. Davies, P.A. Hooper. Revealing Relationships Between Porosity, Microstructure and Mechanical Properties of Laser Powder Bed Fusion 316L Stainless Steel Through Heat Treatment, *Mater. Des.* 2020. Vol. 189, 108481. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108481>.

17. Grain boundary and microstructure engineering of Inconel 690 cladding on stainless-steel 316L using electron-beam powder bed fusion additive manufacturing / Segura I., Murr L., Terrazas C., Bermudez D., Mireles, J., Injeti V., Li K., Yu B., Misra R., Wicker R. // *J. Mater. Sci. Technol.* 2019. No. 35. P. 351–367. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.059>.

References

1. Chen W., Voisin T., Zhang Y. et al. (2019). Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel. *Nat Commun.*, 10, 4338

2. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Badyuk, S. (2022). *Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine*. Naukova Dumka. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>

3. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De A., & Zhang, W. (2017). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Prog. Mater. Sci.*, 92, 112–224

4. Adzhamsky, S. V., Kononenko, G. A., & Podolsky, R. V. (2021). Influence of SLM process parameters on the formation of the boundary region of parts made of heat-resistant nickel alloy Inconel 718. *Space Science and Technology*. 27, 6 (133). 105—114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>

5. Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.*, 13, 89–96

6. Brackett, D., Ashcroft, I., Hague, R. Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas. 2011*, 348–362

7. Adzhamsky, S. V., Kononenko, G. A., & Podolsky, R. V. (2020). Influence of technological parameters of the SLM process on the porosity of metal products. *Automatic welding*, 10, 14-20. <https://doi.org/10.37434/as2020.10.03>

8. Ulbricht, A., Altenburg, S. J., Sprengel, M., Sommer, K., Mohr, G., Fritsch, T., Mishurova, T., Serrano-Munoz, I., Evans, A., Hofmann, M., & Bruno, G. (2020). Separation of the Formation Mechanisms of Residual Stresses in LPBF 316L. *Metals*, 10, 1234

9. Nadammal, N., Cabeza, S., Mishurova, T., Fritsch, T., Kromm, A., Seyfert, C., Farahbod, L., Haberland, C., Schneider, J., Portella, P., & Bruno, G. (2017). Effect of hatch length on the development of microstructure, texture and residual stresses in selective laser melted superalloy Inconel 718. *Materials & Design*, 134, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.049>

10. Dovgvy, B., Piglione, A., Hooper, P., & Pham, M.-S. (2020). Comprehensive assessment of the printability of CoNiCrFeMn in Laser Powder Bed Fusion. *Materials & Design*, 194, 108845. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108845>

11. Wu, A. S., Brown, D. W., Kumar, M., Gallegos, G. F., & King, W. E. (2014). An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual

Stresses in 316L Stainless Steel. *Metall. Mater. Trans. A*, 45, 6260–6270

12. Dovgvy, B., Piglione, A., Hooper, P., & Pham, M.-S. (2020). Comprehensive assessment of the printability of CoNiCrFeMn in Laser Powder Bed Fusion. *Materials & Design*, 194, 108845. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108845>

13. Kruth, J.-P., Deckers, J., Yasa, E., & Wauthlé, R. (2012). Assessing and Comparing Influencing Factors of Residual Stresses in Selective Laser Melting Using a Novel Analysis Method. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 226, 980–991. <https://doi.org/10.1177/0954405412437085>

14. Adjamsky, S. V., Kononenko, G. A., Podolskyi, R. V. et al. (2023). Mechanical Properties and Microstructure of the 316L Steel Produced by Different Methods. *Powder Metall Met Ceram.*, 62, 436–444. <https://doi.org/10.1007/s11106-024-00405-9>

15. Santa-Aho, S., Kiviluoma, M., Jokiaho, T., Gundgire, T., Honkanen, M., Lindgren, M., & Vippola, M. (2021). Additive manufactured 316l stainless-steel specimens: Microstructure, residual stress and corrosion characteristics after post-processing. *Metals*, 11, 182. <https://doi.org/10.3390/met11020182>

16. Ronneberg, T., Davies, C. M., & Hooper, P. A. (2020). Revealing Relationships Between Porosity, Microstructure and Mechanical Properties of Laser Powder Bed Fusion 316L Stainless Steel Through Heat Treatment. *Mater. Des.*, 189, 108481. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108481>

17. Segura, I., Murr, L., Terrazas, C., Bermudez, D., Mireles, J., Injeti, V., Li, K., Yu.B., Misra R., & Wicker, R. (2019). Grain boundary and microstructure engineering of Inconel 690 cladding on stainless-steel 316L using electron-beam powder bed fusion additive manufacturing. *J. Mater. Sci. Technol.*, 35, 351–367. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.059>

S. V. Adjamskiy^{1,2}, Ph. D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6095-8646

R. V. Podolskyi^{1,3}, Ph. D., Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641

G. A. Kononenko^{1,4}, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

E. S. Klemeshov³, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-6486-5319

O. A. Safronova¹, Ph. D. Student, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4032-4275

¹ LLC "Additive Laser Technologies of Ukraine"

² Institute of Transport Systems and Technologies National Academy of Sciences of Ukraine

³ Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

⁴ National Technical University "Dnipro Polytechnic"

DEVELOPMENT OF RATIONAL HEAT TREATMENT REGIMES TO REDUCE RESIDUAL STRESSES IN PARTS OF COMPLEX CROSS-SECTION MADE OF 316L STEEL USING SLM TECHNOLOGY

Abstract. Residual internal stresses are one of the features of metallic materials manufactured by layer-by-layer fusion using SLM technology, but they can significantly affect mechanical properties and geometric parameters, therefore, it is necessary to take measures to reduce residual stresses. According to the results of analytical studies, it was found that the most effective way to reduce residual stresses

is heat treatment. Purpose of the study. To investigate the influence of heat treatment under different regimes on the change in internal stresses of the first kind using calculations and direct measurements as a deviation of the actual geometric parameters from the specified dimensions of a part of a complex shape manufactured using SLM technology from AISI 316L steel. Research idea. Known studies of the influence of internal stresses depending on the geometry of the part were mainly carried out on elements of a simple shape. The authors developed a model of a product with a complex cross-section, which allows assessing the influence of the wall thickness and the type of transition from a smaller to a larger cross-section. Material and research methodology. A complex-shaped part was manufactured from 316L steel powder using SLM technology according to the developed model. Using the QForm and JmatPRO programs, the deviations in the geometry of the part that arise under the influence of residual stresses after heat treatment using experimental modes (heating to 899°C, holding for 1 hour, cooling in water; heating to 650°C, 2 hours, water; heating to 550°C, 4 hours, water) were calculated and the actual geometry deviations on the product were monitored using a 3-D scanner and Geomagic ControlX software. Based on the results obtained, recommendations were given for heat treatment that will ensure effective reduction of residual stresses and preservation of the initial structure formed during manufacturing using SLM technology.

Key words: homogeneous thick sheet steel, hardness, strength, impact strength, bainite ferrite, heat treatment.

For citation: Adjamskiy, S. V., Podolskiy, R. V., Kononenko, G. A., Klemeshov, E. S., & Safronova, O. A. (2024). Development of rational heat treatment regimes to reduce residual stresses in parts of complex cross-section made of 316L steel using SLM technology. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 501-516. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-501-516>

Стаття надійшла до редакції збірника 04.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)