

УДК 621.438-226:621.791.763.1

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПУСТОТЕЛЬНЫХ ДИСКОВ ТУРБИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Б. Е. ВАСИЛЬЕВ¹, В. В. ИСАКОВ², А. В. СЕМЁНОВ³, А. В. САЛЬНИКОВ⁴

¹bevasilev@ciam.ru, ²isakov@ciam.ru, ³avsemenov@ciam.ru, ⁴avsalnikov@ciam.ru

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова»

Поступила в редакцию 22.05.2019

Аннотация. Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований пустотелых дисков турбин сварной конструкции. Рассмотрены и проанализированы основные прочностные и технологические проблемы: проектирование пустотелого диска со сварным соединением, подвод лазерного луча в зону сварки, обеспечение сквозного проплавления металла, обеспечение механической прочности сварного соединения, модификация конструкции диска с целью обеспечения несмыкания ступиц под действием центробежных сил. С целью отработки режимов сварки изготовлены кольца-имитаторы, а также пустотелый диск из ЭИ698ВД. Проведены разгонные испытания сварного пустотелого диска, в результате которых показана достаточность статической прочности сварного соединения.

Ключевые слова: пустотелый диск; турбина; сварка; проектирование; оптимизация; разгонные испытания; ступица; обод; замковое соединение; характеристики прочности; снижение массы.

ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения прочностной надежности дисков высокооборотных роторов турбин, конструктора, как правило, увеличивают толщину в области ступицы диска. Это приводит к увеличению массы дисков газотурбинных установок и двигателей.

Повышение прочностных и улучшение весовых характеристик дисков возможно в ходе оптимизации их геометрии и/или использования новых конструктивных решений. В последнем случае необходимо решать две проблемы: оценка эффективности их внедрения, а также их реализация с точки зрения технологических возможностей.

Данная работа является продолжением исследований в обеспечение разработки конструктивно-технологического решения «пустотелый диск» [1]. Улучшение весовых характеристик (и характеристик прочности) происходит за счет разделения полотна

на две части и оптимального расположения половин относительно друг друга (рис. 1). Дополнительным преимуществом является снижение время прогрева и остывания диска (из-за уменьшения габаритов ступицы), что благоприятно как с точки зрения напряженно-деформированного состояния, так и кинетики радиальных зазоров.

Основной проблемой изготовления пустотелых дисков является наличие замкнутой полости, которую сложно сформировать в процессе производства, выполнить постобработку и контролировать.

Ранее [2] рассмотрено несколько способов создания подобной конструкции, в том числе с применением аддитивных технологий, а также ГИП.

Использование сварки позволяет разделить диск на две части, которые могут быть независимо изготовлены (в том числе методами аддитивных технологий) и обработаны с помощью традиционных технологи-

ческих процессов (деформирование, ГИП, точение, и т.д.). Далее эти половины соединяются вместе при помощи сварки.

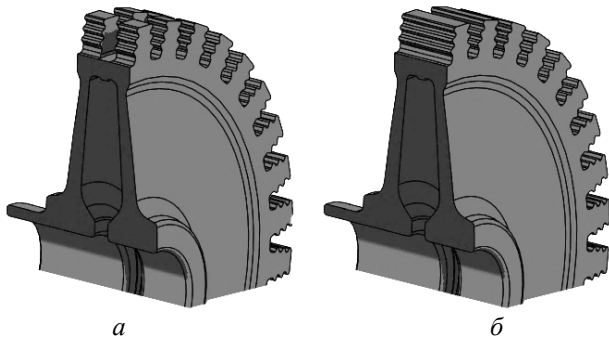


Рис. 1. Пример конструкции диска с полостью:
a – разрезной замок; *б* – цельный замок

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДИСКА

В данной работе разработан вариант пустотелой конструкции с разрезной ступицей, который можно изготовить с использованием лазерной сварки. Общий вид предлагаемого конструктивного решения приведен на рис. 2. Пустотелая конструкция с разрезной ступицей изготавливается путем лазерной сварки в районе обода двух заранее изготовленных половин, причем лазерный луч подводится со стороны прорези в ступице.

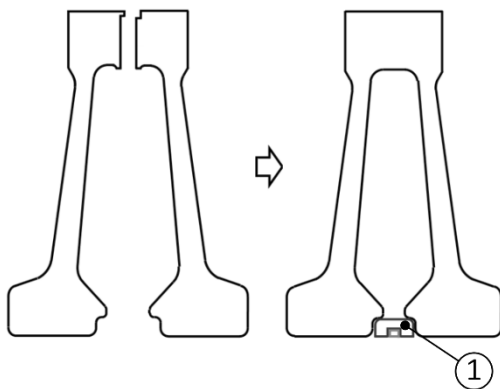


Рис. 2. Общий вид пустотелой разрезной сварной конструкции диска

Наибольшее количество дефектов сварного соединения сосредоточено в его корне шва. Преимуществом разработанного метода является то, что корень шва располагается с внешней стороны обода. После сварки производится удаление слоя металла вместе с корнем шва при помощи механической обработки (рис. 3). Припуск на обработку шва заложен на этапе проектирования диска с учетом максимальной глубины проплавления,

которая, для обеспечения требуемой прочности шва, обычно составляет не более 10–15 мм.

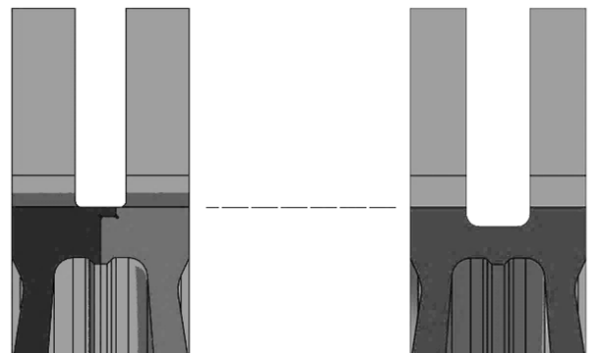


Рис. 3. Удаление корня сварного шва
(на примере модельного диска)

По этой причине рассмотрено два варианта изготовления замкового соединения (ЗС): разрезное (рис. 1, *a*) и изготовленное из цельного обода небольшой (не больше максимальной глубины проплавления) толщины (рис. 1, *б*).

Проведенный авторами расчет циклической долговечности разрезного ЗС для рассмотренной конструкции рабочего колеса показал значительное снижение долговечности (до 7 раз по сравнению с цельным замком) из-за наличия концентратора в зоне высоких напряжений. В то же время применение ЗС, выполненного из цельного обода, позволило получить требуемое значение циклической долговечности.

Увеличение толщины ободной части возможно при помощи горячего изостатического прессования или применения других видов сварки. Также возможен переход к конструкции рабочего колеса типа «блиск» при наращивании лопаток с использованием аддитивных технологий.

Ключевой особенностью разработанного конструктивного облика является наличие сегментированного кольца, которое вставляется в прорезь между ступицами после сварки (позиция 1 на рис. 2) и предотвращает полотна диска от смыкания под действием центробежных сил.

Для исследования сварной конструкции на базе разработанного ранее [2–4] разрезного в зоне ступицы диска спроектирована конструкция модельного диска, состоящая из двух половин *A* и *B* (рис. 4), каж-

дая из которых может быть получена традиционными методами изготовления. Для учета контурной нагрузки от лопаток модельный диск спроектирован с U-образными имитаторами.

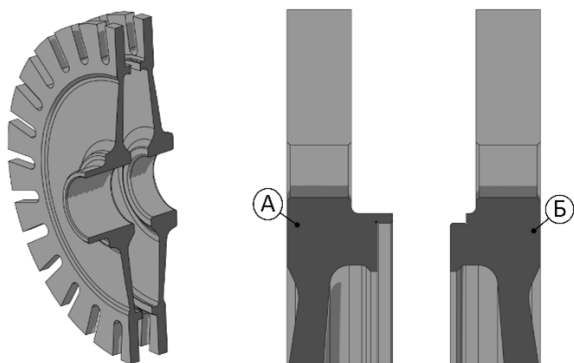


Рис. 4. Вид модельного диска

Для взаимного центрирования и фиксации половин модельного диска перед сваркой в конструкции предусмотрены центрирующие пояски, по которым происходит соединение деталей по посадке с натягом.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

Отличительная особенность полого диска, разработанного на основе выбранного [1] конструктивно-технологического решения, состоит в создании неразъемного соединения в его ободной части с выходом корня шва в зону, доступную для последующей механической обработки.

Получение сварного шва с глубоким проплавлением возможно благодаря феномену парогазового канала, который возникает в жидкой ванне расплава, при острой фокусировке лазерного излучения [5]. Такие сварные швы формируются, как правило, на скоростях свыше 16 мм/с, фокус располагают вблизи свариваемых поверхностей или немного заглубляют. В результате получения максимальной плотности мощности на поверхности изделия сварной шов приобретает глубокое «кинжальное» проплавление (рис. 5). Лазерная сварка с глубоким проплавлением обычно выполняется за один проход, без разделки кромок и на максимально высокой скорости, что является преимуществом метода.

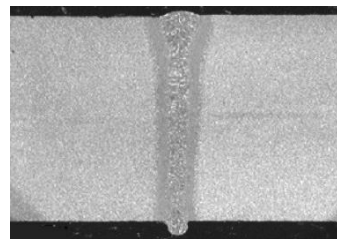


Рис. 5. Образец сварки с глубоким проплавлением

Увеличение толщины свариваемых изделий свыше 15 мм приводит к повышению вероятности появления дефектов в сварном шве, таких как подрезы, поры, полости, трещины. Это связано с повышением требуемой мощности лазера, снижением скорости сварки и, как следствие, увеличением объема жидкой ванны.

Серьезной проблемой, возникающей при изготовлении сварного пустотелого диска, является отсутствие визуального контроля шва на внутренней поверхности. В дополнение дисковые сплавы, в том числе и используемый в работе ЭИ698-ВД, обладают плохой свариваемостью, поэтому расчет и выбор режима сварки является критическим этапом. На первом этапе, при отработке режимов сварки, использовали плоские заготовки, из которых изготавливали специальные образцы для определения механических характеристик сварного шва (рис. 6).

Результаты испытаний показали, что средние значения предела прочности и предела пластичности в сварном шве ниже значений этих же показателей для исходного сплава ЭИ698-ВД. В то же время пластичность сварного шва находится на приемлемом уровне. Применение последующей термической обработки, как объемной, так и локальной, приводит к улучшению механических свойств лазерно-сваренных швов.

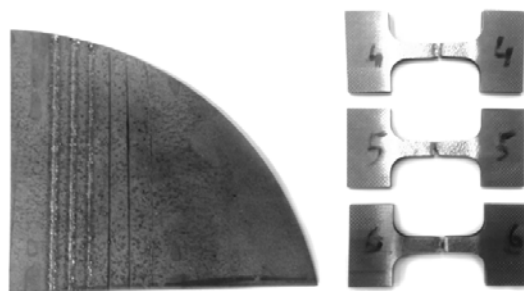


Рис. 6. Внешний вид и лазерно-сваренные образцы сплава ЭИ689-ВД

На основе проведенных исследований образцов, проплавленных на различных режимах, отобраны наиболее эффективные условия сварки по максимальной глубине проплавления и минимальной величине литой зоны. Определены режимы (мощность излучения, скорость сварки, величина заглубления фокуса, расход защитного газа), обеспечивающие наилучшее качество сварного соединения.

Для отработки технологии лазерной сварки ободной части диска изготовлены кольцевые образцы-имитаторы из ЭИ698-ВД с идентичной геометрией зоны сварного соединения (рис. 7).

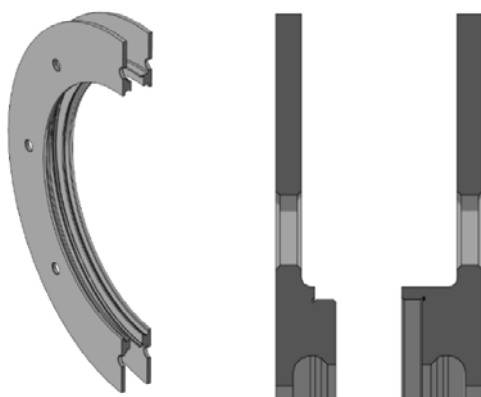


Рис. 7. Кольцевые образцы-имитаторы для отработки режимов сварки

Пример сварных швов, полученных в ходе подбора скоростного режима лазерной сварки, приведен на рис. 8. Между швами видна зона не сваренных выступов.



Рис. 8. Пример швов, полученных в ходе подбора режима сварки

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОСНАТКИ ДЛЯ СВАРКИ

Спроектированный модельный диск имеет следующие основные размеры: диаметр отверстия в ступице 50 мм, минимальный зазор между стенками 7 мм, расстояние от центра отверстия в ступице до поверхности стыка на ободке 100 мм.

Анализ возможных технологических приемов показал, что для разработанной конструкции диска, подать инструмент для контролируемой механической обра-

ботки корня шва через отверстие в ступице в полость между двумя полотнами, не представляется возможным. Поэтому для решения этой задачи была разработана принципиально новая схема и соответствующая оснастка для подачи сфокусированного лазерного излучения в труднодоступную зону сварки со стороны ступицы, с помощью поворотного зеркала (рис. 9).

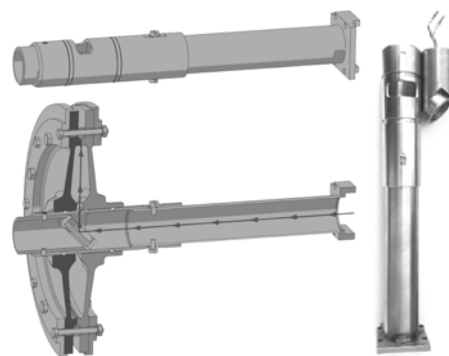


Рис. 9. Приспособление для лазерной сварки

В качестве защитного газа применяли аргон, поскольку его удельный вес выше, чем у воздуха (что благоприятствует формированию устойчивой области газовой защиты), и аргон не взаимодействует с излучением мощного волоконного лазера.

Для обеспечения высокого качества шва сварку выполняли сфокусированным лазерным лучом в один проход со стороны полости диска. При подборе максимальной мощности лазерного луча учитывали допустимую величину термического расширения кольцевого стыка. Совмещение лазерного луча с плоскостью стыка контролировали по расположению центра пятна пилотного лазера на экране видеоконтрольного устройства. Лазерную головку, закрепленную на фланце руки робота, центровали по оси симметрии свариваемого диска (рис. 10).



Рис. 10. Установка сварочной головки и центровка «пилотным» лазером

Основная задача, корректное решение которой позволило создать поворотное зеркало, это выбор материала отражающей поверхности и ее защита от деструктивных факторов, возникающих в процессе лазерной сварки. Как видно из рис. 11 [6], для излучения с длиной волны 1,07 мкм, максимальный коэффициент отражения имеется у полированного серебра и меди.

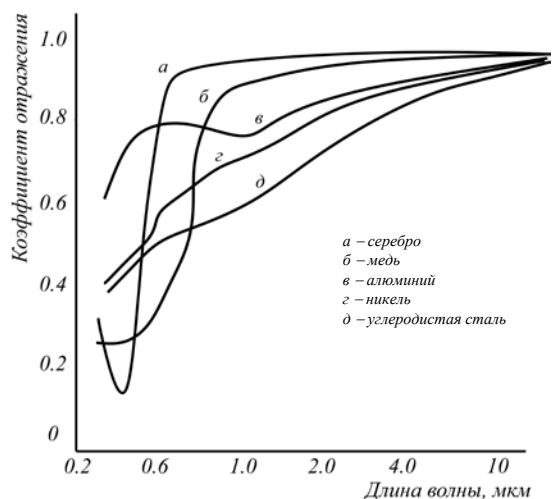


Рис. 11. Коэффициент отражения металлов как функция длины волны

Для изготовления охлаждаемого водой зеркала, поворачивающего сфокусированное лазерное излучение на 90° , использовали медь марки М00 (рис. 12).

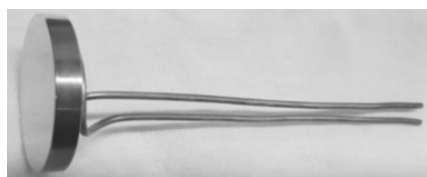


Рис. 12. Полированное медное зеркало с трубками охлаждения

В результате работ изготовлено два сварных модельных диска: из стали 20 (рис. 13) и ЭИ698-ВД. Для предварительной экспериментальной проверки разработанного конструктивно-технологического решения проведены разгонные испытания стального модельного диска на стенде РС-2Ц ЦИАМ. В дальнейшем планируются циклические испытания диска из ЭИ698-ВД.



Рис. 13. Вид сварного модельного диска

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСТОТЕЛОГО СВАРНОГО ДИСКА ТУРБИНЫ

На рис. 14 показан вид пустотелого диска, установленного на стенде.

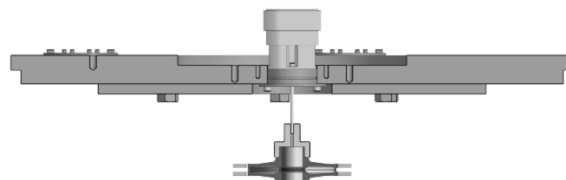


Рис. 14. Установка диска на стенд РС-2Ц

Проведены численные исследования по определению разрушающей частоты вращения диска. Распределение полных деформаций для стального диска при раскрутке приведено на рис. 15. Критическими зонами диска являются зоны А и Б — область перехода полотна диска в ободную часть и впадина имитатора, соответственно.

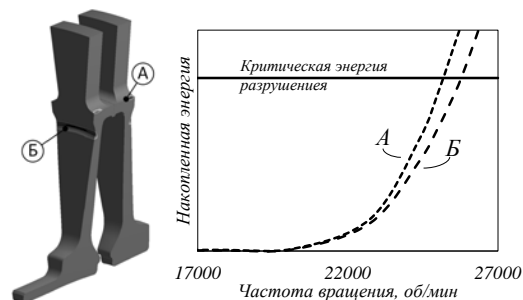


Рис. 15. Моделирование разгонных испытаний

Для критических зон диска А и Б на рис. 15 представлены результаты изменения величины энергии при увеличении частоты вращения. Разрушающая частота вращения оценивалась по энергетическому критерию [7] и по теории предельного рав-

новесия [8]. В результате расчета определено, что минимальная частота вращения, при которой прогнозируется разрушение диска, составляет 25700 об/мин.

В ходе проведенных разгонных испытаний диск разрушился при частоте 26200 об/мин. Замедленная съемка показала, что очаг разрушения находился во впадине имитатора (рис. 16). Разрушений по сварному шву не обнаружено.

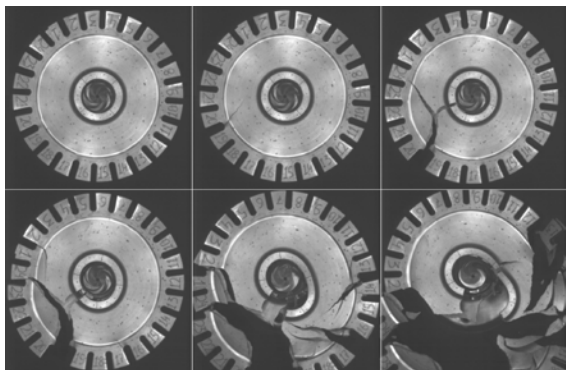


Рис. 16. Покадровая съемка процесса разрушения диска

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение конструктивно-технологического решения «пустотелый сварной диск» эффективно с точки зрения снижения массы и может быть реализовано в том числе с использованием лазерной сварки.

Для рассмотренного типоразмера рабочего колеса выигрыш в массе по сравнению с традиционной конструкцией составляет 15 %.

Использование разработанной специальной оснастки с поворотной головкой, обеспечивающей подвод лазерного луча в область сварки со стороны внутренней полости, позволило изготовить пустотелый диск из двух предварительно обработанных половин. При изготовлении применялся режим, который был отработан на кольцах-имитаторах и образцах.

Проведенные разгонные испытания модельного пустотелого диска подтвердили достаточную статическую прочность сварного шва.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Д. В. Шадрину за помощь при проведении

разгонных испытаний, Н. Ю. Иванченко за помощь при конструкторской проработке разрабатываемых конструктивно-технологических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сальников А. В., Васильев Б. Е. Проектирование пустотелых дисков турбин и анализ эффективности их использования // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21, № 3 (77). С. 40–46. [A. V. Salnikov, B. E. Vasilyev, "Design of hollow turbine discs and analysis of their efficiency", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 3 (77), pp. 40-46, 2017.]
2. **Twin-Web Turbine Discs: Part 1 — Design and Analysis of Their Efficiency** / B. Vasilyev, et al. // ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2018. P. V07AT30A006-V07AT30A006.
3. **Twin-web turbine discs: Part 2 – fabrication and processing** / B. Vasilyev, et. al. // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018, GT2018-76310. Oslo, Norway, 2018.
4. **Разрезной пустотелый диск** / А. В. Сальников и др. // Патент РФ Ru177044U1, 2018. С. 11. [A. V. Salnikov, et. al., "Split hollow disk", Patent Ru177044U1, 2018.]
5. **Справочник по лазерной сварке**. Редактор оригинального издания С. Катаяма. М.: Техносфера, 2015. 704 с. [Ed. Of the orig. ed. S. Katayama, *Handbook of laser welding*, (in Russian). Moscow: Technosfera, 2015.]
6. **Воздействие лазерного излучения на материалы** / Р. В. Арутюнян и др. М.: Наука, 1989. 376 с. [R. V. Harutyunyan, et. al., *Effects of laser radiation on materials*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1989.]
7. **Каримбаев К. Д., Серветник А. Н.** Численное моделирование разгонных испытаний дисков турбомашин // Вестник двигунобудування. 2008. № 3. С. 130–134. [K. D. Karimbaev, A. N. Servetnik, "Numerical simulation of acceleration testing of turbomachine disks", (in Russian), in *Vestnik Dvignobuduvanni*, no. 3, pp. 130-134, 2008.]
8. **Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б.** Расчет на прочность деталей машин: справочник. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1993. 640 с. [I. A. Birger, B. F. Shorr, G. B. Iosilevich, *Strength calculation of machine parts*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1993.]

ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Борис Евгеньевич, канд. техн. наук, нач. отдела отделения прочности ЦИАМ.

ИСАКОВ Владимир Владимирович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

СЕМЁНОВ Артем Васильевич, асп., вед. инженер отделения прочности ЦИАМ.

САЛЬНИКОВ Антон Владелинович, асп., вед. инженер отделения прочности ЦИАМ.

METADATA

Title: Fabrication of twin-web welded turbine discs

Authors: B. E. Vasilyev¹, V. V. Isakov², A. V. Semenov³, A. V. Salnikov⁴

Affiliation:

Central Institute of Aviation Motors (CIAM)

Email: ¹ bevasilev@ciam.ru, ² isakov@ciam.ru,
³ avsalnikov@ciam.ru, ⁴ avsemenov@ciam.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 2 (84), pp. 3-9, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: This paper provides the results of empirical and numerical analysis of twin-web welded disk. The main strength and technological problems were considered and analyzed: designing a twin-web disk with a welded joint, supplying a laser beam to the welding zone, ensuring the penetration of metal, ensuring the mechanical strength of the welded joint, modifying the disk structure to ensure non-closure of webs under the action of centrifugal forces. In order to work out the welding conditions, simulator rings and a twin-web disk were made from EI698VD. An overspeed test were carried out and the sufficiency of the static strength of the welding joint was shown.

Key words: twin-web disc; turbine; welding; optimization; overspeed test

About authors:

VASILYEV, Boris Evgenevich, PhD, head of department.

ISAKOV, Vladimir Vladimirovich, PhD, senior scientist.

SEMENOV, Artem Vasilevich, postgraduate student, lead engineer.

SALNIKOV, Anton Vladelinovich, postgraduate student, lead engineer.