

УДК 621.454.2.034-71:004.9

doi: 10.32620/akt.2021.3.05

С. В. АДЖАМСЬКИЙ¹, Г. А. КОНОНЕНКО^{1,2}, Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ^{1,2}¹ LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Україна² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Україна

ВИГОТОВЛЕННЯ ТРАКТУ ОХОЛОДЖЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ РІДИННОГО РАКЕТНОГО ДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Створення складних конструкційних елементів літальних апаратів з використанням адитивних технологій є перспективним та набуває широкого застосування, оскільки такі елементи мають ряд конструктивних та технологічних переваг в порівнянні зі збиранням окремих готових деталей. Однак воно потребує вирішення ряду науково-технічних завдань для отримання виробів високої точності і щільності, розроблення технологічного процесу, відпрацювання режимів, а інколи і розробки нової конструкції виробів. При кутах нахилу похилих поверхонь більше 45° , при виготовленні деталей за технологією селективного лазерного плавлення виникають особливі умови, які спричиняють деякі обмеження. Оскільки треки, які формують нижній шар (down-skin) похилої поверхні значною мірою лягають не на передній шар металеві деталі, а на порошок, що оточує деталь, то ванна розплаву «провалюється» в порошок, відбувається проривання ванни розплаву, порушення суцільності треку. Як наслідок, нижній шар (down-skin) сформованих похилих під кутом більше 45° та горизонтальної поверхні має високу шорсткість. Досліджували зразки елементів тракту охолодження з вдосконаленою конструкцією (форма каналів у вигляді паралелограмів з гострим кутом 45°) та з вихідною конструкцією (форма каналів у вигляді прямокутників) при зміні куту нахилу каналів відносно осі Z. За результатами візуально-оптичного аналізу та визначення шорсткості down-skin, було встановлено, що при кутах нахилу до осі $Z \geq 75^\circ$ при вихідній конструкції каналів поперечна поверхня каналу може навіть не сформуватися або мати значні відхилення від заданої геометрії, а при вдосконаленій конструкції каналів лише децю підвищується шорсткість down-skin. З аналізу зміни шорсткості при кутах нахилу каналів відносно осі Z в інтервалі $40 \dots 60^\circ$ встановлено, що зразки з вдосконаленою конструкцією каналів мають близькі значення шорсткості ($5 \dots 6,5$ мкм), а для зразків з вихідною конструкцією каналів шорсткість значно змінювалась ($6 \dots 22$ мкм). Було розроблено модель та виготовлено тракт охолодження камери згоряння з каналами вдосконаленої конструкції та кутом нахилу каналів 74° . Показано можливість виготовлення тракту охолодження камери згоряння з кутом нахилу каналів відносно осі Z за технологією селективного лазерного плавлення при високій щільності металу та малій шорсткості поверхні внутрішніх каналів.

Ключові слова: адитивні технології; камера згоряння; внутрішні канали; кут нахилу; шорсткість.

Вступ

Застосування адитивних технологій для виготовлення елементів конструкції літальних апаратів (двигунів) зі складними геометричними параметрами набувають широкого застосування, оскільки такі елементи мають ряд конструктивних та технологічних переваг в порівнянні зі збиранням окремих готових деталей. Більшість конструкційних елементів літальних апаратів виготовляються традиційними способами виробництва: ливарний, за допомогою створення воскових форм і відливанням сплаву для отримання деталі з приблизними розмірами; виробництво деталей за допомогою механічної обробки на фрезерувальних та токарських верстатах.

Використання виробів, виготовлених за таким принципом дозволяє зменшити масу конструкції зі збереженням міцності (можливість проведення то-

пологічної оптимізації), знизити витрати на складальні роботи, можливе виготовлення монолітних виробів з готовими функціональними елементами (охолоджуючі канали, внутрішні отвори, та інше). Виготовлення та проектування сучасних конструкцій авіаційного призначення можливо здійснювати за допомогою комп'ютерних CAD-моделей, тим самим мінімізувати використання верстатів та порталів з ЧПК та похибки механічної обробки.

Створення складних конструкційних елементів літальних апаратів з використанням адитивних технологій потребує вирішення ряду науково-технічних завдань, які пов'язані з розробленням виробничого комплексу, за допомогою якого будуть отримані вироби високої точності і щільності, розроблення технологічного процесу, відпрацювання режимів.

Аналіз останніх досліджень. Деякі особливості геометрії деталей (краї що звисають, похилі поверхні,

тонкі стінки, ажурні конструкції, змінний переріз, отвори) вимагають спеціальних умов сканування, наприклад, подвійний обхід по контуру тонкого профілю, перерозподіл енергії лазерного випромінювання в пучку, а також, можливо, зміна потужності і швидкості сканування лазерного променя.

Для мінімізації термічних напружень та шорсткості поверхонь при реалізації SLM-технології передбачено низку можливостей з управління параметрами процесу: різні типи треків, поворот і зміщення шарів щодо попередніх, різні стратегії друку та постобробку [1].

Шари в залежності від геометрії розбиваються на зони, згідно яким будуються траєкторії руху і встановлюються типи треків зі своїми параметрами потужності і швидкості руху лазерного променя. Дані типи треків можна рознести на три основні групи: нижній шар (down-skin), внутрішній шар (in-skin), верхній шар (up-skin) [2]. При цьому в кожній групі створюються свої підгрупи: заливка (hatches), контур (border), постконтур (fillborder) як показано в роботі [2].

При кутах нахилу похилих поверхонь більше 45° , при виготовленні деталей за технологією селективного лазерного плавлення виникають особливі умови, які спричиняють деякі обмеження. Для забезпечення високої щільності металевих зразків при виготовленні за технологією селективного лазерного плавлення раціональними вважаються режими, при яких глибина проплаву складає 2-2,5 товщини робочого шару. При кутах нахилу поверхні відносно вертикальної осі Z більше 45° (до горизонтальної, при якій кут складає 90°) треки, які формують нижній шар (down-skin) похилої поверхні значною мірою лягають не на попередній шар металеві деталі, а на порошок, що оточує деталь. В результаті ванна розплаву «провалюється» в подушку з порошку, відбувається проривання ванни розплаву, порушення суцільності треку. Як наслідок, нижній шар (down-skin) сформованих похилих під кутом більше 45° та горизонтальної поверхні має високу шорсткість. При застосуванні адитивних технологій для виготовлення виробів з внутрішніми каналами, якими має циркулювати рідина або газ, висока шорсткість може суттєво впливати на гідро- та аеродинаміку [3-6].

Для запобігання «провалюванню» зазвичай при виробництві за технологією селективного лазерного плавлення застосовують допоміжні конструкції – підтримки. Після завершення побудови деталі зазвичай підтримки механічно видаляються. Але для виробів з внутрішніми каналами цей підхід застосувати не можна.

Таким чином, необхідне застосування комплексного підходу до вирішення завдання створення тракту охолодження камери згоряння РРД: з вдосконаленням його конструкції (зміна геометрії каналів), і технологічних параметрів селективного лазерного плавлення.

Мета роботи

Проектування та виготовлення тракту охолодження камери згоряння рідинного ракетного двигуна (РРД) за технологією селективного лазерного плавлення.

Матеріал і методика досліджень

Матеріалом для досліджень були зразки, виготовлені з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. Хімічний склад порошку Inconel 718, % ваг.: Cr=18,8; Ni=53,1; Mo=3,2; Ti=1,07; Nb=5,35; C=0,003. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-150D виробництва компанії ТОВ «АЛТ України» (рис. 1) [2].



Рис. 1. 3D – принтер «Альфа – 150D» виробництва компанії ТОВ «АЛТ України»

Для визначення раціональних кутів нахилу каналів тракту охолодження та їх конструкції каналів, були виготовлені дослідні зразки. Дослідні зразки мають форму прямокутника розмірами 30x25x6 мм з кроком будування внутрішніх каналів 4 мм. Дослідні зразки були виготовлені з вдосконаленою конструкцією (форма каналів у вигляді паралелограмів з гострим кутом 45°) та з вихідною конструкцією (форма каналів у вигляді прямокутників) (рис. 2).

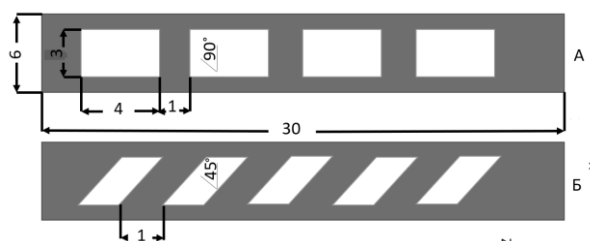


Рис. 2. Схема конструкції каналів охолоджувального тракту: а – вихідна; б – вдосконалена

Для обох типів конструкції виготовили серії зразків зі зміною кутів нахилу каналів відносно осі

Z(90°, 75°, 60°, 50°, 45°, 40°) Моделі зразків показані на рис. 3. Дослідні зразки складаються з закритої області (присутні внутрішня та зовнішня поверхні тракту), та відкритої області (відсутня зовнішня поверхня тракту, присутня лише внутрішня поверхня). Наявність відкритої області дозволяє оцінити шорсткість внутрішніх поверхонь каналів. Зразки друкувались за оптимальними режимами процесу [7] при постійній потужності, швидкості сканування та відстанню між треками.

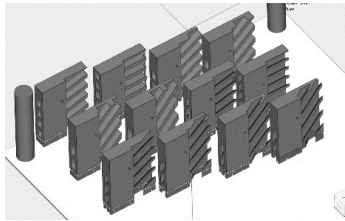


Рис. 3. Моделі зразків охолоджуючих каналів різної конструкції

Дослідження мікроструктури проводилась на оптичних мікроскопах Olympus Tokyo та Carl Zeiss AxioVert 200M mat. Був проведений контроль шорсткості поверхні за допомогою прибору BioBase.

Результати досліджень

Дослідження мікроструктури бічних поверхонь зразків показали, що структура є однорідною та рівномірною, середня щільність металу складає 99,93 % (рис. 4).

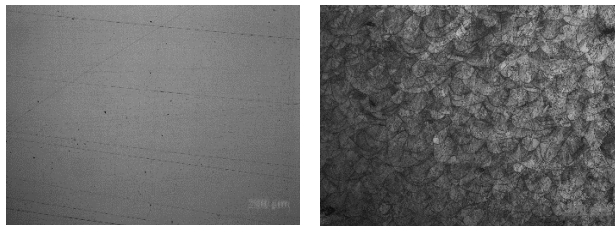


Рис. 4. Мікроструктурні дослідження основного тіла контуру дослідних зразків

Дослідження за допомогою візуально-оптичного аналізу показали, що на зразках в області відкритого тракту з вихідною конструкцією каналів при менших кутах нахилу відносно осі Z (до 50°) не спостерігається «провалювання» розплавленого металу для down-skin, нижня поверхня має незначну шорсткість (рис. 5).

При збільшенні куту нахилу більше 50° по осі Z, спостерігали значне збільшення шорсткості, відхилення від заданої геометрії, при куті 90° відносно осі

Z поперечна стінка каналу практично не сформувалася. При візуально-оптичному аналізі зразків елементів тракту охолодження вдосконаленої конструкції встановлено, що при великих кутах нахилу каналів відносно осі Z аж до 90° ефекту «провалювання» металу не спостерігали, внаслідок цього була сформована якісна поверхня з невеликою шорсткістю.

В роботі проведено контроль шорсткості поверхні зі сторони, яка схильна до «провалювання» в порошок – нижньої поверхні поперечної стінки каналів (рис. 6). Це дозволило визначити кути нахилу каналів відносно осі Z та підтвердити перспективність застосування вдосконаленої конструкції каналів, оскільки висока шорсткість суттєво впливає на проходження охолоджуючого середовища через високий коефіцієнт тертя. З аналізу отриманих даних встановлено, що для зразків з вихідною конструкцією каналів(прямокутною) куту нахилу чинить значний вплив на шорсткість поверхні через «провалювання» в подушку з порошку, що може ускладнювати проходження охолоджуючого середовища по таким каналам. Зразки елементів тракту охолодження з вдосконаленою конструкцією каналів при куті нахилу відносно осі Z 60°, 50°, 45°, 40° мають шорсткість 6,72, 6,42, 5,3, 4,78 мкм відповідно, а при кутах нахилу 75° та 90° мають шорсткість значно меншу, порівняно з каналами вихідної конструкції, що дає вирішення поставленої проблеми виготовлення трактів охолодження камери згоряння за технологією селективного лазерного плавлення.

На підставі аналізу отриманих результатів встановлено, що при зміні конструкції каналів тракту охолодження (у вигляді паралелограму з гострим кутом 45°) вирішується проблема обмеження застосування селективного лазерного плавлення для каналів з кутом нахилу каналів відносно осі Z більше 45°. Більше того, оскільки на зразках було підтверджено ефективність рішення навіть для каналів з кутом нахилу відносно осі Z 90°, то стає можливим створення каналів з максимальними кутами і протяжністю каналів тракту охолодження камери згоряння. Використання вихідної конструкції каналів (прямокутної форми) для кутів нахилу більше 50° не гарантує високої якості побудови через проплавлення, тим самим збільшуючи шорсткість поверхні, що характеризує складність проходження охолоджуючого середовища.

За результатами досліджень було встановлено, що технологія селективного лазерного плавлення може бути застосована для виготовлення тракту охолодження при значному куті нахилу каналів з гарантованою якістю внутрішньої будови та шорсткості зовнішньої нижньої поверхні поперечних стінок каналів.













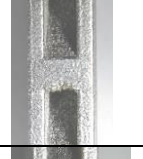





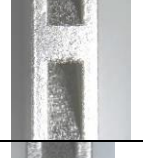





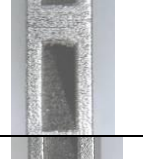
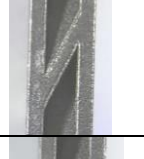

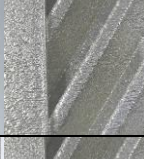
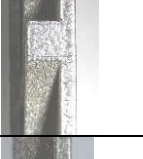







Нахил відносно осі Z	Тип конструкції каналів					
	вихідний	вдосконалений	вихідний	вдосконалений	вихідний	вдосконалений
90°						
75°						
60°						
50°						
45°						
40°						

Рис. 5. Результати візуально-оптичного контролю

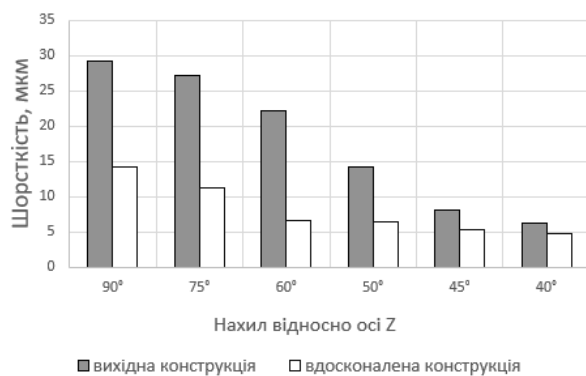


Рис. 6. Результати контролю шорсткості

Було розроблено модель та виготовлено тракт охолодження камери згоряння з каналами вдосконаленої конструкції та кутом нахилу каналів 74°. Загальний вигляд готової деталі представлений на рис. 7. В моделі тракту охолодження навмисно частково видалено зовнішню поверхню для демонстрації особливостей конструкції каналів.



Рис. 7. Загальний вигляд тракту охолодження з демонстрацією конструкції каналів

Таким чином, в результаті роботи розроблено вдосконалену конструкцію каналів тракту охолодження, на тестових зразках визначено вплив куту нахилу каналів та їх конструкції на шорсткість нижнього шару поперечної поверхні каналів, розроблено модель та виготовлено демонстраційну деталь

камери згоряння з вдосконаленою конструкцією каналів.

Висновки

1. Побудовані зразки з фрагментами тракту охолодження камери згоряння.

2. Встановлено вплив конструкції каналів тракту охолодження при кутах нахилу каналів відносно осі Z більше 60° на відповідність заданих геометрії каналів в області down-skin: при вдосконаленій конструкції каналів геометрія відповідає заданій, а при вихідній конструкції каналів – не відповідає.

3. З аналізу зміни шорсткості при кутах нахилу каналів відносно осі Z в інтервалі $40...60^\circ$ встановлено, що зразки з вдосконаленою конструкцією каналів мають близькі значення шорсткості ($5...6,5$ мкм), а для зразків з вихідною конструкцією каналів шорсткість значно змінювалась ($6...22$ мкм).

4. Показано можливість виготовлення тракту охолодження камери згоряння з кутом нахилу каналів відносно осі Z за технологією селективного лазерного плавлення при високій щільності металу та малій шорсткості поверхні внутрішніх каналів.

Література

1. Kaynak, Y. *Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing*. [Text] / Y. Kaynak, E. Tascioglu. // Prog Addit Manuf. – 2020. – vol.5. – P. 221–234. DOI: 10.1007/s40964-019-00099-1.

2. Аджамский, С. В. *Перспективы применения аддитивных технологий в авиа- и ракетостроении* [Текст] / С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2020. – № 7 (167). – С. 59-65. DOI: 10.32620/aktt.2020.7.09.

3. *Исследование гидравлических характеристик тракта охлаждения модельного жидкостного ракетного двигателя, изготовленного с применением аддитивной технологии селективного лазерного плавления* [Текст] / Д. А. Ягодников, В. П. Александренков, К. Е. Ковалев [и др.] // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. – 2019. – № 6(129). – С. 41-52. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-6-41-52.

4. Пелевин, Ф. В. *Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для ЖРД* [Текст] / Ф. В. Пелевин, А. В. Пономарев, П. Ю. Семенов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2015. – № 6. – С. 74-81. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-698.

5. Зубков, Н. Н. *Влияние параметров теплообменных штырьковых структур на их эксплуатационные характеристики* [Текст] / Н. Н. Зубков, Ю. Л. Битюцкая // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баума-*

на. Сер.: Машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 108–120. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-108-120.

6. Артемов, А. Л. *Отработка конструктивных и технологических решений для изготовления опытных образцов внутренней оболочки камеры сгорания многофункционального жидкостного ракетного двигателя с использованием аддитивных технологий* [Текст] / А. Л. Артемов, В. Ю. Дядченко, А. В. Лукьяшко // *Космическая техника и технология*. – 2017. – № 1. – С. 50–62.

7. Adjamsky, S. V. *Effect of Selective Laser Melting Parameter on the Melt Pool Formed by Single Tracks of the Heat-Resistant Inconel 718 Nickel Alloy* [Text] / S. V. Adjamsky, Y. V. Tkachev, G. A. Kononenko // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2021. – vol. 59, №. 9-10. – P. 592-600. DOI: 10.1007/s11106-021-00183-8.

References

1. Kaynak, Y., Tascioglu, E. *Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing*. *Progress in Additive Manufacturing*, 2020, vol. 5, pp. 221–234. DOI: 10.1007/s40964-019-00099-1.

2. Adjamskiy, S. V., Kononenko, G. A., Podolskiy, R. V. *Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologiy v avia- i raketostroenii* [Prospects for the application of additive technologies in aircraft and rocket engineering]. *Aviatsionno-kosmichna tekhnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 7 (167), pp. 59-65. DOI: 10.32620/aktt.2020.7.09.

3. Yagodnikov, D. A., Aleksandrenkov, V. P., Kovalev, K. E., Grigoryants, A. G., Drenin, A. A. *Issledovanie gidravlicheskih harakteristik trakta ohlazhdeniya model'nogo zhidkostnogo raketnogo dvigatelja, izgotovlennogo s primeneniem additivnoj tekhnologii selektivnogo lazernogo plavleniya* [Investigation of the hydraulic characteristics of the cooling path of a model liquid-propellant rocket engine manufacture during the additive technology of selective laser melting]. *Vestnik MGTU im. N. Je. Bauman. Ser.: Mashinostroenie – Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser.: Mechanical engineering*, 2019, no. 6 (129), pp. 41-52. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-6-41-52.

4. Pelevin, F. V., Ponomarev, A. V., Semenov, P. Yu. *Rekuperativnyj teploobmennyy apparat s poristym metallom dlja ZhRD* [Recuperative heat exchanger with porous metal for rocket engine]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie – News of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 2015, no. 6, pp. 74-81. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-698.

5. Zubkov, N. N., Bityutskaya, Yu. L. *Vlijanie parametrov teploobmennyykh shtyr'kovykh struktur na ih jekspluatacionnye harakteristiki* [Influence of the parameters of heat exchange pin structures on their performance characteristics]. *Vestnik MGTU im. N. Je.*

Baumana. Ser.: Mashinostroenie – Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser.: Mechanical engineering, 2017, № 2, pp. 108–120. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-108-120

6. Artemov, A. L., Dyadchenko, V. Yu., Lukyashko, A. V. Otrabotka konstruktivnyh i tehnologicheskikh reshenij dlja izgotovleniya opytnykh obrazcov vnutrennej obolochki kamery sgoraniya mnogofunkcional'nogo zhidkostnogo raketnogo dvigatelja s ispol'zovaniem additivnykh tehnologij [Development of design and technological solutions for the manufacture of prototypes of the inner shell of the

combustion chamber of a multifunctional liquid-propellant rocket engine using additive technologies]. *Kosmicheskaja tehnika i tehnologii – Space engineering and technology*, 2017, no. 1, pp. 50–62.

7. Adjamsky, S. V., Tkachev, Y. V., Kononenko, G. A. 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*, 2021, vol. 59, no. 9-10, pp. 592-600. DOI: 10.1007/s11106-021-00183-8.

Надійшла до редакції 12.04.2021, розглянута на редколегії 20.05.2021

MANUFACTURE OF A COOLING PATH OF AN ADVANCED DESIGN FOR THE COMBUSTION CHAMBER OF A LIQUID ROCKET ENGINE USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

S. Adjamskiy, G. Kononenko, R. Podolskiy

The creation of complex structural elements of aircraft using additive technologies is promising and is widely used since such elements have many design and technological advantages over the collection of individual finished parts. However, it requires the solution of many scientific and technical problems to obtain products of high accuracy and density, develop a technological process, work out modes, and sometimes develop a new design of products. When the angles of inclination of the inclined surfaces are more than 45 °, in the manufacture of parts using the technology of selective laser melting, special conditions arise that cause some restrictions. Since the tracks that form the bottom layer (down-skin) of the inclined surface largely lie not on the previous layer of the metal part, but on the powder surrounding the part, the melt pool "falls through" into the powder, the melt pool breaks through, disrupting the track continuity. As a consequence, the bottom layer (down-skin) of the formed inclined at an angle of more than 45 °, and the horizontal surface has a high roughness. We studied samples of elements of the cooling path with an improved design (the shape of the channels in the form of parallelograms with an acute angle of 45 °) and with the original design (the shape of the channels in the form of rectangles) with a change in the angle of inclination of the channels relative to the Z-axis. According to the results of visual-optical analysis and determination of the down-skin roughness, it was found that at tilt angles to the Z-axis $\geq 75^\circ$ with the original design of the channels, the transverse surface of the channel may not even form or have significant deviations from the specified geometry, and with the improved design of the channels, the roughness of the down-skin is only slightly increased. From the analysis of the change in roughness at tilt angles of the channels relative to the Z-axis in the range of 40...60 °, it was found that samples with an improved channel design have similar roughness values (5...6.5 μm), and for samples with an original channel design, the roughness changed significantly (6...22 μm). A model was developed and a combustion chamber cooling path was manufactured with channels of an improved design and an angle of inclination of the channels of 74 °. The possibility of manufacturing a combustion chamber cooling duct with an angle of inclination of the channels relative to the Z-axis using the technology of selective laser melting at a high metal density and low surface roughness of the inner channels is shown.

Keywords: additive technologies; combustion chamber; internal channels; angle of inclination; roughness.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРАКТА ОХЛАЖДЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский

Создание сложных конструктивных элементов летательных аппаратов с использованием аддитивных технологий является перспективным и получает широкое применение, поскольку такие элементы имеют ряд конструктивных и технологических преимуществ по сравнению со сбором отдельных готовых деталей. Однако оно требует решения ряда научно-технических задач для получения изделий высокой точности и плотности, разработки технологического процесса, отработки режимов, а иногда и разработки новой конструкции изделий. При углах наклона наклонных поверхностей более 45 °, при изготовлении деталей по технологии селективного лазерного плавления возникают особые условия, вызывающие некоторые ограничения. Поскольку треки, которые формируют нижний слой (down-skin) наклонной поверхности в значительной степени ложатся не на предыдущий слой металлической детали, а на порошок, окружающий деталь, то ванна расплава «проваливается» в порошок, происходит прорыв ванны расплава, нарушения сплошности трека.

Как следствие, нижний слой (down-skin) сформированных наклонных под углом более 45° и горизонтальной поверхности имеет высокую шероховатость. Исследовали образцы элементов тракта охлаждения с усовершенствованной конструкцией (форма каналов в виде параллелограммов с острым углом 45°) и с исходной конструкцией (форма каналов в виде прямоугольников) при изменении угла наклона каналов относительно оси Z. По результатам визуально-оптического анализа и определения шероховатости down-skin, было установлено, что при углах наклона к оси $Z \geq 75^\circ$ при исходной конструкции каналов поперечная поверхность канала может даже не сформироваться или иметь значительные отклонения от заданной геометрии, а при усовершенствованной конструкции каналов только несколько повышается шероховатость down-skin. Из анализа изменения шероховатости при углах наклона каналов относительно оси Z в интервале $40 \dots 60^\circ$ установлено, что образцы с усовершенствованной конструкцией каналов имеют близкие значения шероховатости ($5 \dots 6,5$ мкм), а для образцов с исходной конструкцией каналов шероховатость значительно менялась ($6 \dots 22$ мкм). Было разработано модель и изготовлено тракт охлаждения камеры сгорания с каналами усовершенствованной конструкции и углом наклона каналов 74° . Показана возможность изготовления тракта охлаждения камеры сгорания с углом наклона каналов относительно оси Z по технологии селективного лазерного плавления при высокой плотности металла и малой шероховатости поверхности внутренних каналов.

Ключевые слова: аддитивные технологии; камера сгорания; внутренние каналы; угол наклона; шероховатость.

Аджамський Сергій Вікторович – директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Кононенко Ганна Андріївна – канд. техн. наук, учений секретар, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, інженер- матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Подольський Ростислав Вячеславович – провідний інженер, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, інженер- матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Sergey Adjamskiy – Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, Dnipro, Ukraine, e-mail: info@alt-print.com, ORCID: 0000-0002-6095-8646.

Ganna Kononenko – Cand. Technical science, scientific secretary, Institute of Iron and Steel of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, materialsengineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105.

Rostislav Podolskiy – Lead Engineer, Institute of Iron and Steel of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, materialsengineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0288-0641.