

УДК 669-1: 669.01:669.2

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОКОЛЕСА КОРОТКОРЕСУРСНЫХ ГТД

ГЛОТКА А.А.<sup>1</sup> к.т.н., доц.,  
ОВЧИННИКОВ А.В.<sup>2</sup> д.т.н., проф.,  
ДЖУГАН А.А.<sup>3</sup>,  
ОМЕЛЬЧЕНКО О.С.<sup>4</sup>,  
ШЕВЧЕНКО А.В.<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> кафедра физическое материаловедение, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (096) 427-56-51, e-mail: Glotka-alexander@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-3117-2687

<sup>2</sup> кафедра оборудование и технология сварочного производства, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (067) 613-65-62, e-mail: iaov@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-5649-1094

<sup>3</sup> кафедра физическое материаловедение, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (0612) 769-82-82

<sup>4</sup> кафедра механики, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +380 (61) 769-82-57,

<sup>5</sup> кафедра оборудование и технология сварочного производства, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +380 (61) 769-82-62

**Аннотация.** *Цель.* Определение возможности изготовления моноколес малоресурсных двигателей методами аддитивных технологий с использованием отечественных жаропрочных сплавов на никелевой основе. *Методика.* Для изготовления моноколес, методами аддитивных технологий, возможно, использовать жаропрочные сплавы на никелевой основе, которые серийно используются на АО «Мотор Сич»: *Результаты.* Исходя из анализа свойств материалов, перспективным сплавом является ВЖЛ12У-ВИ, он имеет показатели прочности, жаропрочности и свариваемости на уровне удовлетворяющем технические характеристики предъявляемые к моноколесу *Практическая значимость.* Применение аддитивных технологий с использованием отечественных жаропрочных сплавов позволит существенно ускорить производство изделия, а также снизить его себестоимость.

*Ключевые слова:* моноколесо; жаропрочный сплав на никелевой основе; аддитивные технологии; свариваемость.

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АДДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МОНОКОЛЕСА КОРОТКОРЕСУРСНИХ ГТД

ГЛОТКА О.А.<sup>1</sup> к.т.н., доц.,  
ОВЧИННИКОВ О.В.<sup>2</sup> д.т.н., проф.,  
ДЖУГАН О.А.<sup>3</sup>,  
ОМЕЛЬЧЕНКО О.С.<sup>4</sup>,  
ШЕВЧЕНКО А.В.<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> кафедра фізичне матеріалознавство, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (096) 427-56-51, e-mail: Glotka-alexander@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-3117-2687

<sup>2</sup> кафедра обладнання та технологія зварювального виробництва, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 613-65-62, e-mail: iaov@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-5649-1094

<sup>3</sup> кафедра фізичне матеріалознавство, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (0612) 769-82-82

<sup>4</sup> кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +380 (61) 769-82-57,

<sup>5</sup> кафедра обладнання та технологія зварювального виробництва, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +380 (61) 769-82-62

**Анотація. Мета.** Визначення можливості виготовлення моноколес малоресурсних двигунів методами адитивних технологій з використанням вітчизняних жароміцних сплавів на нікелевій основі. **Методика.** Для виготовлення моноколес, методами адитивних технологій, можливо використовувати жароміцні сплави на нікелевій основі, які серійно використовуються на ПАТ «Мотор Січ». **Результати.** Виходячи з аналізу властивостей матеріалів, перспективним сплавом є ВЖЛ12У-VI, він має показники міцності, жароміцності і зварюваності на рівні, що задовольняє технічні характеристики, які пред'являються до моноколеса. **Практична значимість.** Застосування адитивних технологій з використанням вітчизняних жароміцних сплавів дозволить істотно прискорити виробництво, а також знизити собівартість виробу.

*Ключові слова:* моноколесо; жароміцний сплав на нікелевій основі; адитивні технології; зварюваність

## ANALYSIS OF POSSIBILITY OF APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING OF MONOCOLES OF SHORT-CURRENT GTE

GLOTKA A.A.<sup>1</sup> Ph. D., Assos.prof.,  
OVCHINNIKOV A.V.<sup>2</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,  
DZHYGAN A.A.<sup>3</sup>,  
OMELCHENKO O.S.<sup>4</sup>,  
SHEVCHENCO A.V.<sup>5</sup>.

**Annotation. Purpose.** Determination of the possibility of manufacturing mono-wheels of low-resource engines by the methods of additive technologies using domestic high-temperature alloys on a nickel basis. **Methodology.** For the manufacture of monocol, by the methods of additive technologies, it is possible to use nickel-base heat-resistant alloys that are commercially used at PJSC Motor Sich. **Results.** Based on the analysis of the properties of materials, the promising alloy is VZhL12U-VI, it has indicators of strength, heat resistance and weldability at a level satisfying the technical specifications required for mono-wheels. **Practical significance.** The use of additive technologies with the use of domestic high-temperature alloys will significantly accelerate the production of the product, as well as reduce its cost.

*Key words:* mono-wheel; high-temperature nickel based alloy; additive technologies; weldability

### Введение

На сегодняшний день, основными требованиями к ГТД пятого поколения являются: увеличение тягово-экономических характеристик, повышение надежности и эффективности двигателя, снижение количества деталей и снижение веса двигателя на 20...30%. Максимальная температура газа перед турбиной достигла уровня ~1900К, а степень повышения давления в компрессоре 50. Степень двухконтурности в дозвуковых ГТД достигает очень высоких ("сверхбольших") значений  $m = 8...12$ , что в сочетании с повышением параметров цикла и КПД узлов позволило снизить расход топлива на 10...15 % по сравнению с ГТД 4-го поколения.[1] Это привело к появлению нового конструктивного решения при производстве роторов – применения моноколес ("блинги" и "блиски"). Моноколеса – одни из наиболее сложных деталей современных ГТД, которым присущи сложные геометрия и конструкция, связанность лопаток и диска, высокий уровень возбуждения колебаний, отсутствие конструкционного демпфирования и др. Они работают в условиях повышенных температур при высоких статических и вибрационных нагрузках.

Их начали применять для изготовления малоразмерных короткоресурсных ГТД, используемых на беспилотных летательных аппаратах, так как на дисках малого диаметра сложно

обеспечить необходимую прочность замковых соединений для размещения требуемого количества лопаток [2].

Моноколеса изготавливаются по классической технологии литья по выплавляемым моделям из жаропрочных сплавов на никелевой основе, которое широко применяется в машиностроении при изготовлении тонкостенных сложных по конфигурации отливок и является наиболее распространенным методом получения мелких фигурных отливок. Технология литья по выплавляемым моделям имеет такие недостатки как: длительный технологический процесс и высокая стоимость отливки. Кроме того, после получения отливки, заготовка требует доработки механическими методами, что значительно увеличивает ее стоимость [3]. Эти затраты можно существенно уменьшить путем применения передовых технологий 3D-печати, суть которых заключается в изготовлении детали методами послойного наложения материала [4, 5], что по сути есть послойное сваривание присадочного материала.

Однако существуют проблемы свариваемости, которые объясняются, особенностью жаропрочных дисперсионно- твердеющих никелевых сплавов, наличием большого количества дисперсионных включений, а высокая жаропрочность обеспечивается за счёт выделения интерметаллидного упрочнения

дисперсной  $\gamma'$  – фазы  $Ni_3(Al, Ti)$ . никелевых сплавов к образованию трещин при термообработке с содержанием в них алюминия и титана. Эти сплавы условно разделены на 3 группы. В первую группу включены сплавы не склонные к образованию трещин при сварке и термообработке. Это гомогенные и слабостареющие сплавы с содержанием  $\gamma'$  – фазы не более 3 – 5%. Вторую группу составляют сплавы умеренно склонные к трещинообразованию. Содержание в них  $\gamma'$  – фазы не превышает 18 – 20% (титана 2-5%, алюминия 1,5-3,6%). К третьей группе отнесли плохо свариваемые высокожаропрочные сплавы с содержанием  $\gamma'$  – фазы более 20 – 25% [6].

### Цель

Таким образом, целью настоящей работы являлось определение возможности изготовления моноколес малоресурсных двигателей методами аддитивных технологий с использованием отечественных жаропрочных сплавов на никелевой основе.

### Материал

Для изготовления моноколес, методами аддитивных технологий, возможно использовать жаропрочные сплавы на никелевой основе, которые серийно используются на ПАО «Мотор Сич»: ЖС32-ВИ (ТУ 1-92-177-91) ЖС3ЛС (ОСТ 1 90127-85), ВЖЛ 12У-ВИ (ГОСТ ОСТ 1 90126-85) и ЭИ741п (ГОСТ 52802-2007).

### Методика и результаты

Основными требованиями к материалу, из которого изготавливаются моноколеса малоресурсных двигателей, является предел текучести до 850 МПа, предел прочности до 1000 МПа, относительное удлинение 10% и длительная прочность не ниже  $\sigma_{40}^{975}=200$  МПа.

В следствии разной химической композиции, сплавы имеют разные температуры эксплуатации и, следовательно, назначение. Минимальную температуру эксплуатации имеет сплав ЭП741п (рис.1) и применяется как гранулируемый материал для изготовления деталей ответственного назначения (диски турбины ГТД). Однако, за счет быстрого разупрочнения при температуре эксплуатации моноколеса использование данного материала есть не рациональным.

Сплав ЖС32 – ВИ используется для изготовления литых деталей методами направленной и монокристаллизации, которые работают в диапазоне температур 1000-1100°C (см. рис.1). В следствии сложной композиции легирующих элементов и применение рения, данный материал используется ограниченно.

Сплавы ВЖЛ 12У и ЖС3ЛС имеют одинаковый интервал эксплуатации (около 1000°C), что

соответствует высунутым требованиям к моноколесу. Однако уровень легирования существенно отличается (см. табл.1), что приводит к разнице в стоимости материала.

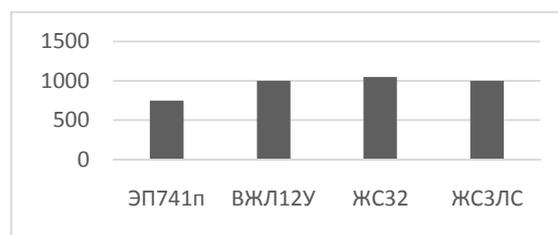


Рис.1. Температуры эксплуатации жаропрочных материалов / Temperatures of heat-resistant materials

Сравнительный анализ, основных механических свойств, жаропрочных сплавов, дает возможность судить о возможном уровне нагрузки изделия. Так, временное сопротивление при комнатной температуре, для анализируемых жаропрочных сплавов, представлено на рис.2. Все материалы, кроме ЖС3ЛС, имеют достаточный уровень прочности, который регламентируется техническими условиями.

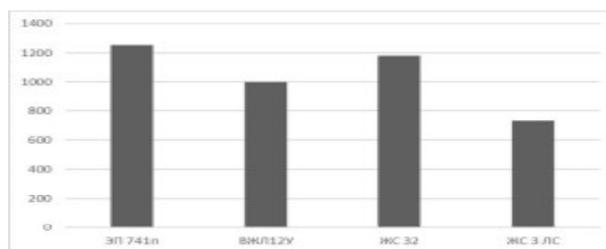


Рис. 2. Временное сопротивление жаропрочных сплавов при комнатной температуре / Temporal resistance of high-temperature alloys at room temperature

Анализ предела длительной прочности при температуре 900°C и времени испытания 100 часов (рис.3), дает более полное представление возможностей использования данных сплавов. Сплав ЭП741п не представлен на рис.3, поскольку температура эксплуатации существенно ниже за регламентируемую.

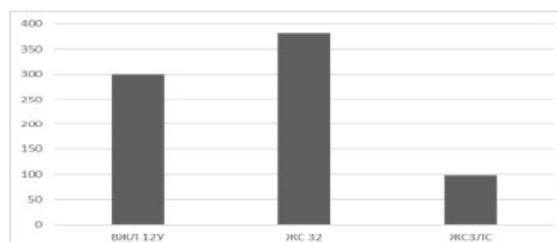


Рис. 3. Предел длительной прочности жаропрочных материалов при температуре 900 °C и времени испытания 100 часов/ The ultimate strength of heat-resistant materials at a temperature of 900 °C and a test time of 100 hours

Наибольшие показатели жаропрочности имеет сплав ЖС32-ВИ, что объясняется высоким уровнем легирования, однако значительное превышения требований, это приведет к подорожанию изделия. Сплав ВЖЛ 12У соответствует высунутым требованиям жаропрочности, а сплав ЖС3ЛС значительно уступает ему в этом.

Исходя из химического состава и механических свойств этих материалов их применение существенно отличается. Так сплав ЖС32-ВИ имеет высокие показатели механических и жаропрочных характеристик, в следствии повышенного содержания легирующих элементов. После термической обработки (закалка с 1280°C 4 ч) в материале присутствует повышенное количество  $\gamma'$  – фазы (более 50%), что приводит к плохой свариваемости материала. Так же, согласно диаграмме, рис.4 [7] этот сплав принадлежит к сложносвариваемым материалам.

Литейный жаропрочный не коррозионностойкий никелевый сплав ВЖЛ12У-ВИ имеет высокую склонность к образованию термических трещин, это определяет сложности при его сварке плавлением [8]. Это объясняется повышенным содержанием таких элементов как титан и алюминий, которые повышают объемное содержание  $\gamma'$  – фазы.

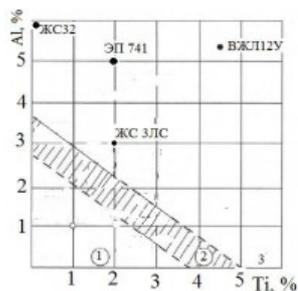


Рис. 4 Диаграмма для оценки склонности жаропрочных никелевых сплавов к образованию термических трещин (зона 1-3 соответственно, сплав не склонный, с умеренной склонностью, с высокой склонностью к образованию трещин) [7]  
The diagram for estimating the propensity of heat-resistant nickel alloys to form thermal cracks (zone 1-3, respectively, the alloy is not inclined, with a moderate tendency, with a high propensity to crack)

Сплав ЭП741п, который применяется для изготовления гранул, так же, согласно рис.4, является сложносвариваемым материалом. Преимуществом данного материала, является отработанная технология получения гранул и технология получения готовых изделий. Сплав ЖС3ЛС является не склонным к образованию трещин при сварке.

Исходя из этого, изготовление моноколес методом аддитивных технологий, являются перспективным направлением, поскольку исключает такие сложные в исполнении технологические переделы как литье по выплавляемым моделям и механическая обработка.

### Результаты

Таким образом, исходя из выше перечисленных свойств материала, перспективным сплавом является ВЖЛ12У-ВИ, он имеет показатели прочности, жаропрочности и свариваемости на уровне удовлетворяющем технические характеристики, предъявляемые к моноколесу.

### Выводы

1. Проведен анализ возможности применения аддитивных технологий для производства моноколес короткоресурсных двигателей ГТД, которые изготавливаются на АО «Мотор Сич».
2. Из номенклатуры жаропрочных сплавов были предложены материалы, которые широко используются на предприятии.
3. Сравнительный анализ свойств показал преимущества каждого материала и выявил ряд недостатков. Так, повышенное легирование увеличивает жаропрочность материала, однако снижает свариваемость. Поскольку, аддитивные технологии основываются на процессе сварки, то снижение данного параметра будет влиять на качество изделия.
4. Для изготовления моноколеса методами аддитивных технологий предложен сплав ВЖЛ12У-ВИ, поскольку он удовлетворяет большинству техническим требованиям.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабкин В.И. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий/ В.И. Бабкин, М.М. Цховребов, В.И. Солонин, А.И. Ланшин// Двигатель. – 2013. - №2 (86). – С. 2-7.
2. Фомичев Е.О. Разработка способов восстановления моноколес газотурбинных двигателей: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.10. «Сварка, родственные процессы и технологии» / Е.О. Фомичев. – Москва. – 2013. – 19 с.
3. Моргунов В.Н. Основы конструирования отливок. Параметры точности и припуски на механическую обработку: Учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004.– 164 с.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего/ Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, Б.С. Ломберг/ Автоматическая сварка.- 2013.- №10-11.- С. 23-32.
5. John Hart. Additive Manufacturing [Электронный ресурс] / John Hart. – Режим доступа: <http://web.mit.edu/2.810/www/lecture/19-additive-mfg.pdf>

6. Киреев Р.Ю. Причины образования дефектов сварных соединений при сварке и термообработке никелевых сплавов типа ВЖЛ-14 / Р.Ю. Киреев, В.П. Чумарный // [Вестник Воронежского государственного технического университета](#). – 2013. - № 2, Том 9. – С. 72-74
7. Сорокин Л.И. Оценка сопротивляемости образованию трещин при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Часть 2/ Л.И. Сорокин// Сварочное производство. – 2003. - №12. – С. 9-18.
8. Гайдук С.В. Сравнительные исследования свариваемости литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, И.А. Петрик, В.В. Кононов// Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. - №1. – С. 82-88

#### REFERENCES

1. Babkin V.I. Razvitiye aviatsionnykh GTD i sozdaniye unikal'nykh tekhnologiy/ V.I. Babkin, M.M. Tskhovrebov, V.I. Solonin, A.I. Lanshin// Dvigatel'. – 2013. - №2 (86). – S. 2-7.
2. Fomichev Ye.O. Razrabotka sposobov vosstanovleniya monokoles gazoturbinnnykh dvigateley: avtoref. dis. na soiskaniye nauch. stepenya kand. tekhn. nauk : spets. 05.02.10. «Svarka, rodstvennyye protsessy i tekhnologii» / Ye.O. Fomichev. – Moskva. – 2013. – 19 s.
3. Morgunov V.N. Osnovy konstruirovaniya otlivok. Parametry tochnosti i pripuski na mekhanicheskuyu obrabotku: Ucheb. posobiye. – Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2004.– 164 s.
4. Kablov Ye.N. Strategicheskiye napravleniya razvitiya konstruksionnykh materialov i tekhnologiy ikh pererabotki dlya aviatsionnykh dvigateley nastoyashchego i budushchego/ Ye.N. Kablov, O.G. Ospennikova, B.S. Lomberg/ Avtomaticheskaya svarka.- 2013.- №10-11.- S. 23-32.
5. John Hart. Additive Manufacturing [Elektronnyy resurs] / John Hart. – Rezhim dostupa: <http://web.mit.edu/2.810/www/lecture/19-additive-mfg.pdf>
6. Kireyev R.YU. Prichiny obrazovaniya defektov svarnykh soyedineniy pri svarke i termoobrabotke nikel'nykh splyavov tipa VZHL-14 / R.YU. Kireyev, V.P. Chumarnyy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. - № 2, Том 9. – С. 72-74
7. Sorokin L.I. Otsenka soprotivlyayemosti obrazovaniyu treshchin pri svarke i termicheskoy obrabotke zharoprochnykh nikel'nykh splyavov (obzor). Chast' 2/ L.I. Sorokin// Svarochnoye proizvodstvo. – 2003. - №12. – S. 9-18.
8. Gayduk S.V. Sravnitel'nyye issledovaniya svarivayemosti liteynykh zharoprochnykh nikel'nykh splyavov / S.V. Gayduk, I.A. Petrik, V.V. Kononov// Noví materialí i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanní. – 2015. - №1. – S. 82-88

*Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиным (Украина)*