

## АНОТАЦІЯ

*Аджамський С. В.* Синтез конструкторсько-технологічних рішень для виготовлення деталей ракетно-космічної техніки із застосуванням вибіркового лазерного плавлення. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії PhD за спеціальністю 134 — «Авіаційна та ракетно-космічна техніка». — Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. — Дніпро, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено розробці технологічних параметрів і методології їх отримання для сучасного процесу 3D-друку складних деталей із забезпеченням певних якісних показників для виробництва авіаційної та ракетно-космічної техніки за технологією вибіркового лазерного плавлення (ВЛП).

Сучасна ракетно-космічна техніка пройшла значний шлях технологічної еволюції, використовує найпрогресивніші методи проєктування, конструювання та виробництва. Завдяки застосуванню великої кількості складних процесів і принципів відбувається продукування деталей вузлів та агрегатів, які здатні працювати на межах можливостей конструкцій і використаних матеріалів.

Однією з ключових проблем виробництва ракетно-космічних літальних апаратів (РКЛА) є необхідність застосування цілої низки складних технологічних процесів, унікального виробничого і випробувального обладнання. Крім того, галузь потребує відповідного висококваліфікованого персоналу. Утримання та розвиток даного напрямку зумовлює великі витрати, і, як наслідок, — достатньо високу вартість космічних місій.

Останнім часом виникло кілька напрямків розвитку новітніх технологій, що дозволяє значно зменшити витрати і терміни виробництва ракетно-космічної техніки, спростити виготовлення найскладніших систем ракети-носія: пневмо-гідравлічної системи, камери згорання, турбонасосу та інших. Одним з актуальних напрямків є використання адитивних технологій, а саме 3D-друку металевих деталей.

Ключовою технологією 3D-друку високоякісних складних виробів із жаростійких та кольорових сплавів є процес «вибіркового лазерного плавлення» (Powder Bed Fusion, Selective Laser Melting). Технологія передбачає локальне пошарове плавлення металевого порошку в герметичній камері, заповненій інертним газом, із вмістом кисню менше 0,1 відсотка. Джерелом енергії є волоконні ітербієві лазери з високою стабільністю випромінювання, потужністю від 100 до 1000 Вт, оптично сфокусовані в пляму діаметром 50–300 мкм. Геометричні зони сплавлення формуються за заздалегідь підготовленою програмою, отриманою шляхом програмно-математичного пошарового нарізання моделі та формування траєкторій руху лазерного променя.

Для інтеграції технології ВЛП у технологічні процеси виготовлення РКЛА необхідно використовувати високотехнологічні спеціальні сплави та відпрацьовувати для них параметри 3D-друку. Зважаючи на певні обмеження у міжнародному законодавстві стосовно обраної технології та відсутність необхідних функцій у стандартному обладнанні, для організації дослідно-практичної частини роботи було спроектовано і виготовлено експериментальну установку Alfa-150D.

Обладнання створене таким чином, щоб забезпечити герметичність усередині камери під час побудови деталі. Необхідна концентрація кисню забезпечується його витісненням більш важким інертним газом аргоном. Інертний газ подавався до камери порційно і контролювався системою керування за допомогою високоточних датчиків. Система пошарового

нанесення порошку сконструйована таким чином, щоб забезпечити рівномірне перекриття шарів товщиною 20–400 мкм з точністю не менше 2 мкм. Під час друку платформа з деталлю, що друкується, опускаються до бункера побудови, який поступово заповнюється порошком. Система керування складеться з двох підсистем: перша керує лазером та системою сканування, інша відповідає за переміщення вузлів та підтримання заданого середовища.

Для проєктування оптичної системи та системи позиціонування променя було змодельовано та виготовлено два варіанти оптичних систем, а також розв'язані задачі підтримання необхідної апертури лазерного променя по всій поверхні побудови шляхом високошвидкісної корекції фокусної відстані. Для однієї з обраних схем під час дослідження було розроблено формулу та створено модель компенсації фокусної відстані відносно положення на платформі.

Для формування стабільного середовища в зоні друку змодельовано геометрію камери, сопел вхідного та вихідного потоків газу, їх розташування. Це дало можливість визначити оптимальну газодинамічну модель розподілу потоків, які забезпечили стабільну швидкість руху газу паралельно платформі побудови. Було одержано рівномірну швидкість охолодження по всій площині у зоні формування ванни розплаву та створено умови для видалення продуктів згорання, які утворюються під час плавлення порошку.

Під час роботи 3D-принтера необхідно чітко визначати необхідну кількість порошку таким чином, щоб, з одного боку, забезпечити його достатню кількість для утворення кожного наступного шару, з іншого, — запобігти перевитраті. Для виконання цієї задачі було визначено алгоритм розподілу порошку відносно площини шару, що друкується, положення деталі на платформі, швидкості руху дозуючого пристрою та інших умов. Проведено експериментальні дослідження, за результатами яких

запропоновано формулу та розроблено методику обчислення робочих параметрів, отримані оптимальні дані по режимах дозування та швидкості нанесення матеріалів жароміцного нікель-хромового сплаву і титану.

Основною метою роботи була розробка методики визначення технологічних режимів виготовлення деталей авіаційної та космічної техніки за технологію ВЛП із жаростійкого нікель-хромового сплаву Inconel 718. При цьому якість деталей, за фізико-механічними та іншими властивостями не повинна бути гіршою за властивості матеріалів, одержаних литтям. Крім того, щільність матеріалу повинна бути більшою за 99%, хімічний склад та однорідність матеріалу мали відповідати вимогам обраного сплаву. Відповідно до цієї задачі, було запропоновано методику відпрацювання технологічних параметрів 3D-друку, що складеться з трьох етапів: визначення параметрів формування одиничних треків, формування одиничного шару та визначення параметрів для об'ємних зразків. Розрахунки параметрів одиничного треку виконані за методикою визначення ширини та глибини ванни розплаву одиничного треку, розробленою на основі формули Розенталя. Проте дана модель не враховує певних факторів та є приблизною, її необхідно коригувати для конкретних умов і використовуваного обладнання. За розрахованими значеннями питомої енергії було змодельовано площину значень швидкостей руху лазерного променя залежно від потужності випромінювання та виконано експериментальне відпрацювання обчислених технологічних параметрів для підтвердження оптимальних значень швидкості і потужності лазерного променя, сфокусованого у пляму фіксованого діаметра для заданої товщини шару. За допомогою оптичної мікроскопії проаналізовано дані, на підставі яких було систематизовано значення технологічних режимів, які забезпечують потрібну якість одиничних треків.

Наступним етапом, відповідно до запропонованої у роботі методики, є визначення оптимальної питомої енергії ВЛП-процесу. Для цього було

вибрано і досліджено одиничні шари, які створювались за режимами, визначеними на першому етапі досліджень. За результатом експерименту проведено мікроскопічний аналіз, отримані дані зведено у таблицю і проаналізовано. Встановлено оптимальний діапазон питомої щільності енергії та параметри потужності, швидкості та відстані між треками.

Заключним етапом визначення оптимальних режимів ВЛП-процесу є виготовлення об'ємних зразків із використанням технологічних параметрів, які відповідають оптимальним значенням щільності енергії, визначаються режими, які забезпечують формування об'ємних зразків із максимальною щільністю.

Конструкція деяких деталей, з яких складаються вузли та агрегати виробів, характеризується складністю форм зовнішніх поверхонь та внутрішніх порожнин, трактів та каналів. До того ж, прагнення до мінімізації маси деталей зумовлює малу товщину оболонок або стінок. За таких умов основними видами дефектів матеріалу деталей є пористість, гаряче розтріскування та внутрішні напруження. Для підвищення рівномірності й рівня комплексу механічних властивостей було запропоновано використовувати термічну обробку надрукованих виробів відповідно до обраних режимів.

Отже, у дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу.

Уперше розроблено принципи проектування обладнання для виготовлення виробів ракетно-космічної та авіаційної техніки з використанням вибіркового лазерного плавлення та його основних систем.

Уперше розроблено методики визначення робочих параметрів обладнання, режимів дозування порошку шляхом послідовного опускання платформ безпосередньо під час нанесення, швидкості нанесення шарів жароміцного сплаву і титану.

Розроблено нові методики і схеми корекції фокусної відстані для трьохосової системи сканування лазерного променя,.

Уперше відпрацьовано власну технологію отримання виробів з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 - камери згоряння рідинного двигуна та деталей турбонасосного агрегату – з високими характеристиками

Напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний з виконанням держбюджетної теми № 0119U101196 «Інтеграція технології 3D друку металевими сплавами в сучасне виробництво авіаційної та ракетно-космічної техніки»

За результатами проведеної роботи було спроєктовано та створено установку ALFA-150D для виготовлення деталей за ВЛП-технологією, розроблено власну методику відпрацювання параметрів 3D-друку. Створено компанію «АЛТ України», яка розпочала дрібносерійне виробництво обладнання і деталей ракетно-космічної техніки для провідних державних та приватних підприємств України, таких як КБ «Південне», АТ «Мотор Січ», ДП «Антонов», ДП «Івченко-Прогрес», ДПКБ «Луч», ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», ДП «ВО ПМЗ ім. О. М. Макарова», КБ «КЦКБА» та інших.

Ключові слова: Вибіркове лазерне плавлення, 3D-друк металом, технологічні параметри 3D друку для виготовлення деталей для авіаційної та ракетно-космічної техніки, Alfa-150D.

#### **Публікації, в яких оприлюднено основні наукові результати дисертації**

1. Андриевский М. В., Митиков Ю. А., Аджамский, С. В., Шамровский Д. А. (2017). Применение аддитивных технологий для производства камер сгорания ракетных двигателей. *Авиационно-космическая техника и технология*, 6(141), 17–22.

2. Аджамский С. В., Сазанишвили З. В., Ткачев Ю. В. (2018). Повышение гибкости опытно-экспериментального производства изделий

космической техники. Збірник наукових праць «Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки» 22, 8–15.

3. Аджамский С. В. (2019). Реализация slm-технологии для изготовления образцов из жаропрочного сплава inconel 718, применяемого в авиационно-космической технике. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2–2019, 69–75.

4. Аджамский С. В., Кононенко А. А. (2019), Исследование условий глубокого проплавления при изготовлении образцов из жаропрочного сплава INCONEL 718 методом выборочного лазерного плавления. *Автоматичне зварювання*. 6–2019, 65–71.

5. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Перспективы применения аддитивных технологий в авиа- и ракетостроении. «Авиационно-космическая техника и технология» ХАИ. 7–2020, 59–65.

6. Аджамский С. В., Ткачев Ю. В., Кононенко А. А. (2020). Влияние параметров SLM-процесса на формирование ванны расплава единичного трека жаропрочного никелевого сплава inconel 718. «Порошковая металлургия», ИПМ НАНУ, 9/10–2020, 137–147.

7. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Дослідження впливу напряму прикладення навантаження відносно положення при створенні деталі за технологією селективного лазерного плавлення (SLM) і режиму термічної обробки на механічні властивості жароміцного суперсплаву INCONEL. *Весник Тернопольського національного технічного університету* – 99(3), 75–85.

8. Аджамский С. В., Кононенко А. А. (2021). Дослідження впливу технологічних параметрів на якість об'ємних зразків, виготовлених методом вибіркового лазерного плавлення з inconel 718. «Металлофізика и новейшие технологии, 2021» *Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины* – 43(6), 741–752.

9. Аджамский С. В., Кононенко А. А. (2020). Закономерности влияния параметров процесса SLM на формирование единичного шару з жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718. *Автоматичне зварювання*, 1–2020, 32–38.
10. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на якість металовиробів. *Автоматичне зварювання*. 10–2020, 14–20.
11. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. *The Paton welding journal*. 10–2020, 13–19.
12. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Сазанишвили З. В., Ткачев Ю. В. (2021). Влияние временного интервала между слоями при изготовлении деталей по slm-технологии на структуру и свойства inconel 718. «*Фізико-хімічна механіка матеріалів*», *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка*, 57(1), 13–19.
13. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Дослідження впливу шорсткості на властивості зразків зі сталі AISI 316L методом реєстрації макролокалізаційних полів. *Системні технології» 4 (135)*, 3–11.
14. Adjamsky S. V., Tkachev Y. V., Kononenko G. A. (2021). Effect of Selective Laser Melting Parameters on the Melt Pool Formed by Single Tracks of the Heat-Resistant Inconel 718 Nickel Alloy. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 59(9–10), 592–600.
15. Adjamskiy S. V., Kononenko G. A., Podolskiy R.V. (2021). Analysis of Structure After Heat Treatment of Inconel 718 Heat-Resistant Alloys Made by SLM-Technology. *Металлофізика и новейшие технологии*, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, 43(7), 909–924.
16. Аджамский С. В., Кононенко Г. А., Подольский Р. В. (2021). Досвід застосування регулювання діаметра фокусної плями променя



лазера для підвищення продуктивності СЛП-процесу. *Автоматичне зварювання*, 5, 21–27.

17. Аджамский С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Бадюк С. І. (2021) Дослідження ефективності електрохімічного полірування зразків змінного перерізу з різною шорсткістю зі сталі AISI 316L, виготовлених за технологією SLM. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 170(2), 66–73.

18. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. (2021) Виготовлення тракту охолодження вдосконаленої конструкції для камери згоряння рідинного ракетного двигуна за допомогою адитивних технологій. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 171(3), 42–48.

#### **Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

19. Аджамский С.В. (2018). Формирование траекторий движения лазерного луча при 3д-печати металлом по технологии «выборочной лазерной плавки». *XI Международные молодежные научно-технические чтения им. А. Ф. Можайского*. (14–17 травня 2018, Запоріжжя),

20. Аджамский С. В. (2018). Additive technologies for space and rocket engineering. *Proceedings of the Second International Conference of European Academy of Science*. (20–28 листопада 2018, Бонн), 37.

21. Аджамский С. В. (2018). Разработка технологии изготовления изделий из никель-хромовых жаропрочных сплавов методом выборочного лазерного плавления. *VII Міжнародна конференція «Космічні технології: сучасне та майбутнє»* (21–23 травня 2019, Дніпро), 73.

22. Аджамский С. В., Кононенко А. А. (2019). Исследование условий глубокого проплавления при изготовлении образцов из жаропрочного сплава INCONEL 718 методом выборочного лазерного плавления. *Международная конференция «Материалы для сварки,*

наплавки, нанесення покриттів і 3D-технологій» (4 червня 2019, Київ), 5–12.

23. Аджамский С. В., Кононенко А. А. (2019). Закономерности влияния параметров процесса выборочного лазерного плавления (slm) на формирование единичного слоя из жаропрочного никелевого сплава inconel 718. *IX Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»* (09–12 вересня 2019, Одесса), 3–7.

24. Аджамский С. В., Кононенко А. А. (2019). Research influence of overlapping tracks on the quality of parts manufactured by the selective laser melting technology from inconel 718. *HighMathTech 2019* (28–30 жовтня 2019, Київ), 78–79.

25. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Симуляция влияния остаточных напряжений и параметров slm-технологии на формирование области границ изделия из жаропрочного никелевого сплава inconel 718. *International scientific and technical conference Information Technologies in Metallurgy and Machine building* (17–19 травня 2020, Дніпро), 4–7.

26. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Применение аддитивных технологий в авиа- и ракетостроении. *Людина і космос*. (15 квітня 2020, Дніпро), 313.

27. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Использование slm-технологии в деталях и узлах авиационно-космического назначения. *Всеукраїнська конференція молодих вчених «Молоді вчені 2020 — від теорії до практики»* (20 березня 2020, Дніпро), 6–9.

28. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Исследование влияния режимов slm-процесса на качество в области контура изделий. *Міжнародна конференція «Університетська наука — 2020»* (10–12 травня 2020, Маріуполь), 157–158.

29. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Двумерное моделирование нестационарного температурного поля единичного трека из жаропрочного сплава inconel 718. *Науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання»* (27–28 травня 2020, Кам'янське), 42–45.

30. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2020). Разработка технологии изготовления изделий для авиационно-космической техники методом выборочного лазерного плавления. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»* (16–17 травня 2020, Харків), 28–29.

31. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Дослідження впливу шорсткості на властивостей сталі AISI 316L методом реєстрації макролокалізаційних полів. *International scientific and technical conference Information Technologies in Metallurgy and Machine building – ITMM 2020* (16–18 березня 2021, Дніпро), 4–8.

32. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В., Бадюк С. І. (2021). Дослідження мікроструктури зразків зі сталі AISI 316l з контрольованим дефектом інтерференції. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доповідей I Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції*. (15 березня 2021, Київ), 655–657.

33. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Досвід застосування регулювання діаметра фокусної плями променя лазера для підвищення продуктивності СЛП-процесу. *Міжнародна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів»*. (31 травня 2021, Київ), 18.

34. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Дослідження властивостей INCONEL 718 після термічної обробки на твердий розчин за умов різного охолодження. *Литво. Металургія. 2021:*

*Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції.*(18–20 травня 2021, Запоріжжя), 249–251.

35. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Дослідження зміни ступеню деформації металу поверхні жароміцного сплаву INCONEL 718 за методом реєстрації макролокальних полів. *12 Всеукраїнська конференція молодих вчених «Молоді вчені 2021 — від теорії до практики».* (12 березня 2021, Дніпро), 6–8.

36. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Розробка параметрів друку колеса турбіни з жароміцної сталі аустенітного класу AISI 316L. *Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні».* (25 квітня 2021, Харків), 15–17.

37. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Дослідження параметрів друку об'ємних зразків з титанового сплаву Ti-6Al-4V для досягнення високої щільності. *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference (Vol. 3),* 7–78.

38. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. (2021). Simulation of surface deformation using INCONEL 718 DIC-analysis of heating alloy. *International scientific journal «Grail of Science»,* 2–3, 306–311.

39. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. (2021). Порівняльні дослідження структури та властивостей литого AISI 316L та виготовленого за технологією SLM. *Міжнародна конференція «Університетська наука — 2021»,* (10–12 травня 2021, Маріуполь), 62–64.

40. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. (2021). Дослідження впливу орієнтації при друку за SLM-технологією зразків з inconel 718 на механічні властивості. *Збірник наукових праць XVI міжнародної конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті»,* (2–5 червня 2021, Варна), 17–19.

41. Аджамський С. В., Кононенко А. А., Подольський Р. В. Про застосування адитивних технологій для виготовлення елементів камери згоряння рідинного ракетного двигуна. *XXVI Міжнародний конгрес двигунобудівників*, (6–11 вересня 2021, с.м.т. Лазурне).

42. Аджамський С. В., Кононенко А. А., Подольський Р. В. (2021) Застосування SLM-технології для виготовлення дентальних імплантів зі сплаву на основі титану. *Збірка тез X Міжнародної конференції «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів» (LTWMP-2021)*, (06–10 вересня 2021, Одеса).

## ABSTRACT

*Adzhamsyi S.V.* Synthesis of design and technological solutions for the manufacture of rocket and space technology parts using selective laser melting. — Qualification scientific work regarded as an equivalent to a manuscript.

The dissertation for seeking the scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 134 – “Aviation and Rocket and Space Technology”. – Oles Honchar Dnipro National University. – Dnipro, 2021.

The dissertation work is devoted to the development of technological parameters and methodology for their obtaining for the modern process of 3D-printing of complex parts with the provision of certain quality indicators for manufacturing in aviation and rocket and space technology using the technology of selective laser melting (SLM).

Modern rocket and space technology has passed a significant way of technological evolution and it uses the most advanced methods of design, engineering and production. The use of a large number of complex processes and principles enables production of parts of components and aggregates that are able to work on the limits of physical capabilities of structures and materials used.

One of the key problems of the production of rockets and space vehicles (RSV) is the need to use a wide range of complex technological processes and unique production and testing equipment. In addition, the industry needs appropriate highly qualified personnel. The maintenance and development of this direction causes high costs, and, as a result, a sufficiently high cost of space missions.

Recently, several areas of development of the latest technologies have emerged, which can significantly reduce the costs and production time in rocket and space technology and make production of the most complex systems of the launch vehicle easier: the pneumatic and hydraulic system, combustion chambers,

turbo pumps and others. One of the key directions is the use of additive technologies, namely, 3D printing of metal parts.

The key technology of 3D printing of high-quality complex products made of heat-resistant and nonferrous alloys is the process of "selective laser melting" (Powder Bed Fusion). This technology involves local layer-by-layer melting of metal powder in an airtight chamber filled with inert gas, with residual oxygen of less than 0.1 percent. As the source of energy, ytterbium fiber lasers with high radiation stability are used. The power of their radiation of 100 to 1000 W is optically focused into a spot of 50 to 300  $\mu\text{m}$ . Geometric zones of melting and fusion are formed according to a preliminarily prepared program obtained by mathematical and algorithmic slicing a 3D model into layers and forming the trajectories of the laser beam.

To integrate SLM technology into the technological processes of RSV production, it is necessary to use highly technological special alloys and work out for them all the technological parameters of 3D printing. Considering certain limitations as for this technology imposed by the international law and absence of the necessary functions in the standard equipment, for facilitating the research and practical part of this degree work, an experimental device Alfa -150D was designed and produced.

This equipment is designed to ensure airtightness inside the chamber during the formation of a part. The required residual concentration of oxygen is ensured by its displacement by a heavy inert gas argon. The inert gas is injected into the chamber in portions and is controlled by the control system using high-precision sensors. The system for application of layers of the metal powder is designed in a way that ensures even overlapping of layers 20 to 400  $\mu\text{m}$  thick with the accuracy not less than 2  $\mu\text{m}$ . During the printing, the platform with the part being printed is descending, as new layers are formed, into the building shaft, the latter being gradually filled in with the powder. The control system is composed of two subsystems: one controls the laser and scanning system, the

other is responsible for movements of components and maintenance of the specified environment.

For development of the optical system and ray positioning system, two variants of optical systems were simulated and manufactured, and also the problems of maintaining the required aperture of the laser beam over the entire surface of the construction by high-speed correction of focal length were solved. For one of the variants, a formula was derived and a model of compensation of focal length relative to the position on the platform was created.

To form a stable environment in the print area, the geometry of the chamber, the nozzles of the input and output gas flows and their location were simulated. This enabled determination of optimal gas-dynamic model of the flow distribution of movement of gas in parallel with the building platform. Uniform speed of cooling over the whole area in the zone of formation of molten basin and conditions for removal of combustion products that are formed during the melting of the powder were ensured.

During operation of the 3D-printer, it is necessary to clearly determine the required amount of powder in such a way that, on the one hand, to ensure its sufficient amount to form each subsequent layer and, on the other hand, to prevent its excessive consumption. For achieving this, an algorithm of spreading powder depending on the area of the layer being printed, positioning of the part on the platform, speed of motion of the dosing device and other conditions was determined. Experimental studies were carried out, basing on the results of which a formula was proposed and a methodology for calculating the working parameters was developed, optimal data on the dosage and speed of application of materials of heat-resistant nickel-chrome alloy and titanium were obtained.

The main purpose of the work was to develop modes of manufacturing parts of aviation and space technology out of heat-resistant nickel-chrome alloy Inconel 718 with the use of the SLM technology. At that, the quality of products, in their physical, mechanical and other properties was not to be inferior to the



properties of same products produced by casting. Besides, the density of the material of printed parts was to be more than 99%, its chemical composition and homogeneity were to match requirements to the chosen alloy. In accordance with this task, the methodology for working out the technological parameters of 3D-printing was proposed, which consists of three stages: determining the parameters of the formation of single tracks, a single layer and 3D samples. Calculations of parameters of a single track were done according to the method of determination of the width and depth of the molten basing of a single track based on the Rosenthal equation. However, this model does not take into account certain factors and is approximate, it has to be adjusted for specific conditions and equipment used. According to the calculated values of specific energy, the plane of the laser beam movement velocity values depending on the radiation power was simulated and experimental testing of the calculated technological parameters was performed to confirm the optimal values of the speed and power of the laser beam focused into a spot of fixed diameter for a given layer thickness. With the help of optic microscopy, the data analyzed, on the basis of which the values of technological modes that provide the desired quality of single tracks were systematized.

The next step, according to the methodology proposed in this work, is to determine the optimal specific energy of the SLM process. For this, individual layers formed in the modes determined on the first stage of research were selected and studied. As a result of this experiment, microscopic analysis was carried out, the obtained data were summarized in a table and analyzed. The optimal range of the specific density, parameters of the power and speed and distance between the tracks were determined.

The final stage of determining the optimal modes of SLM process is the manufacture of 3D samples with the use of technological parameters that correspond to the optimal values of energy density; modes that ensure the formation of volumetric samples and with maximum density are determined.

The design of some parts, of which units and aggregates of products are assembled, is characterized by complexity of the forms of external surfaces and internal cavities, tracts and channels. Besides, the striving for minimization of the mass of the parts leads to small thickness of the shells or walls. In this situation, the main kinds of defects of the material are porosity, hot cracking and internal strains. For improvement of uniformity and a range of mechanical properties, it was proposed to use heat treatment of printed products in accordance with the chosen modes.

Thus, in this dissertation work, an essential scientific and technical problem of manufacturing parts for the space industry, a combustion chamber of a high-altitude liquid propellant engine with a thrust of 350 kgf was created, parts of an experimental engine chamber and a turbopump were made.

The direction of research is directly related to the implementation of the state budget theme № 0119U101196 "Integration of 3D printing technology with metal alloys in the modern production of aviation and rocket and space technology"

On the basis of the results of this work, the ALFA-150D installation was designed and produced for the manufacture of parts using SLM technology; an own method of working out the parameters of 3D-printing was developed. The company "ALT Ukraine" was established, which began small-batch production of equipment and parts for rocket and space industry and for Ukrainian state-owned and private enterprises, such as "Yuzhnoye Design Office" state enterprise, "Motor Sich" joint-stock company, "Antonov" state enterprise, "Ivchenko-Progress" state enterprise, "Design Office Luch" state enterprise, "Zorya-Mashproekt Scientific and Manufacturing Complex of Gas Turbine Manufacturing" state enterprise, "Yuzhmash Manufacturing Association Named After O. M. Makarov" state enterprise, "PA UMZ them. O.M. Makarova", "KCKBA" design office and others.

Our own scheme and the formula for correcting the focal length for the three-axes laser beam scanning system are proposed.

For the first time, a system for correcting the process of dosing powder by sequential lowering of platforms during powder application was proposed.

Keywords: selective laser melting, 3D metal printing, technological parameters of 3D printing for manufacturing parts for aviation and rocket and space industries, Alfa-150D.