

УДК 629.7.036

Трибологические исследования деталей авиационных двигателей, полученных методом селективного лазерного сплавления

С. Д. Селиверстов¹, И. А. Николаев², О. А. Быценко³

¹seliverstovsd@mai.ru, ²racer4500@mail.ru, ³oksiwear@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Поступила в редакцию 03.08.2021

Аннотация. Проводится исследование фреттинг-стойкости деталей газотурбинных двигателей, полученных методом селективного лазерного сплавления. Изучена микроструктура получаемых изделий из сплава CL 20ES. Описана экспериментальная установка – машина трения, а также методика исследования. Проведены испытания для аддитивных образцов, изготовленных под углами 0 и 90° к платформе построения, а также для образцов из прутка. Определена величина объемного износа для двух режимов испытаний.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление; микроструктура; фреттинг; лопатка; газотурбинный двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок (ЭУ) показывает, что к поломке деталей приводят в основном поверхностные повреждения, возникающие из-за накапливающихся усталостных дефектов [0, 0, 0]. Причиной же возникновения большинства усталостных дефектов является фреттинг-износ. В данной работе приведены результаты сравнительных трибологических испытаний для оценки стойкости аддитивных деталей из металла к фреттинг-износу.

Ресурс и надежность элементов ГТД и ЭУ зависит от условий окружающей среды и возникающих в процессе эксплуатации повреждений, связанных с усталостью, износом и фреттинг-износом [5]. Если процесс усталостного разрушения и механического изнашивания, в настоящее время, поддается расчету и прогнозированию, то процесс фреттинг-износа зачастую носит спонтанный характер, а его избежание в процессе эксплуатации носит зачастую эмпирический характер. В связи с этим при замене материала и/или технологии изготовления деталей, работающих в условиях фреттинга, необходимо проводить дополнительные исследования на фреттингостойкость.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследования проводились на разработанной на кафедре 205 МАИ машине трения [0] (рис. 1). Установка реализована по схеме, где осуществляется возвратно-поступательное движение образцов с контактами различных типов. Исследуемый тип контактного взаимодействия – сфера/плоскость (рис. 2). В качестве контртела использовалась сфера из оксида алюминия. Испытания проводились при нормальной силе в контакте (F_n) равной 1 и 4 Н. Перемещение трущихся тел (D) составляло 5 мкм. Число циклов перемещения $n = 10^5$. Чер-

тежи исследуемых образцов представлены на рис. 3, схемы выращивания образцов представлены на рис. 4. Всего было изготовлено 3 образца: 1 образец, сделанный из горячекатанного прутка стали 316L, а также 2 образца, сделанных по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) на установке M2 Cusing компании Concept Laser из порошка стали CL 20ES. Перед испытаниями аддитивные образцы прошли микроструктурный и спектральный анализ для подтверждения соответствия качества (отсутствие видимых дефектов, действительный химический состав и пр.). На каждом из образцов было проведено по 3 цикла испытаний для каждого из режимов износа.

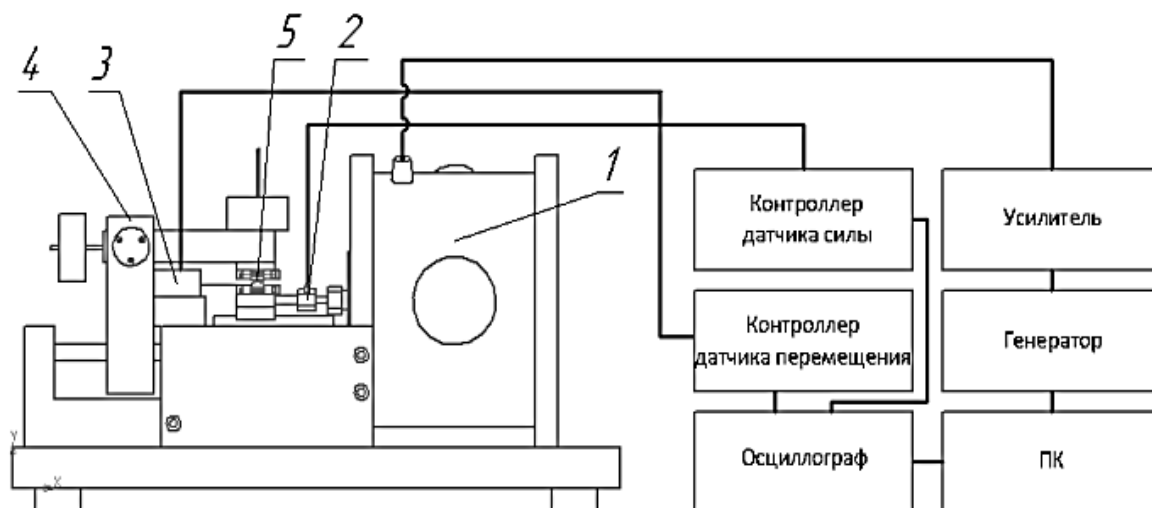


Рис. 1. Схема машины трения:

1 – электромагнитный вибратор; 2 – датчик силы; 3 – датчик перемещения;
4 – система нагружения; 5 – место контакта образцов

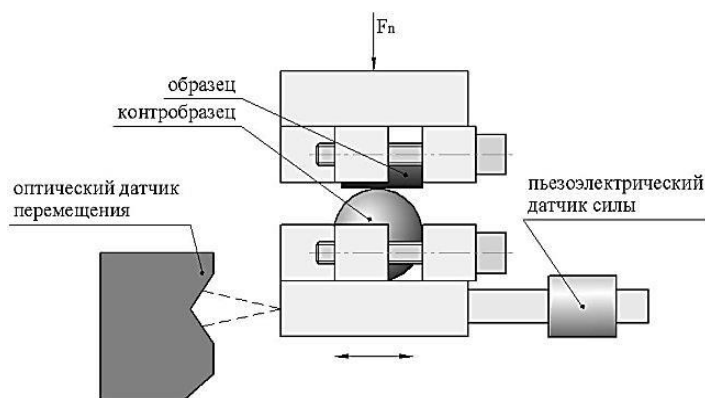


Рис. 2. Схема контакта образцов

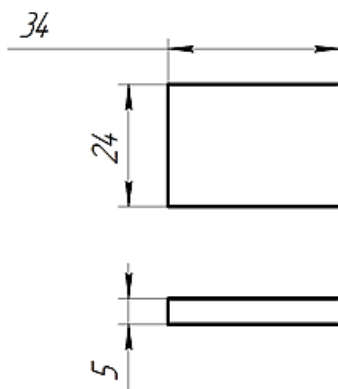


Рис. 3. Эскиз образцов

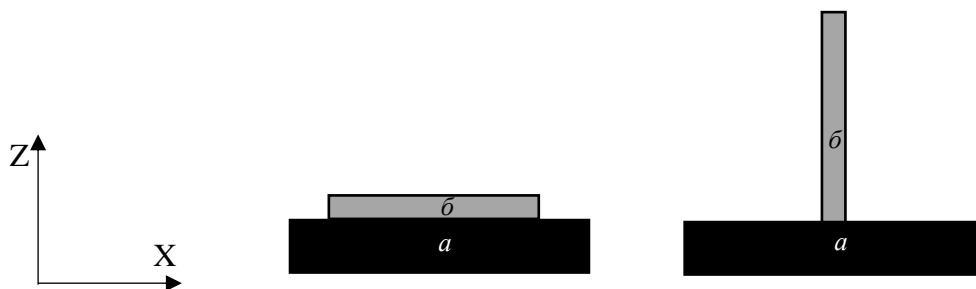


Рис. 4. Расположение аддитивных образцов в камере построения:
а – образец, б – платформа построения

Износостойкость образцов после испытаний оценивалась путем измерения объемного износа пятен изнашивания, который определялся с помощью конфокального интерференционного микроскопа Olympus LEXT OLS 5000.

МИКРОСТРУКТУРА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МАТЕРИАЛА

Микроструктура исследуемых аддитивных образцов из нержавеющей стали представляет собой типичную структуру синтезированного методом СЛС материала [0], а именно: в плоскости шлифов, изготовленных как в перпендикулярном направлении синтеза (XY) (рис. 5), так и параллельно направлению синтеза (XZ) (рис. 6) хорошо просматриваются следы трековой структуры, образовавшейся при последовательном линейном сплавлении отдельных участков материала лазером с наложением перекрестного направления предыдущего слоя (рис. 6 и 7).



Рис. 5. Продольное сечение, увеличение x500

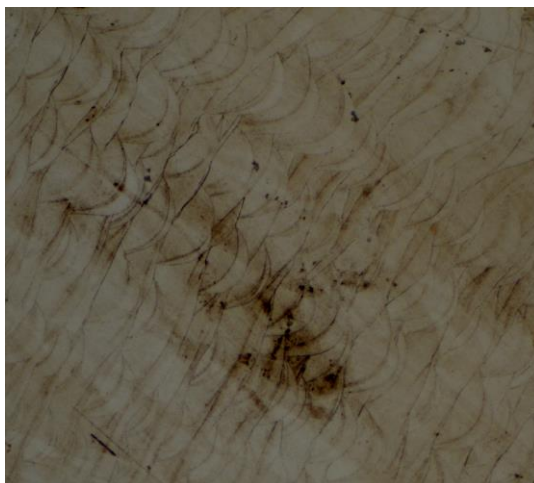


Рис. 6. Поперечное сечение без травления, увеличение x100



Рис. 7. Поперечное сечение после травления, увеличение x200

Микроструктура исследованных образцов представляет собой мелкоигольчатый мартенсит с остаточным аустенитом, что характерно для структуры после закалки для материалов, полученных традиционным способом изготовления [0] (рис. 8, 9).



Рис. 8. Микроструктура образца, увеличение x200

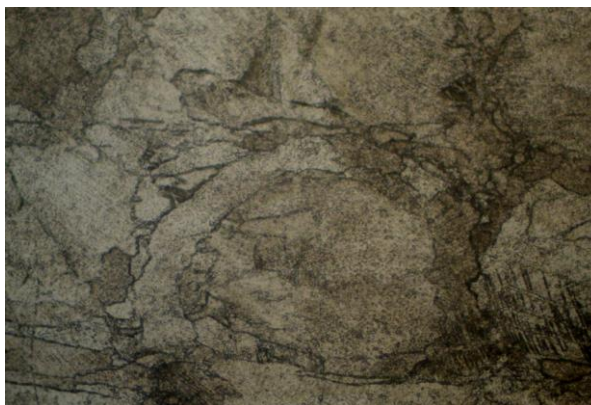


Рис. 9. Микроструктура образца, увеличение x500

В поверхностном слое исследуемых образцов наблюдаются участки измененного слоя, глубиной от 1,9 до 4,1 мкм (рис. 10, 11). Природу данных участков установить не представляется возможным в виду недостаточности увеличения микроскопа. Также от поверхности образцов идут трещины. Судя по их характеру, часть из них образовалась при охлаждении (наличие окалины внутри трещины), а другие могли образоваться после некоторого времени после изготовления образцов (нет изменений по краям трещины, а также внутри них). Последнее, возможно, связано с релаксацией термических напряжений, которые аккумулируются в следствие высокой скорости кристаллизации в процессе СЛС. Кроме того, в подповерхностном слое хорошо просматриваются поры разных размеров и формы.

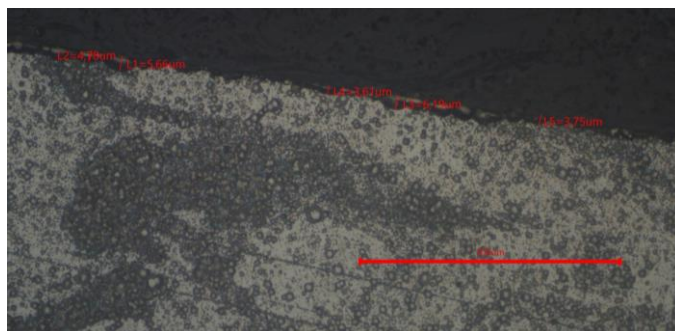


Рис. 10. Поверхностный слой образца, увеличение x500

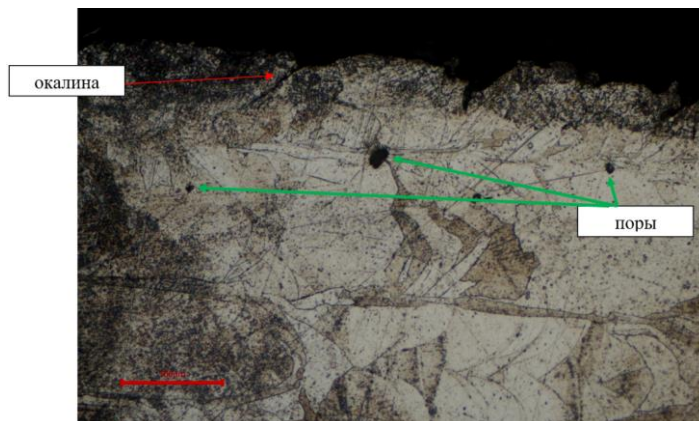


Рис. 11. Дефекты в поверхностном слое образца, увеличение x200

Проведенный качественный рентгеноспектральный микроанализ показал, что синтезированный в процессе СЛС материал соответствует исходному порошку, а также достаточно близок по составу к стали 316L (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение химического состава порошка для печати CL 20ES, полученных образцов и стали 316L

Материал	Элемент	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S
порошок CL 20ES, паспорт	Содержание, %	основа	16,5–18,5	10,0–13,0	2,0–2,5	0–2,0	0–1,0	0–0,045	0–0,030	0–0,030
аддитивные образцы		64,88	18,65	12,52	2,35	0,95	0,65	–	–	–
пруток 316L, паспорт		основа	16–18	13–15	2,5–3,1	1–2	до 0,4	–	до 0,03	–

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА

По результатам испытаний образцов было получено 12 снимков пятен износа, а также соответствующие им величины объемного износа. Пример получаемого отчета показан на рис. 12.

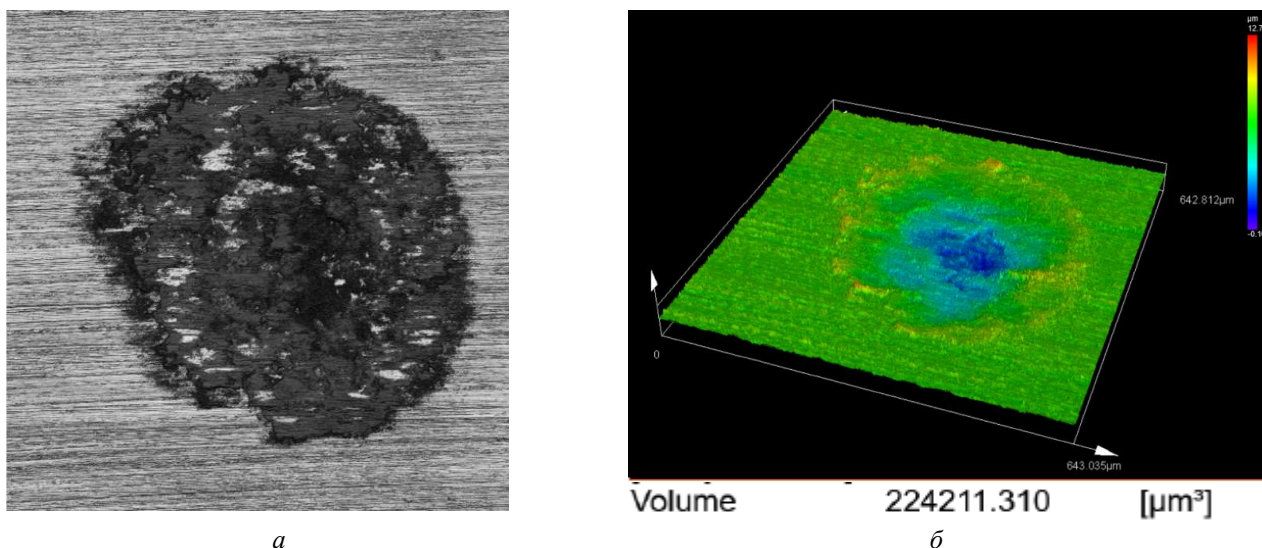


Рис. 12. Изображение пятна износа образца СЛС 0°:
а – поверхность образца, б – высотная диаграмма

Данные по измеренному объемному износу для всех образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Износ трением аддитивных и традиционных образцов

№ испытания	Образец	Режим трения (нагрузка (Н)/ перемещение (мкм))	Величина объемного износа, мкм ³
1	СЛС 0°	1/60	118718,287
2	СЛС 0°	1/60	187686,451
3	СЛС 0°	1/60	180093,169
4	СЛС 0°	4/5	27696,870
5	СЛС 0°	4/5	13938,083
6	СЛС 0°	4/5	13001,266
7	СЛС 90°	1/60	224211,310
8	СЛС 90°	1/60	148828,607
9	СЛС 90°	1/60	224634,702
10	СЛС 90°	4/5	32494,923
11	СЛС 90°	4/5	12142,710
12	СЛС 90°	4/5	17368,766
13	образец сравнения	1/60	154386,627
14	образец сравнения	1/60	177849,249
15	образец сравнения	1/60	219628,262
16	образец сравнения	4/5	27180,777
17	образец сравнения	4/5	17302,560
18	образец сравнения	4/5	22237,678

Для наглядности, ниже представлены данные в виде графиков.

Из графиков видно, что для второго режима трения объемный износ практически одинаковый для всех трех образцов, а среднее значение укладывается в доверительный интервал. На первом режиме образец СЛС 0 показывает меньший объемный износ, нижнее значение на 21 % отличается в меньшую сторону от аналогичных для других образцов, однако среднее значение для этого режима также укладывается в доверительный интервал. Тем не менее, для уточнения был проведен дополнительный эксперимент на режиме 1 для образца СЛС 0, в результате которого объемный износ составил 208415,460 мкм³.

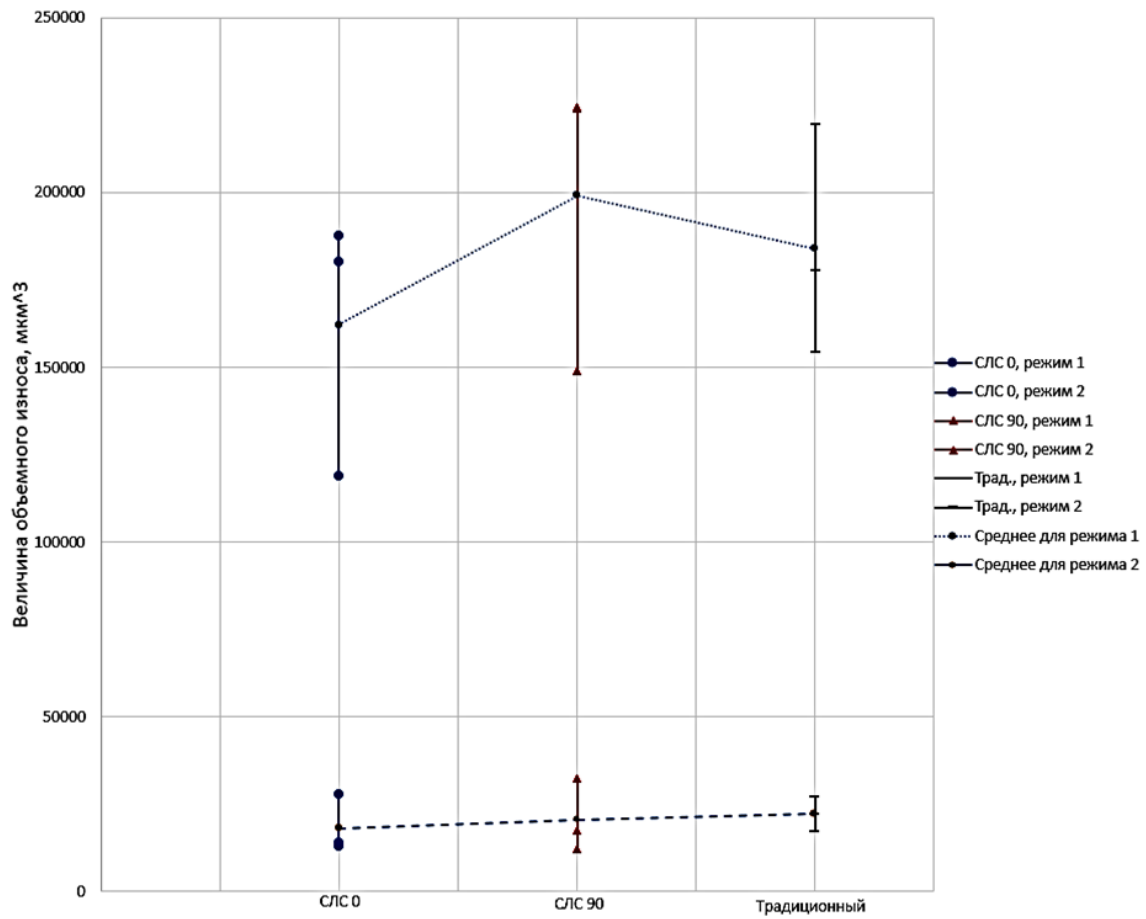


Рис. 13. Износ трением аддитивных и образцов сравнения

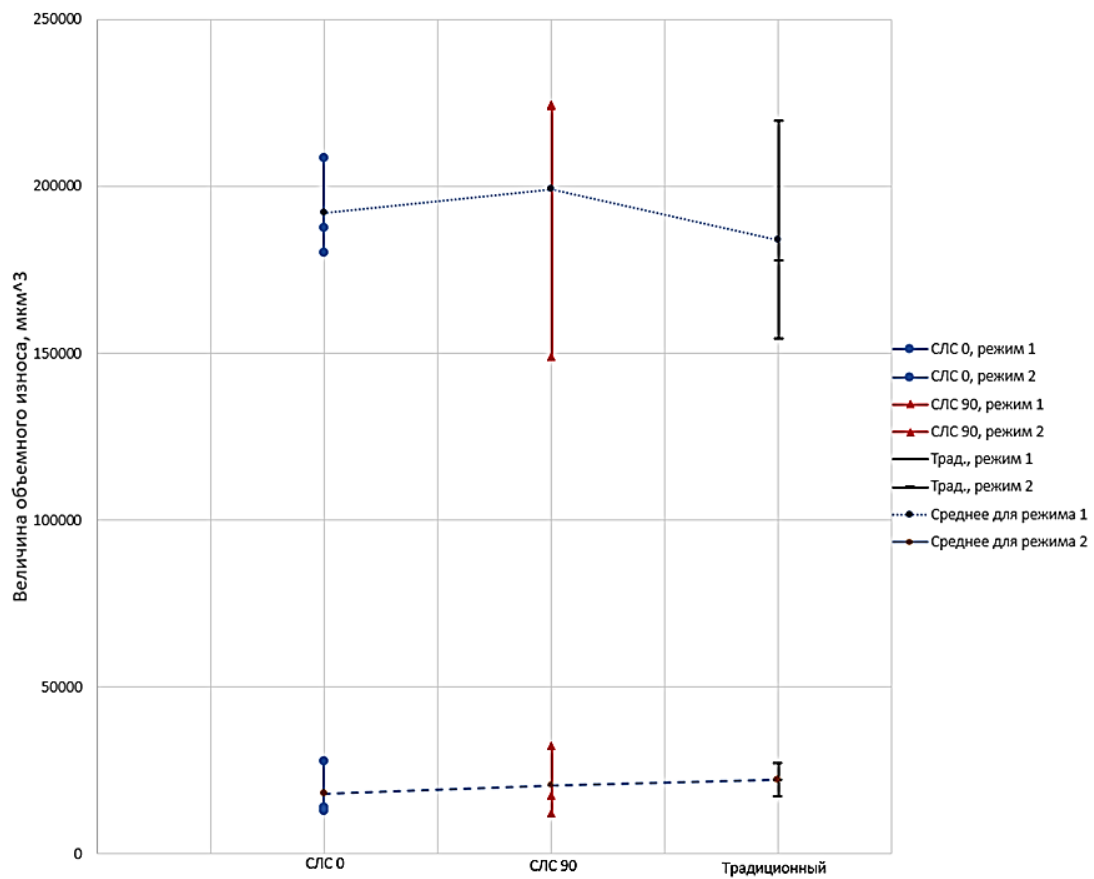


Рис. 14. Износ трением аддитивных и образцов сравнения с уточненными данными

ВЫВОДЫ

Из полученных данных справедливым будет сделать вывод о том, что трибологические свойства изделий, полученных методом СЛС, вне зависимости от угла печати в камере построения, отличаются от изделий, полученных по традиционной технологии в пределах 7 %, что можно приравнять к погрешности измерений. В целом угол печати детали в камере построения не будет влиять на будущий износ трением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Single Track Formation in Selective Laser Melting of Metal Powders** / I. Yadroitsev, et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210, Iss. 12. Pp. 1624-1631. [I. Yadroitsev, et al., "Single Track Formation in Selective Laser Melting of Metal Powders", in *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, Iss. 12, pp. 1624-1631, 2010.]
2. **Повышение фреттингостойкости интерметаллидного сплава Ti2AlNb** / Д. С. Горлов [и др.] // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-62-70. [D. S. Gorlov, et al., "Increasing the fretting resistance of an intermetallide alloy Ti2AlNb", (in Russian), in *Trudy VIAM*, no. 2 (96), 2021. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-62-70.]
3. **Лахтин Ю. М.** *Металловедение и термическая обработка металлов. Учебник для вузов. 3-е изд.* М.: *Металлургия*, 1983. 360 с. [Yu. M. Lahtin, *Metallogology and heat treatment of metals. Textbook for universities*, (in Russian). Moscow: Metallurgia, 1983.]
4. **Лесневский Л. Н., Ляховецкий М. А.** *Разработка и применение установки для определения фреттинг-износа образцов с твердыми покрытиями // Тезисы докладов XXII Международной Инновационно-ориентированной Конференции Молодых Ученых и Студентов «Актуальные проблемы машиноведения» МИКМУС-2012.* М.: ИМАШ РАН, 2012. С. 32. [L. N. Lesnevskiy, M. A. Lyahovetskiy, "Development and application of an installation for determining fretting wear of samples with hard coatings", (in Russian), in *Abstracts of the XXII International Innovation-oriented Conference of Young Scientists and Students "Actual problems of machine science"*, 32 p., 2012.]
5. **Петухов А. Н.** *Механизм фреттинга и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД.* М.: ЦИАМ, 2008. 204 с. [A. N. Petuhov, *The mechanism of fretting and fretting-fatigue of highly loaded sedentary gas turbine engine joints*, (in Russian). Moscow: CIAM, 2008.]
6. **Смыслов А. М., Селиванов К. С.** *Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг-стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов // Вестник УГАТУ.* 2007. Т. 9, № 1 (19). С. 77-83. [A. M. Smyslov, K. S. Selivanov, "Development and research of technological methods for increasing the fretting resistance of working blades made of titanium alloys", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 9, no. 1 (19), pp. 77-83, 2007.]

ОБ АВТОРАХ

СЕЛИВЕРСТОВ Сергей Дмитриевич, асп. каф. 205 МАИ. Дипл. инж.-констр. по авиац. двиг. (МАИ, 2017). Иссл. в обл. аддитивных технологий.

НИКОЛАЕВ Илья Алексеевич, асп. каф. 205 МАИ. Дипл. маг. по авиац. двиг. (МАИ, 2018). Иссл. в обл. фреттинг-износа.

БЫЦЕНКО Оксана Анатольевна, доц. каф. 701 МАИ. Дипл. инж.-техн. по авиац. двиг. (МАТИ, 1991). Иссл. в обл. материалов.

METADATA

Title: Tribological studies of aircraft engine parts obtained by selective laser melting.

Authors: S. D. Seliverstov¹, I. A. Nikolaev², O. A. Bytsenko³

Affiliation: Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia.

Email: ¹seliverstovsd@mai.ru, ²racer4500@mail.ru, ³oksiwear@yandex.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 3 (93), pp. 64-71, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper studies the fretting resistance of gas turbine engine parts obtained by selective laser melting. The microstructure of the resulting products from the CL 20ES alloy was studied. An experimental installation-a friction machine-is described, as well as a research method. Tests were carried out for additive samples made at angles of 0 and 90 degrees to the construction platform, as well as for samples made of a rod. The volume wear value is determined for two test modes.

Key words: selective laser melting; microstructure; fretting; blade; gas turbine engine.

About authors:

SELIVERSTOV, Sergey Dmitrievich, Postgraduate stud. Dept. 205 MAI. Dipl. engineer (MAI, 2017).

NIKOLAEV, Ilya Alekseevich, Postgraduate stud. Dept. 205 MAI. Accident (MAI, 2018).

BYTSENKO, Oksana Anatolyevna, Assoc. prof. Dept. 207 MAI. Dipl. engineer (MATI, 1991).