

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.9

DOI: 10.34759/vst-2022-2-189-196

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА РАСКРОЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ СПЛАВА Д16АТ НА УСЛОВНЫЙ ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ

Карина Федоровна Матвеева¹ ✉, Юрий Сергеевич Горшков²,
Валентин Фёдорович Павлов³

^{1,2,3}Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
(Самарский университет),

Самара, Россия

¹matveeva_kf@mail.ru ✉

²usgorshkov@yandex.ru

³pavlov.vf@ssau.ru

Аннотация. Представлены основные способы раскроя алюминиевых листовых заготовок. Выбраны типы образцов и режим испытаний на усталость. Определен условный предел выносливости для образцов, полученных методами фрезерования, лазерного раскроя и лазерного раскроя с последующим травлением. Установлено, что после лазерного раскроя условный предел выносливости снижается почти в два раза. Удаление дефектного слоя металла травлением частично восстанавливает значение условного предела выносливости.

Ключевые слова: листовая заготовка из сплава Д16АТ, лазерный раскрой, условный предел выносливости, пережог материала, удаление дефектного слоя

Для цитирования: Матвеева К.Ф., Горшков Ю.С., Павлов В.Ф. Влияние способа раскроя листовой заготовки из сплава Д16АТ на условный предел выносливости // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 189-196. DOI: 10.34759/vst-2022-2-189-196

MACHINE-BUILDING ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

THE DT16AT SHEET BILLET CUTTING METHOD EFFECT ON THE CONDITIONAL ENDURANCE LIMIT

Karina F. Matveeva¹ ✉, Yurii S. Gorshkov², Valentin F. Pavlov³

^{1,2,3}Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University),
Samara, Russia

¹matveeva_kf@mail.ru ✉

²usgorshkov@yandex.ru

³pavlov.vf@ssau.ru

© Матвеева К.Ф., Горшков Ю.С., Павлов В.Ф., 2022

Abstract

Machining by milling and laser cutting are widely applied in blanking-and-stamping production. However, despite the availability and simplicity of the milling method, laser cutting is being increasingly employed in production.

The laser cutting method ensures high productivity of the process in combination with high precision and quality of cut surfaces, as well as a small cutting width. However, one of the significant disadvantages of laser cutting consists in the presence of a temperature-affected zone in the area of laser beam impact, which leads to a change in the material properties at the edge of the billet and, as a result, to a decrease in the fatigue resistance of parts.

Fatigue test samples were cut from a 2.5 mm thick cold-rolled sheet of the D16AT alloy across the rolling direction. One part of the samples was fabricated by milling, while the other part was produced by laser cutting. The samples were tested for high-cycle fatigue in bending at a symmetrical cycle, and the test base was of three million loading cycles. The loading threshold of the three samples without their destruction was being estimated. Besides, after laser cutting the samples, were subjected to etching in Keller's reagent to eliminate the defective layer formed as the result of laser processing.

The result of the samples fatigue testing revealed that the conditional endurance limit of the samples obtained by the laser cutting method was 55 MPa which was 60% lower than the one for the samples manufactured by milling, which was equal to 90 MPa.

The metallographic results allowed revealing that the end-butts of the samples manufactured by the laser cutting method contained the defective layer associated with the metal overburning, which was the cause of the conditional endurance limit reduction. To remove the metal layer with overburning etching was employed, which allowed partial restoring of the conditional endurance limit of the material equal to 80 MPa. In this case, the conditional endurance limit is 18% less than that for the milled samples.

Thus, the conducted study reveals that during the products operation obtained by laser cutting, premature fatigue failure may occur under cyclic loading conditions. To eliminate this possible defect, formed as the result of manufacturing by the laser method, the defective metal layer with overburning should be removed. The defective layer removal will lead to the increase fatigue resistance of the products.

Keywords: sheet billet from alloy D16AT, laser cutting, material overburning, defective layer removal

For citation: Matveeva K.F., Gorshkov Yu.S., Pavlov V.F. The D16AT Sheet Billet Cutting Method Effect on the Conditional Endurance Limit. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 189-196. DOI: 10.34759/vst-2022-2-189-196

Введение

Развитие лазерной технологии является одним из наиболее приоритетных направлений, но, наряду с изучением отдельных вопросов, необходимы анализ и общее решение инженерных проблем, возникающих при освоении и внедрении в производство методов лазерной обработки.

Листы из сплава дюралюминия — один из основных материалов, который используется для изготовления обшивок фюзеляжа, обтекателей и других деталей.

В заготовительно-штамповочном производстве для получения алюминиевых заготовок из листа широко применяются следующие способы: фрезерование, лазерный раскрой, резка сдвигом, гидроабразивная резка [1]. Наиболее широкое распространение получили механическая обра-

ботка методом фрезерования и в последнее время — лазерный раскрой [2].

Фрезерованные заготовки, благодаря точности базирования в приспособлениях, обладают точными геометрическими формами. Тепловыделение при фрезеровании незначительно и не вызывает изменения свойств на кромке заготовки. Процесс может быть реализован на универсальных недорогих станках. В то же время фрезерование имеет ряд недостатков: производительность процесса невысока, существуют трудности при закреплении крупногабаритных листов на станке, минимальный радиус обработки ограничивается размером инструмента, при фрезеровании получают отходы в виде стружки, а на заготовке образуются заусенцы [3–5].

Поэтому, несмотря на доступность и простоту реализации фрезерования, на производстве в качестве заготовительно-разделительной операции всё шире применяется лазерный раскрой. Резка лазером чаще всего реализуется на твёрдотельных лазерах (ND: YAG) с кристаллом легированного неодимом (ND) алюмоиттриевого граната (YAG) [6]. При этом обеспечиваются высокая производительность процесса в сочетании с высокой точностью и качеством поверхностей реза, малая ширина реза [7, 8]. Имеется возможность осуществлять лазерный раскрой плоских заготовок по сложному контуру с высокой степенью автоматизации процесса. В то же время на заготовках, так же как и при фрезеровании, образуются заусенцы, которые необходимо удалять, а максимально возможная толщина реза зависит от мощности установки. Одним из существенных недостатков лазерного раскроя является наличие зоны температурного влияния в зоне воздействия лазерного пучка, что приводит к изменению свойств материала на кромке заготовки. Листовая заготовка в большинстве случаев подвергается пластическому формоизменению. При этом в некоторых случаях в зоне действия растягива-

ющих напряжений на кромках заготовок наблюдается образование трещин [9], что недопустимо при их дальнейшем использовании в изделиях ответственного назначения.

Методика исследований

Образцы для испытаний на усталость нарезались из холоднокатаного листа толщиной 2,5 мм из сплава Д16АТ поперёк направления прокатки. Часть образцов по ГОСТ 25502-79, тип III, изготавливалась фрезерованием на раскройном станке марки РФП-6. Другую часть образцов получали лазерным раскроем на установке BYSTRONIC модели BYSTAR 3015 на режиме: мощность 2500 Вт, среда аргон, давление газа 10 бар, фокус 1,4 мм.

Испытания образцов на изгиб при симметричном цикле нагружения проводились на испытательной машине малой мощности УММ-01 [10] производства института механики Национальной академии наук Украины (рис. 1). При испытаниях на усталость определялся условный предел выносливости σ_{-1y} . Настройка испытательной машины проводилась на трёх образцах, полученных



Рис. 1. Универсальная испытательная машина УММ-01

фрезерованием. В результате оценивался порог нагружения образца без его разрушения при трёх миллионах циклов, который составил 90 МПа. При определении экспериментального значения σ_{-1y} на каждом этапе нагружения испытанию подвергались три образца. Металлографические исследования [11] проводились на оптическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-32 производства ЛОМО при двухсоткратном увеличении. Образцы подвергались травлению в реактиве Келлера: HNO_3 – 2,5 см³; HCl – 1,5 см³; HF – 1,0 см³; H_2O – 95 см³ – в течение 20–40 с. Структура материала определялась в середине и на краю торца образца.

Результаты и обсуждение

Вначале определялся условный предел выносливости на образцах, изготовленных фрезерованием. Для этого поэтапно увеличивалась нагрузка

до значения, при котором образец разрушался до 3 миллионов циклов. Результаты испытаний на усталость образцов, изготовленных фрезерованием, представлены на рис. 2.

Из приведённых на рис. 2 данных видно, что после превышения напряжения в 90 МПа образец разрушается, не выстояв 3 млн циклов. Следовательно, значение условного предела выносливости в данном случае составляет 90 МПа. На рис. 3 приведены фотографии образцов, изготовленных фрезерованием, после испытаний на усталость.

Далее испытаниям на усталость подвергались образцы, полученные методом лазерного раскроя по аналогичной схеме нагружения. Результаты испытаний на усталость образцов, изготовленных методом лазерного раскроя [12, 13], представлены на рис. 4.

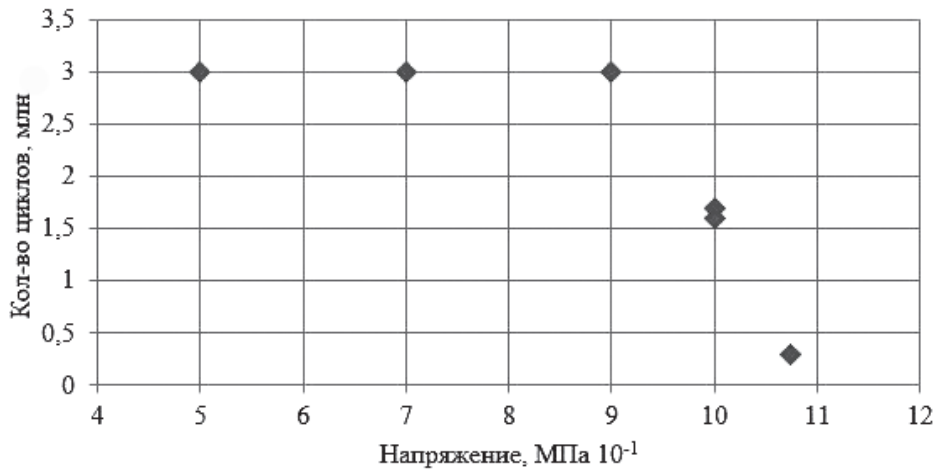


Рис. 2. Результаты испытаний образцов, изготовленных фрезерованием

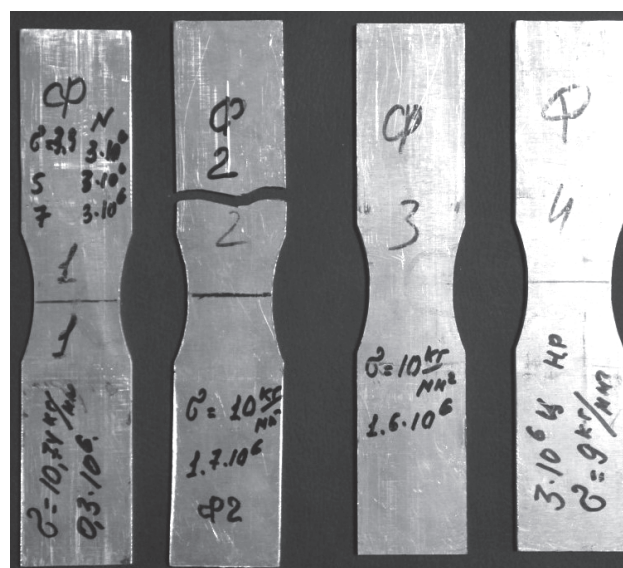


Рис. 3. Фрезерованные образцы после испытаний на усталость

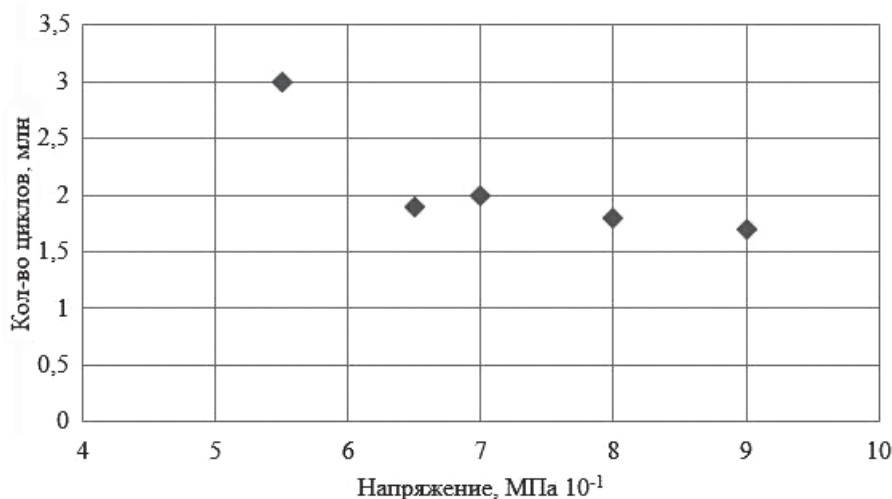


Рис. 4. Результаты испытаний на усталость образцов, изготовленных методом лазерного раскроя

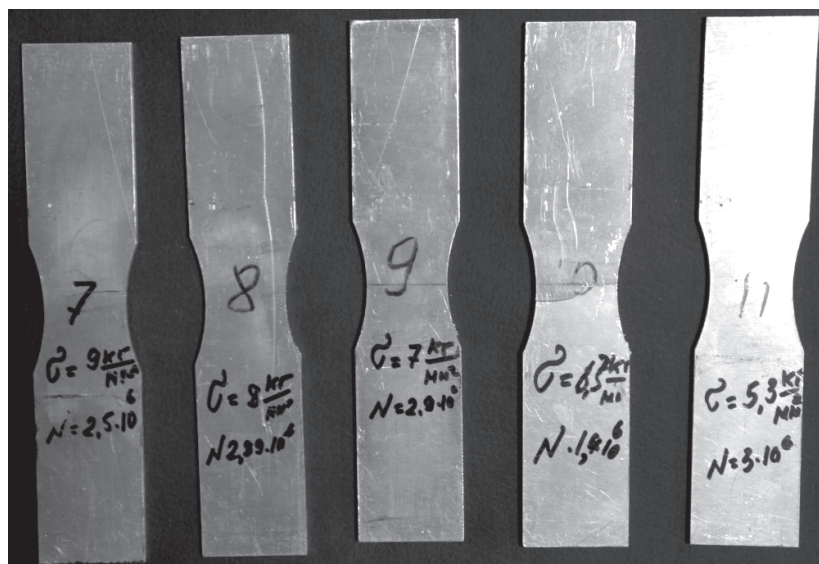


Рис. 5. Образцы, изготовленные лазерным раскроем, после испытаний на усталость

Из приведённых на рис. 4 данных следует, что после превышения напряжения в 55 МПа образец разрушается, не выстояв 3 миллионов циклов. Таким образом, значение условного предела выносливости в данном случае составляет 55 МПа.

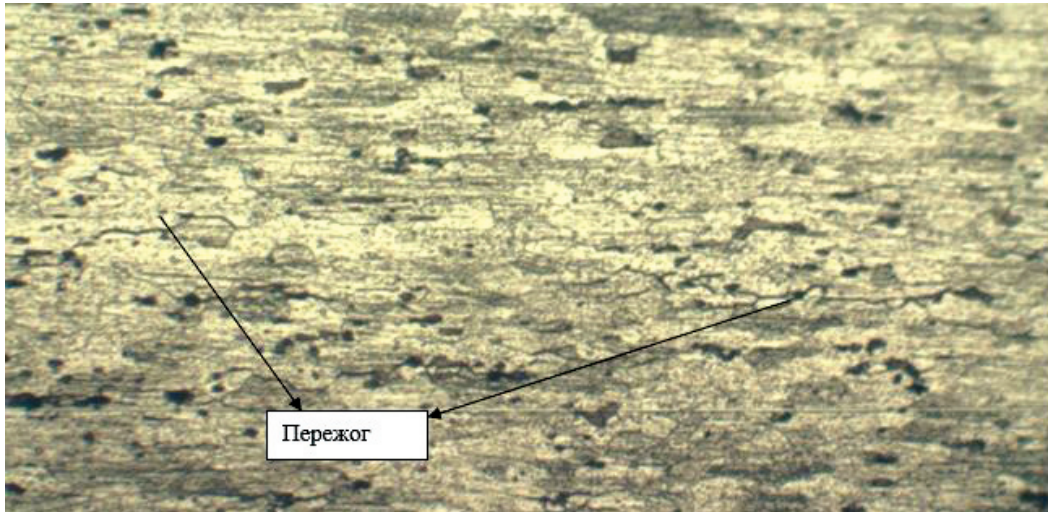
На рис. 5 приведены фотографии образцов, изготовленных лазерным раскроем, после испытаний на усталость.

Таким образом, в результате испытаний на усталость установлено, что условный предел выносливости образцов, полученных методом лазерного раскроя, примерно на 60 % ниже, чем у образцов, полученных методом фрезерования.

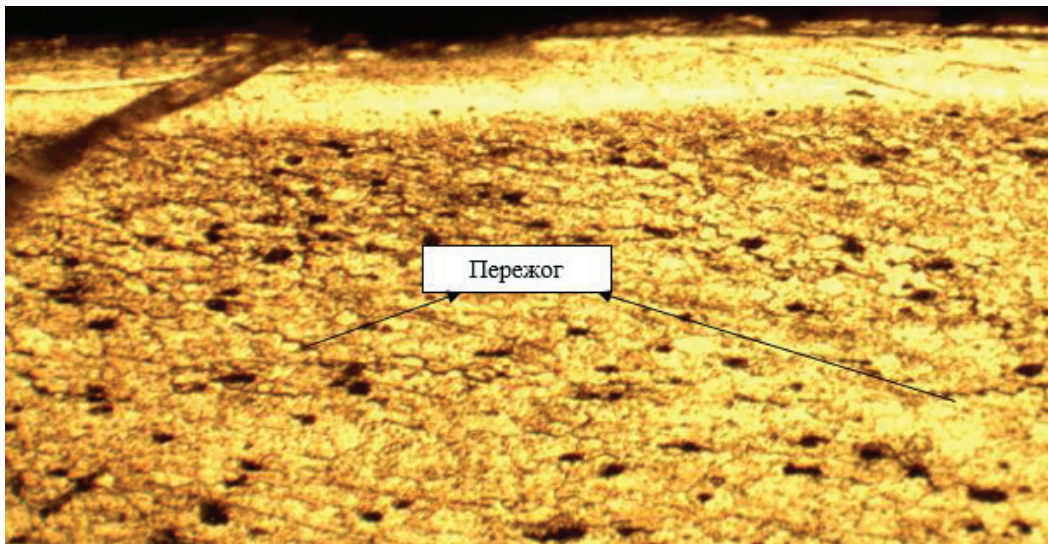
Далее были проведены металлографические исследования, которые показали, что на торце образцов, полученных методом лазерного рас-

кроя [13, 14], имеется пережог металла (рис. 6). По всей видимости, именно этот дефектный слой и является причиной снижения предела выносливости [15]. Для подтверждения этого предположения были проведены испытания образцов, изготовленных лазерным раскроем [16], с удалённым дефектным слоем [17–19].

В качестве эксперимента для удаления дефектного слоя металла с пережогом применялось травление. Образцы, полученные методом лазерного раскроя, подвергали травлению в 10%-ном растворе едкого натрия в течение пяти минут, после чего образцы также подвергались испытаниям на усталость. Результаты испытаний на усталость образцов, изготовленных методом лазерного раскроя с последующим травлением, представлены на рис. 7.



а)



б)

Рис. 6. Пережог металла в зоне термического влияния (x100): а — вблизи торца; б — вблизи торца образца с плакирующим слоем

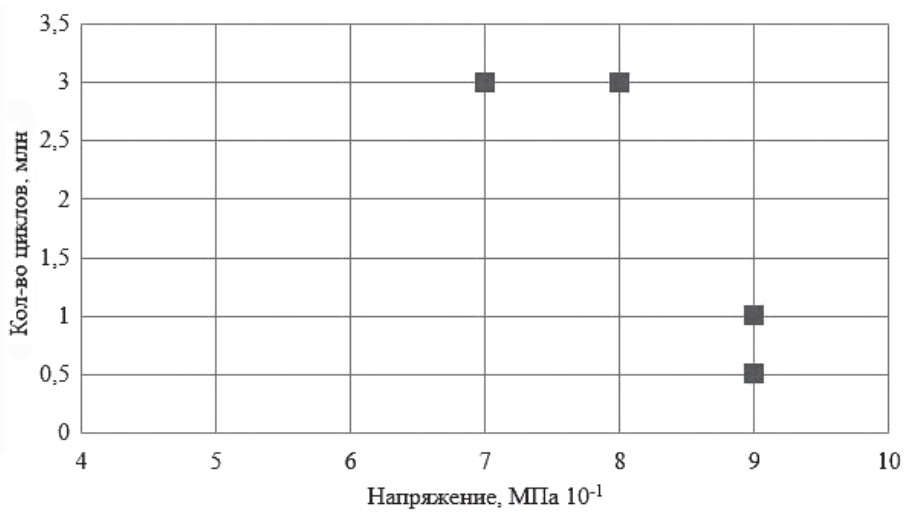


Рис. 7. Результаты испытаний на усталость образцов, изготовленных методом лазерного раскроя с последующим травлением

Из приведённых на рис. 7 данных следует, что после превышения напряжения в 80 МПа образец разрушается, не выстояв 3 млн циклов. Расчётное значение условного предела выносливости образцов в данном случае составляет 80 МПа, что только на 18% меньше, чем у фрезерованных образцов. Таким образом, удаление дефектного слоя металла с пережогом методом травления позволяет частично восстановить значение условного предела выносливости материала [20].

Выводы

1. Способ раскроя оказывает существенное влияние на условный предел выносливости алюминиевой заготовки. Так, условный предел выносливости образцов, вырезанных методом лазерного раскроя, примерно на 60% ниже, чем у образцов, изготовленных фрезерованием.

2. На торце заготовок, изготовленных методом лазерного раскроя, возникает дефектный слой, связанный с пережогом металла. По всей видимости, этот слой и является причиной снижения условного предела выносливости.

3. Удаление дефектного слоя металла путём травления частично восстанавливает значение условного предела выносливости.

4. Использование изделий (например, обшивки крыла самолёта), полученных методом лазерного раскроя, в условиях циклического нагружения может привести к их усталостному разрушению.

Список источников

1. Братухин А.Г., Абрамов Б.М., Арутюнов С.Г. и др. *Авиастроение: Летательные аппараты, двигатели, системы, технологии*. — М.: Машиностроение, 2000. — 536 с.
2. Wetzig A., Herwig P., Hauptmann J. et al. Fast Laser Cutting of Thin Metal // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 29, pp. 369-374. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.150
3. Джесси Рассел. *Гидроабразивная резка*. — М.: VSD, 2013. — 240 с.
4. Скуратов Д.Л., Швецов А.Н. *Определение рациональных условий формообразования и упрочнения поверхностей деталей на операциях механической обработки: Учебное пособие*. — Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2018. — 112 с.
5. Монахов Г.А., Жданович В.Ф., Радинский Э.М. и др. *Обработка металлов резанием: Справочник технолога*. — М.: Машиностроение, 1974. — 598 с.
6. Григорьянц А.Г. *Основы лазерной обработки материалов*. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
7. Debay A.K., Vadava V. Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 204. No. 1-3, pp. 412-418. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.048
8. Zeuner A.T., Kühne R., Standke C. et al. Fatigue Behavior of Laser-Cut Sheet Metal Parts with Brazed-On Elements // *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 12. DOI: 10.3390/met11122063
9. Гречников Ф.В., Горшков Ю.С., Мишин А.М. Исследование влияния способа раскроя листовой алюминиевой заготовки на трещинообразование при холодной листовой штамповке // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2015. Т. 17. № 6-3. С. 632-635.
10. Филатов Э.Я., Павловский В.Э. *Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость*. — Киев: Наукова думка, 1985. — 92 с.
11. Киселев Ф.Д. Диагностика разрушений и оценка эксплуатационной работоспособности рабочих турбинных лопаток авиационных двигателей // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 4. С. 108-122. DOI: 10.34759/vst-2019-4-108-122
12. Orishich A., Shulyatyev V., Golyshev A., Malikov A. Thermophysical problems of laser cutting of metals // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 115. DOI: 10.1051/mateconf/201711508004
13. Šýkorová L., Šuba O., Pata V., Kubišová M. Structural Changes in Metals during Laser Cutting // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 919, pp. 25-33. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.25
14. Rodrigues G.C., Vorkov V., Duflou J.R. Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 74, pp. 714-718. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.026
15. Laakso P. Laser cutting // *Ruiskuvalupäivät (15-16.11.2007; Tuusula)*.
16. Wetzig A., Herwig P., Hauptmann J. et al. Latest developments of laser cutting // *Journal of Laser Applications*. 2016. Vol. 103. DOI: 10.2351/1.5119063
17. Courtier A.F., McDonnell M., Praeger M. et al. Modelling of fibre laser cutting via deep learning // *Optics Express*. 2021. Vol. 29. No. 22, pp. 36487-36502. DOI: 10.1364/OE.432741
18. Belforte D.A., Jafferson J.M. Laser Cutting // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.01853-1
19. Naresh, Khatak P. Laser cutting technique: A literature review // *Materials Today: Proceedings*. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.250
20. Amara E.H., Kheloufi K., Tamsaout T., Aggoune S. Modelling of laser beam distribution effects for metal laser cutting // *Lasers in Engineering*. 2016. Vol. 35, pp. 187-196.

References

1. Bratukhin A.G., Abramov B.M., Arutyunov S.G. et al. *Aviastroeniye: Letatel'nye apparaty, dvigateli, sistemy, tekhnologii* (Aircraft industry. Aircraft, engines, systems, technologies), Moscow, Mashinostroeniye, 2000, 536 p.
2. Wetzig A., Herwig P., Hauptmann J. et al. Fast Laser Cutting of Thin Metal. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 29, pp. 369-374. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.150
3. Russell J. *Gidroabrazivnaya rezka* (Water Jet Cutter), Moscow, VSD, 2013, 240 p.
4. Skuratov D.L., Shvetsov A.N. *Opreделение ratsional'nykh uslovii formoobrazovaniya i uprochneniya poverkhnostei detalei na operatsiyakh mekhanicheskoi obrabotki* (Determining rational conditions for parts surface shaping and hardening during machining operations), Samara, Samarskii universitet, 2018, 112 p.
5. Monakhov G.A., Zhdanovich V.F., Radinskii E.M. et al. *Obrabotka metallov rezaniem. Spravochnik tekhnologa* (Metal cutting. Technologist's guide), Moscow, Mashinostroeniye, 1974, 598 p.
6. Grigor'yants A.G. *Osnovy lazernoi obrabotki materialov* (Fundamentals of materials laser processing), Moscow, Mashinostroeniye, 1989, 304 p.
7. Debay A.K., Vadava V. Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 204, no. 1-3, pp. 412-418. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.048
8. Zeuner A.T., Kühne R., Standke C. et al. Fatigue Behavior of Laser-Cut Sheet Metal Parts with Brazed-On Elements. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 12. DOI: 10.3390/met11122063
9. Grechnikov F.V., Gorshkov Yu.S., Mishin A.M. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, vol. 17, no. 6-3, pp. 632-635.
10. Filatov E.Ya., Pavlovskii V.E. *Universal'nyi kompleks mashin dlya ispytaniya materialov i konstrukttsii na ustalost'* (Universal complex of machines for materials and structures fatigue testing), Kiev, Naukova Dumka, 1985, 92 p.
11. Kiselev F.D. Fracture diagnostics and operational workability evaluation of working turbine blades of aircraft engine. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 108-122. DOI: 10.34759/vst-2019-4-108-122
12. Orishich A., Shulyatyev V., Golyshev A., Malikov A. Thermophysical problems of laser cutting of metals. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 115. DOI: 10.1051/mateconf/201711508004
13. Sykorova L., Šuba O., Pata V., Kubišová M. Structural Changes in Metals during Laser Cutting. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 919, pp. 25-33. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.25
14. Rodrigues G.C., Vorkov V., Duflou J.R. Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 714-718. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.026
15. Laakso P. Laser cutting. *Ruiskuvalupäivät (15–16.11.2007; Tuusula)*.
16. Wetzig A., Herwig P., Hauptmann J. et al. Latest developments of laser cutting. *Journal of Laser Applications*, 2016, vol. 103. DOI: 10.2351/1.5119063
17. Courtier A.F., McDonnell M., Praeger M. et al. Modelling of fibre laser cutting via deep learning. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 22, pp. 36487-36502. DOI: 10.1364/OE.432741
18. Belforte D.A., Jafferson J.M. Laser Cutting. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.01853-1
19. Naresh, Khatak P. Laser cutting technique: A literature review. *Materials Today: Proceedings*, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.250
20. Amara E.H., Kheloufi K., Tamsaout T., Aggoune S. Modelling of laser beam distribution effects for metal laser cutting. *Lasers in Engineering*, 2016, vol. 35, pp. 187-196.

Статья поступила в редакцию 07.12.2021; одобрена после рецензирования 21.12.2021; принята к публикации 19.03.2022.

The article was submitted on 07.12.2021; approved after reviewing on 21.12.2021; accepted for publication on 19.03.2022.