

УДК 621.791.051

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ ЛОПАТКА-ДИСК, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

С. А. ТОКАРЕНКО¹, С. Р. ШЕХТМАН², И. В. КАНДАРОВ³

¹ogmet@umpo.ru, ²shex@inbox.ru, ³kandarov@mail.ru

¹ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (УМПО)

²ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

³НПА «Технопарк авиационных технологий»

Поступила в редакцию 21.07.2018

Аннотация. Все большее развитие получают монолитные конструкции соединения лопатка-диск, благодаря чему возрастает интерес к процессу линейной сварки трением, позволяющему решить проблему ремонта моноколеса. В работе в рамках освоения технологий высокоточного формообразования и поверхностного упрочнения ответственных деталей из алюминиевых сплавов были изготовлены алюминиевые моноколеса (блиска) методом линейной сварки трением. Исследуется соединение лопатка-диск из сплава Д16. Приведены результаты исследований микротвердости, микроструктуры сплава и химического состава зоны сварного шва. Показаны отличия в механических свойствах сплава при различных режимах термообработки.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели; моноколесо; лопатка; линейная сварка трением; алюминиевый сплав Д16; зона термомеханического влияния; интерметаллиды; микротвердость; микроструктура; химический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Современные авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются не только в авиастроении, но и в наземных установках (теплоэлектростанциях, силовых установках газоперекачивающих станций и др.). Повышение ресурса и надежности конструкций ГТД является важной проблемой авиадвигателестроения и сказывается на безопасности полетов. Ресурс ГТД во многом определяется ресурсом лопаток компрессора.

Традиционно для изготовления лопаток применяют жаропрочные сплавы на титановой, железной, кобальтовой и никелевой основах. Наиболее широкое применение получили лопатки из титановых и никелевых жаропрочных сплавов. В настоящее время возрастает интерес к снижению массы авиа-

ционного двигателя, что позволит повысить его показатели. Тем самым встает вопрос о применении новых материалов, позволяющих выдерживать высокие температуры, обладающих хорошими показателями усталостной прочности, износостойкости, коррозионно- и эрозийностойкости и малой плотностью. Приоритетным направлением в авиастроении было и остается применение алюминиевых сплавов. Однако перспектива их применения в двигателестроении требует создания технологий, которые могли бы повысить такие характеристики, как коррозионная и эрозийная стойкость, способность сопротивляться воздействию высоких (до 200°С) температур. Решить эту проблему можно путем использования наноструктурных покрытий и модифицирования алюминиевых сплавов.

К преимуществам алюминиевых сплавов относятся высокая удельная прочность и способность сопротивляться инерционным и динамическим нагрузкам. Большинство легирующих элементов образуют с алюминием твердые растворы ограниченной растворимости и промежуточные фазы с алюминием и между собой (CuAl_2 , Mg_2Si и др.) [2, 4–8].

Сплавы системы Al-Cu-Mg – дуралюмины – представляют собой наиболее известную и наиболее важную по своему значению группу сплавов, нашедших широкое применение в различных отраслях машиностроения и особенно в авиации. Сплавы Д16 (промышленные, упрочняемые термообработкой) обладают хорошим сочетанием характеристик вязкости разрушения, выносливости, скорости роста усталостной трещины, применяются для деталей, от которых требуется повышенная выносливость в условиях знакопеременных напряжений [1, 8–11, 14].

Преимущество сплавов данной системы перед высокопрочными алюминиевыми сплавами проявляется при температурах выше $100\text{ }^\circ\text{C}$ и особенно при длительных выдержках. Для использования сплава при $120\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$ изделия из него подвергают искусственному старению. Оно обеспечивает лучшую коррозионную стойкость и больший предел текучести по сравнению с естественно состаренным состоянием, хотя ему соответствует меньшая прочность и пластичность [3, 5–9, 11].

Тем самым основные работы, проводящиеся в отношении алюминиевого сплава Д16, направлены на повышение жаропрочности материала для увеличения температуры эксплуатации изделий. Полученные отработанные режимы могут быть использованы для техпроцесса обработки жаропрочных сплавов.

В рамках освоения технологий высокоточного формообразования и поверхностного упрочнения ответственных деталей из алюминиевых сплавов с повышенной конструкционной энергоэффективностью были проведены работы по изготовлению алюминиевого моноколеса (блиска) методом линейной сварки трением. Впервые в стране

получено соединение диск-лопатка методом линейной сварки трением для деталей из алюминиевого сплава. Линейная сварка трением заключается в том, что в процессе возвратно-поступательного движения с определенной частотой и амплитудой части, подлежащие свариванию, сжимаются для образования плотного контакта. Генерируемая в плотности сварки теплота способствует пластической деформации приповерхностных объемов свариваемых материалов. В процессе сварки вязко-пластичные слои металла перемещаются к границам свариваемой поверхности. При этом происходит удаление окислов и загрязнений, которые могут присутствовать в зоне сварки [13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Внешний вид разрезанной лопатки, полученной методом линейной сварки трением, показан на рис. 1, 2.

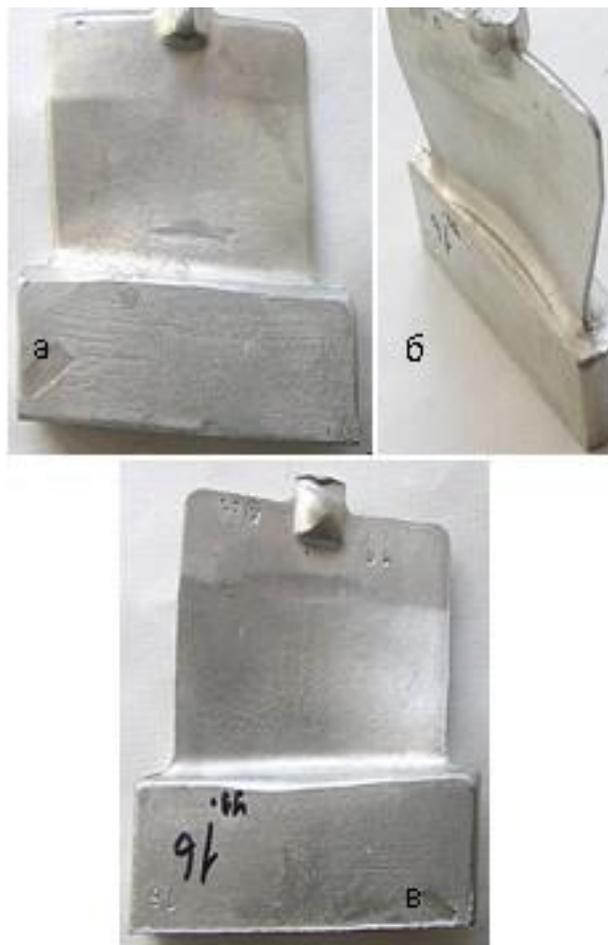


Рис. 1. Внешний вид лопатки из сплава Д16: а – со стороны спинки; б – аксонометрия; в – со стороны корыта



Рис. 2. Внешний вид образца после ЛСТ

Высота сваренного образца составила 85,1 мм. Образовался грат, характерный для соединений, полученных методом линейной сварки трением (ЛСТ). Толщина грата составила 2 мм.

Для дальнейшего анализа макро- и микроструктуры вырезались три образца шириной 2–3 мм по схеме (рис. 2).

На рис. 3 представлена макроструктура образца.

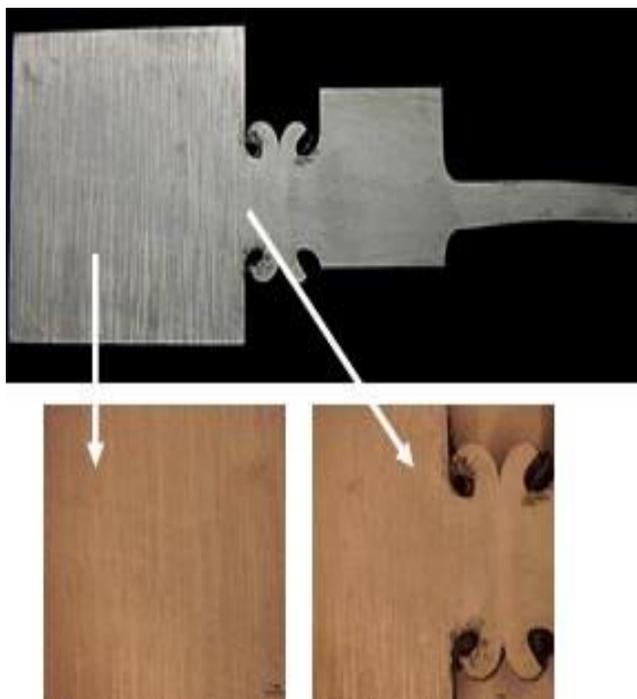


Рис. 3. Макроструктура образца, полученного методом линейной сварки трением (после травления)

При анализе макроструктуры установлено: общий фон макроструктуры однородный матовый, дефектов металлургического характера не выявлено.

После травления в зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) выявляются линии интерметаллидных выделений, располагающиеся по форме грата. После травления 10%-й плавиковой кислотой и осветления азотной кислотой [4, 12] на имитаторе диска выявляются линии интенсивного течения металла, что свидетельствует о деформации.



Рис. 4. Макроструктура образца лопатки со стороны грата:

а – выход со сварного шва на поверхность;
б – зона сварного шва

Сварной шов можно наблюдать на рис. 4, б.

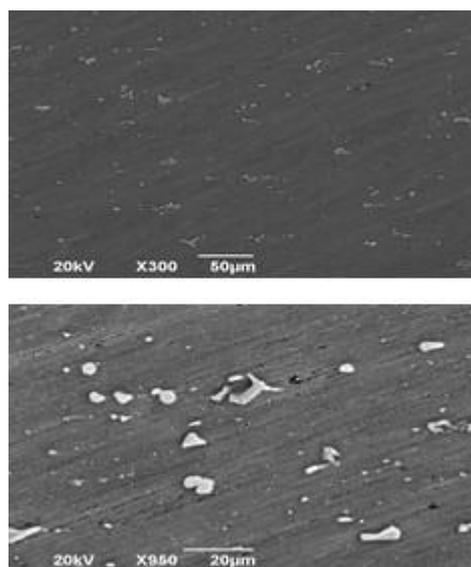


Рис. 5. Микроструктура сплава Д16 после конечной термообработки, снимки с растрового электронного микроскопа

В структуре имитатора диска более отчетливо просматриваются интерметаллидные выделения.

Микроструктура сплава Д16 после конечной термообработки (рис. 5) представляет собой типичную деформированную структуру, состоящую из пересыщенного α -твердого раствора и нерастворимых фаз [2]. В результате нагрева происходит переход от зонного (естественного) к фазовому старению. Распад твердого раствора в таком случае идет по границам зерен с образованием метастабильных фаз с увеличением содержания Си.

Данная фаза является основным упрочнителем, образующимся при старении сплава Д16. Увеличение содержания в сплаве таких элементов, как Fe, Si, приводит к росту количества нерастворенных избыточных фаз, сохраняющихся на всех стадиях изготовления полуфабрикатов [5].

На рис. 6 представлена микроструктура различных областей лопатки. По мере удаления от сварного шва происходит уменьшение объемной доли и интенсивности выделений интерметаллидных соединений. Следов пережога в структуре не наблюдается.

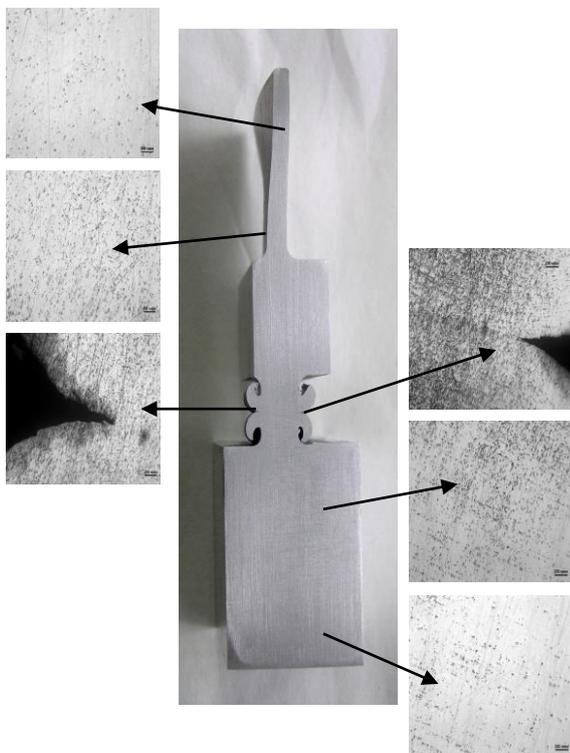


Рис. 6. Микроструктура лопатки

После вылеживания образца (процесс выдержки образца при комнатной температуре не менее суток, при котором происходит окисление наиболее крупных интерметаллидных выделений, что облегчает их распознавание с помощью оптической микроскопии) окисляются интерметаллидные частицы элементов Fe, Si и др. (рис. 7).

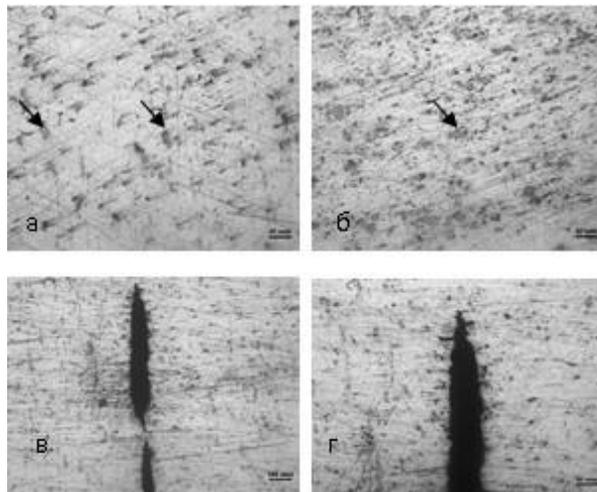


Рис. 7. Микроструктура образца после вылеживания (без травления):

*а – имитатор диска; б – лопатка;
в, г – микроструктура со стороны графа*

Механические свойства испытывались на образцах, вырезанных из лопатки. Результаты испытаний механических свойств приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства лопатки из сплава Д16

	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	HV
Отжиг [2]	220	110	18	50
Закалка + естественное старение [2]	470	320	17	105
Образцы, вырезанные из лопатки, после штамповки и термообработки	469	372	11,2	115
Данные ОСТ 1.901-74	≥ 460	≥ 320	≥ 10	≥ 110

Микротвердость зоны сварного шва составила 143,26–145,7 кгс/мм² (рис. 8).

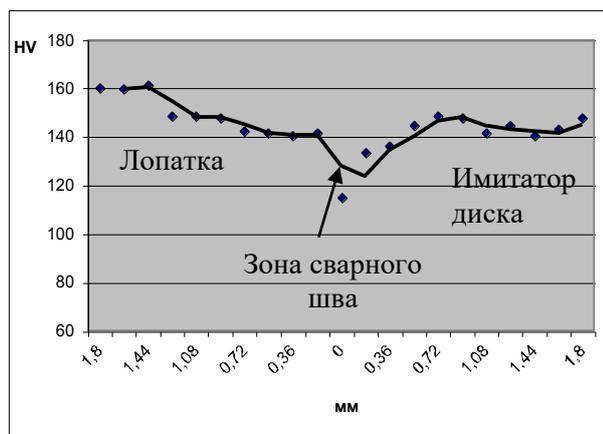


Рис. 8. Микротвердость зоны сварного шва соединения лопатка-диск

Анализируя значения микротвердости, можно отметить, что микротвердость повышается при продвижении от сварного шва в глубь материала. Среднее значение микротвердости материала лопатки составило 149,15 кгс/мм², имитатора диска – 142,79 кгс/мм² (рис. 9).

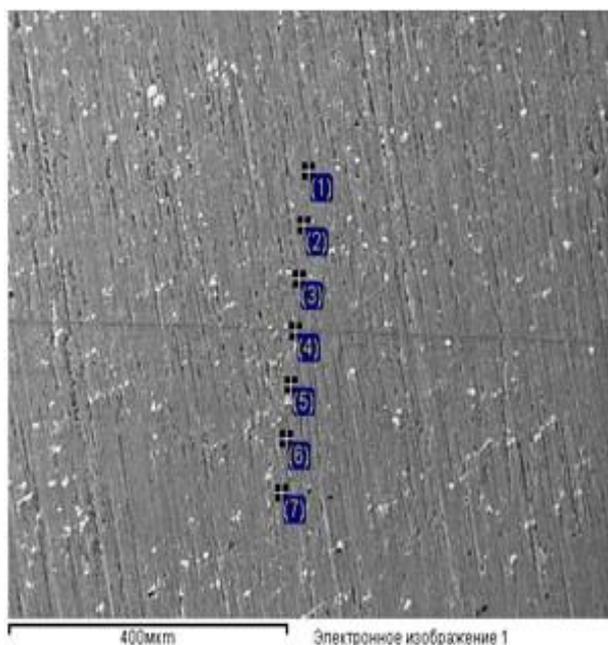


Рис. 9. Микроструктура образца со стороны сварного шва, растровый электронный микроскоп, расстояние между соседними точками 57 мкм

На растровом микроскопе выполнен анализ химического состава зоны сварного шва с применением анализатора INCA. Как показал анализ химического состава (табл. 2) в зоне сварного шва, а также на

глубине около 150 мкм, как со стороны лопатки, так и со стороны имитатора диска не наблюдается значительных различий. Это связано с тем, что материал лопатки и материал имитатора диска идентичны.

Таблица 2

Анализ содержания химических элементов в различных зонах

Спектр	Mg	Al	Si	Mn	Cu
(1)	1,31	86,82		0,49	3,81
(2)	1,30	89,92		0,60	4,27
(3)	1,36	89,15		0,54	4,20
(4)	1,31	89,17		0,50	3,82
(5)	1,29	93,07		0,37	3,95
(6)	1,28	89,90		0,80	4,05
(7)	23,44	46,94	16,68	0,31	1,63

Наличие углерода и кислорода свидетельствует о наличии окисной пленки на поверхности лопатки.

Существенное отличие содержания Mg, Si в точке 7 является показателем того, что данный спектр снят с интерметаллидного соединения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показаны общие черты и отличия микроструктуры сплава Д16 в исходном состоянии и после термообработки, также проведен анализ микроструктуры сварного соединения сектора моноколеса, полученного методом линейной сварки трением.

Установлено, что в сплаве присутствует метастабильная S-фаза Al₂CuMg, являющаяся основным упрочнителем при старении сплавов данной системы. Микротвердость

непосредственно данной фазы составляет 260 кгс/мм². Микротвердость основного материала составила 121 кгс/мм².

Показаны отличия в механических свойствах сплава при различных режимах термообработки. После искусственного старения предел прочности опытных образцов составил 469 МПа, также наблюдается значительное увеличение предела текучести до 372 МПа. Относительное удлинение снижается (с 17% до 11,21%), но остается на удовлетворительном уровне.

Степень упрочнения при продвижении от сердцевины к поверхности материала составила около 11%, что свидетельствует о наличии на поверхности оксидной пленки.

В области сварного шва выделяются три зоны: зона сварного шва, зона термомеханического влияния и зона основного материала, отличающихся интенсивностью интерметаллидных выделений, а также значениями микротвердости. При продвижении от зоны сварного шва к телу образца (как лопатки, так и имитатора) микротвердость отличается в среднем на 35 кгс/мм².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Алюминиевые сплавы.** Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочник. М.: Металлургия, 1974. 432 с. [Aluminum alloys. Structure and properties of semi-finished products from aluminum alloys. Directory (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1974.]
- 2. Сидорин И. И.** Основы материаловедения: учебник для вузов. М: Машиностроение, 1976. 436 с. [I. I. Sidorin, *Basics of materials science* (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1976.]
- 3. Кудряшов В. Г., Телешов В. В.** Улучшение комплекса свойств высокопрочных алюминиевых сплавов с позиций механики разрушения // *Металловедение, литье и обработка легких сплавов*. М.: ВИСЛ, 1986. С.234–247. [V. G. Kudryashov, V. V. Teleeshov, "Improving the complex of properties of high-strength aluminum alloys from the standpoint of fracture mechanics", (in Russian), in *Metallovedenie, lit'e i obrabotka legkih splavov*. Moscow: VISL, pp. 234-247, 1986.]
- 4. Horita Z., et. al.** Microstructures and mechanical properties of submicrometer-grained Al alloys produce by equal-channel angular extrusion // *Proc. of ICAA-6. Aluminum alloys*. V. I. P. 449–454. 1998.]
- 5. Ismagilova L. A., Sukhova N. A.** Assessment of quality of innovative technologies / *International Journal for Quality Research*. 2016. V. 10. № 4. P. 707–718.
- 6. Overview** of fatigue properties of fine grain 5056 Al-Mg alloy processed equal-channel angular pressing / Patlan V., et. al. // *Mater. Sci. Eng.* 2000. P. 345–351.
- 7. High-resolution** electron microscopy observation in submicrometer-grained Al-Mg alloy. Horita Z., et al. // *Mat. Sci. Forum*. V. 204–206. 1996. P. 437–442.
- 8. Microstructure** and microhardness of an Al-Fe alloy subjected to severe plastic deformation and aging. Senkov O. N., et. al. // *Nanostruct. Mat.* V. 10. № 5. 1998. P. 691–698.
- 9. Microhardness** measurements and the Hall-Petch relationship in an Al-Mg alloy with submicrometer grain size. Furukawa M., Horita Z., Valiev R. Z. and Langdon T.G. // *Acta Mat.* V. 44. № 11. 1996. P. 4619–4629.
- 10. Рабинович М. Х., Маркушев М. В.** О физической природе влияния размера зерна на конструкционную прочность алюминиевых сплавов // *Металловедение и технология легких сплавов*. М. ВИЛС. 1990. С. 48–55. [M. Kh. Rabinovich, M. V. Markushev, "On the physical nature of the influence of grain size on the structural strength of aluminum alloys", (in Russian), in *Metallovedenie i tekhnologiya legkih splavov*. Moscow: VILS, pp. 48-55. 1990.]
- 11. Effect** of process parameters on the aging of an Al-6%Zn-2. 3%Mg alloy. Deschamps A., et. al. // *Mat. Sci. Forum*. 1281. 1996. Pp. 217–222.
- 12. A new** thermo-mechanical procedure for improving the ductility and toughness of Al-Zn-Mg-Cu alloys in the transverse direction. Russo E. D., Consewa M., Gatto M. // *Mat. Sci. Eng.* V. 14. 1974. Pp. 23–36.
- 13. Williams J. C., Starke E. A.** The role of termomechanical processing in tailoring the properties of aluminium and titanium alloys // *Deformation, Processing and Structure: ASM Mat. Sci. Sem. St. Louis, Missouri*. 1984. pp. 279–354.
- 14. Palmer J. G., Lewis R. E., Crooks D. D.** The design and mechanical properties of rapidly solidified Al-Li-X alloy // *Aluminium-Lithium alloys. Proc. Ist. Int. Conf., Georgia, May, 1981*. pp. 241–262.

ОБ АВТОРАХ

ТОКАРЕНКО Светлана Алексеевна, инженер-технолог ПАО «ОДК-УМПО». Дипл. инженера-механика (УГАТУ, 2014).

ШЕХТМАН Семен Романович, декан вечернего факультета УГАТУ при УМПО. Дипл. инженера-механика (УГАТУ, 1993). Д-р техн. наук по порошковой металлургии и композиционным материалам (МАТИ, 2015). Иссл. в области вакуумных ионно-плазменных покрытий

КАНДАРОВ Ирек Вильевич, директор НПА «Технопарк-АТ». Дипл. инженера-механика (УГАТУ, 2004). Канд. техн. наук по материаловедению (КФУ, 2016). Иссл. в области материаловедения деталей ГТД.

METADATA

Title: Some features of the microstructure and properties of the aluminum alloy of the Al-Cu-Mg system in the blade-disk coupling zone obtained by linear friction welding

Authors: S. A. Tokarenko¹, S. R. Shekhtman², I. V. Kandarov³

Affiliation:

¹ Ufa Engine Industrial Association (UMPO), Russia

² Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia

³ Technopark of Aviation Technologies, Russia

Email: ¹ogmet@umpo.ru, ²shex@inbox.ru, ³kandarov@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 41-47, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The monolithic constructions of a blade-disk connection are increasingly developed. It increases the interest in the process of linear friction welding, which allows to solve the problem of repairing BLISKs and also which provides possible to obtain different structures and properties on the blade and on the wheel. Work is being done on the production of BLISK by the method of linear friction welding in the framework of the development of high-precision forging technologies and surface hardening of critical parts from aluminum alloys with increased structural energy efficiency. In this paper, a fragment of the blade-disk joint made of aluminum alloy D16, obtained by linear friction welding, was investigated.

Key words: gas-turbine engines; BLISK; blade; linear friction welding; aluminum alloy D16; area of thermomechanical influence; intermetallics; microhardness; microstructure; chemical analysis.

About authors:

TOKARENKO, Svetlana Alekseevna, engineer-technologist of PJSC "UEK-UMPO". Diploma. engineer-mechanic (UGATU, 2014).

SHECHTMAN, Semen Romanovich, Dean of the Faculty of USATU evening at UMPO. Dipl. Mechanical Engineer (USATU, 1993). Dr. Sc. by powder metallurgy and composite materials (MATI 2015) Inst. In the field of vacuum ion-plasma coatings

KANDAROV, Irek Vilevich, director of NPA "Technopark-AT". Diploma. mechanical engineer (USATU, 2004). Cand. tech. Sciences in Material Science (KFU, 2016). Issl. in the field of materials science details of GTE.