

УДК 621.791.725:621.454.2.035

А. Н. Коваленко, Д. В. Кирсанов, Н. А. Миросиди,  
канд. техн. наук В. Д. Шелягин, канд. техн. наук А. В. Бернацкий, А. В. Сиора

## РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОПЛОВЫХ БЛОКОВ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАЙКИ

Описаны сложности изготовления крупногабаритных сопловых блоков классическим для украинской ракетно-космической промышленности методом высокотемпературной пайки. Приведены путь решения данной проблемы, избранный ГП «КБ «Южное», и первые успехи на пути к организации нового производства с применением инновационных технологий лазерной сварки и наплавки. Представлена поэтапная последовательность и порядок проведения научно-исследовательских работ по отработке новой технологии изготовления охлаждаемого соплового блока. Выделены четыре этапа, из которых первые два уже успешно пройдены. Технология лазерной сварки и наплавки позволит уйти от применения дорогостоящего и уникального оборудования, позволит сократить и оптимизировать технологический цикл производства, отказавшись от длительных и энергоёмких технологических операций. Научно-технологические работы показали принципиальную возможность осуществления связи наружной рубашки с внутренней стенкой соплового блока при помощи лазерной сварки. Изготовленные опытные образцы подтвердили высокие прочностные характеристики, предварительно полученные теоретическими расчетными методами. Участки, полученные наплавкой, демонстрируют хорошую металлургическую связь между слоями. На опытных образцах отработана методика, позволяющая производить ремонт дефектных зон в сварочном шве, полученном методом лазерной сварки. Данный момент особенно важен с технологической и экономической точек зрения, так как применяемая сейчас технология высокотемпературной пайки не позволяет проводить гарантированный ремонт паяных соединений.

**Ключевые слова:** сопла жидкостных ракетных двигателей, лазер, лазерная сварка, лазерная наплавка.

Описано складнощі виготовлення великогабаритних соплових блоків за допомогою класичного для української ракетно-космічної промисловості методу високотемпературного паяння. Показано шлях вирішення цієї проблеми, вибраний ДП «КБ «Південне», та перші успіхи в організації нового виробництва з використанням інноваційних технологій лазерного зварювання і наплавлення. Розглянуто поетапну послідовність і порядок проведення науково-дослідних робіт з відпрацювання нової технології виготовлення охолоджуваного соплового блока. Виділено чотири етапи, з яких перші два вже успішно пройдено. Технологія лазерного зварювання та наплавлення дозволить відмовитися від застосування дорогого й унікального устаткування, дозволить скоротити й оптимізувати технологічний цикл виробництва, відмовившись від тривалих та енергоємних технологічних операцій. Науково-технологічні роботи показали принципову можливість зв'язку зовнішньої оболонки із внутрішньою стінкою соплового блока за допомогою лазерного зварювання. Виготовлені дослідні зразки підтвердили високі міцнісні характеристики, що були попередньо одержані за допомогою теоретичних розрахункових методів. Ділянки, одержані наплавленням, демонструють якісний металургійний зв'язок між шарами. На дослідних зразках відпрацьовано методику, що дозволяє ремонтувати дефектні зони у зварному шві, який було одержано за допомогою методу лазерного зварювання. Цей момент особливо важливий з технологічної й економічної точок зору, тому що технологія високотемпературного паяння, яку використовують зараз, не дозволяє гарантовано ремонтувати паяні з'єднання.

**Ключові слова:** сопла рідинних ракетних двигунів, лазер, лазерне зварювання, лазерне наплавлення.

The article describes the problems of manufacturing large-size nozzle blocks by classical for Ukrainian space industry method of high-temperature brazing. The Yuzhnoye SDO-selected way of solving this problem and the first strides on the way to organization of new production using innovative technologies of laser welding and surfacing are presented. The step-by-step sequence and procedure of research work to develop and test a new technology of cooled nozzle block manufacturing are described. Four phases are identified, out of which the first two phases have already been successfully performed. The laser welding and surfacing technology will allow avoiding the use of costly and unique equipment and will allow reducing and optimizing the technological manufacturing cycle rejecting the long-term and energy-consuming technological operations. The scientific-and-technological works performed showed the principle feasibility of making connection between the external jacket and internal wall of a nozzle block using laser welding. The test samples manufactured confirmed the high strength characteristics, which had been preliminary obtained by the theoretical calculation methods. The sections obtained by surfacing demonstrate good metallurgical

connection between the layers. On the test samples, the technique was tried-out allowing repairing defect areas in a welded seam obtained by laser welding method. This is especially important from the technological and economic viewpoints, as the technology of high-temperature brazing applied currently does not allow making guaranteed repair of brazed joints.

**Key words:** liquid rocket engine nozzles, laser, laser welding, laser surfacing.

## Введение

В настоящее время в мире производить ЖРД больших тяг для первых ступеней ракет-носителей имеют возможность весьма ограниченное количество стран. А рынок требует большего числа предложений по двигателям первых ступеней.

Современные маршевые двигатели первых и вторых ступеней, имеющие высокие технические характеристики и большой спрос на мировом рынке, должны оснащаться камерами с большой степенью расширения сопел, что, в свою очередь, приводит к большим габаритам сопловых блоков. ГП «КБ «Южное» взялось решить проблему изготовления крупногабаритных сопловых блоков с использованием лазерных технологий сварки и наплавки. Кроме того, для успешной конкуренции необходимо снижать стоимость изготовления двигателей. А это практически невозможно без внедрения новых технологий.

## Отработка новой технологии изготовления охлаждаемых сопловых блоков

Охлаждаемые сопловые блоки имеют специфические конструктивные особенности: для минимизации массы конструкции и обеспечения надежного охлаждения используются тонкостенные (толщиной 1 мм и меньше) оболочки, в процессе изготовления газодинамический профиль сопла должен сохранять свою конфигурацию, наружная и внутренняя оболочки должны иметь прочные связи, не мешающие охлаждению, способные обеспечить прочность при давлении в охлаждающем тракте до 700 бар.

Традиционная технология изготовления охлаждаемых сопловых блоков основана на использовании высокотемпературной пайки в индукционных печах. Данная технология требует применения высокоточного оборудования для механической обработки, специфического оборудования для нанесения многослойных технологических покрытий для осуществления пайки, высо-

кой квалификации исполнителей при сборке под пайку. Печи для высокотемпературной пайки сложны и уникальны, применение их практически ограничено потребностями аэрокосмической отрасли. Кроме того, по общепринятому утверждению специалистов по пайке, пайка – трудноуправляемый процесс, появление брака при серийном изготовлении и использовании даже отработанной технологии – нередкое явление. При изготовлении паяных узлов для контроля качества параллельно применяются различные методы (радиографический контроль на наличие инородных тел, испытания на прочность и герметичность, пролив на равномерность, голографический контроль, ультразвуковой контроль и др.). Указанные проверки помогают выявить брак, однако, по опыту, попытка устранения дефектов пайки сопловых блоков при помощи повторной пайки в подавляющем случае не приводит к положительному результату. Геометрические размеры камер ЖРД новых разработок выходят за пределы возможностей существующего, к тому же сильно изношенного, оборудования. Поэтому при проведении проектных проработок и планировании подготовки производства для изготовления новых крупногабаритных сопловых блоков появилась актуальная задача – поиск и обоснование альтернативных технических решений и (или) технологий. Если, например, разделить крупногабаритный сопловой блок на несколько сегментов, то возможно использование пайки для изготовления отдельных сегментов «сэндвичей» (сложнопрофильных панелей с охлаждающим трактом), однако требуется восстановление оборудования и длительная технологическая отработка процесса пайки «сэндвичей». При этом появляется новая, требующая специальной технологической отработки, операция – сварка сегментов между собой, обеспечивающая стабильную конфигурацию сопла в целом, но остаются, и даже усугубляются, все выделенные ранее недостатки процесса пайки.

На данный момент в Украине отсутствуют производители печей для высокотемпературной пайки крупногабаритных сопловых блоков. Поиск возможного изготовителя данного оборудования в Украине, учитывая высокие специфические требования, выдвигаемые для данного типа оборудования (рабочая температура до 1250°C, наличие защитной среды аргона с избыточным до 5 бар давлением в печи, требуется вращение узла в процессе пайки, обеспечение вакуума в паяемом узле, программируемые скорости нагрева и охлаждения, предпочтительно индукционный тип нагрева, диаметр рабочего пространства ≈ 2 м при длине до 5 м), не дал положительных результатов.

Кроме того, сопутствующими технологиями для пайки являются многочисленные операции химической и электрохимической обработки, гальваническое нанесение технологических покрытий (никелирование и т.д.), пескоструйная обработка, нанесение лент припоя. Нанесение лент припоя – кропотливый, длительный ручной труд, при котором возможны ситуации с появлением ошибок исполнителя. Химическое гальваническое никелирование требует крупногабаритных ванн с мощными источниками тока, а также множество ванн для подготовки никелирования (травление, пассивация, активация и т.д.) – порядка двух десятков ванн.

Из открытых источников литературы известна принципиальная возможность применения сварки для изготовления охлаждаемых сопловых блоков\*.

Сложности, неизбежно возникающие при организации производства крупногабаритных сопловых блоков двигателей больших тяг традиционным методом пайки, послужили основанием для ГП «КБ «Южное» начать разработку инновационной для украинской промышленности технологии изготовления охлаждаемых сопловых блоков при помощи лазерной сварки.

Внедрение лазерной сварки в технологический процесс изготовления сопловых блоков камер ЖРД позволит освоить но-

вую перспективную технологию изготовления сопел без использования печной пайки. В крупногабаритных сопловых блоках суммарная длина сварных швов может достигать 1000...1500 м. Высокая плотность энергии позволяет поднять скорость сварки на один-два порядка до 8-10 м/с, что решает одну из главных организационно-технических проблем, присущую процессу изготовления крупногабаритных сопловых блоков – весьма продолжительное время технологического цикла. Внедрение лазерной сварки в перспективе повысит технологичность и рентабельность производства.

Учитывая важность создания ЖРД больших тяг, ГП «КБ «Южное» совместно с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины начали отработку новой технологии получения охлаждаемых сопловых блоков: соединение тонкостенных рубашек с внутренними стенками с использованием лазерной сварки прорезным сварным швом по вершинам ребер.

Была предложена и начала реализовываться методика проведения работ, включающая четыре этапа. На первом этапе необходимо было подтвердить принципиальную возможность получения сварных оболочек с требуемыми прочностными характеристиками. На втором этапе требовалось провести отработку режимов сварки на стандартных образцах, определить механические характеристики полученных сварных соединений. На третьем этапе планировалось изготовить по новой технологии малогабаритный сопловой блок и провести комплексные прочностные испытания в условиях, максимально приближенных к натурным. По результатам работ третьего этапа предполагалось уточнить состав и характеристики оборудования и создать на территории КБЮ новый участок лазерных технологий, на котором в рамках четвертого этапа отработать сварку крупногабаритного охлаждаемого соплового блока.

На первом этапе работа была проведена на четырех плоских образцах-имитаторах тракта охлаждения сопла ЖРД с наиболее характерными параметрами оребрения (рис. 1). Образец представляет из себя оребренную стенку из стали 12X18H10T и тонкостенную рубашку из стали 12X21H5T.

\* Rydén R. The Volvo Aero laser welded sandwich nozzle for booster engines// IAC-04-IAF-3-S.3.07



Рис. 1. Стенка плоского образца

Стенка с рубашкой были собраны и при помощи ручной аргонодуговой сварки обварены по периметру. Для обеспечения плотного прилегания свариваемых деталей (наружной рубашки к ребрам внутренней стенки), гарантированного отсутствия зазора по всей длине ребер, удобства позиционирования при выполнении швов лазерной сваркой и большей жесткости наружной рубашки (исключение поперечного сдвига) было принято решение придать рубашке гофрированную форму. Формирование гофр было обеспечено выполнением ложной пайки образцов (термическое воздействие на режиме пайки с вакуумированием тракта и созданием внешнего избыточного давления 0,05 МПа). Жесткость, создаваемая гофрами, необходима для начального обеспечения минимального зазора и сохранения этих зазоров в процессе выполнения сварки (рис. 2).



Рис. 2. Плоский образец после ложной пайки, до выполнения лазерной сварки

После подготовки на ГП «КБ «Южное» образцы были сварены в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

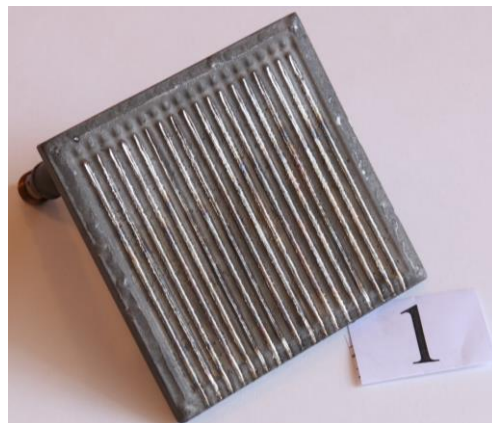


Рис. 3. Плоский образец после лазерной сварки

Образцы после сварки (рис. 3) были испытаны на прочность и герметичность. Результаты показали высокую прочность сварных соединений – давление разрушения более  $700 \text{ кгс/см}^2$  (согласно предварительно выполненному расчету предельное значение давления разрушения для данного образца составляет  $\approx 700 \text{ кгс/см}^2$ ). Учитывая тот факт, что работа по изготовлению образцов и их сварке проводилась без требуемой в подобных случаях технологической подготовки и специализированной технологической оснастки (на инициативной основе ГП «КБ «Южное», без заключения договора с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины), результаты испытаний оцениваются как весьма успешные, показывающие принципиальную возможность получения трактов охлаждения методом лазерной сварки. Следует отметить, что сварной шов, соединяющий рубашку со стенкой, является ремонтпригодным, так как имеется возможность повторения сварки в дефектных местах. Выявление дефектных мест необходимо проводить с использованием неразрушающих методов контроля, например голографическим методом. Исправление дефектов может осуществляться повторным проходом лазерного излучения или местной подваркой (при необходимости с присадочным материалом). Возможности ремонта сварных соединений сопловых блоков дают огромное преимущество по сравнению с пайкой. Паяные швы, как показывает опыт, практически не ремонтируются.

Так как для сварного шва, выполняемого за один проход и на одном технологическом режиме лазерной сваркой, существуют определенные ограничения по изменению толщины свариваемого материала

рубашки, то становится очевидным: сварку соплового блока в местах утолщений рубашки (подколлекторное кольцо, утолщения для элементов общей сборки двигателя, утолщения под штуцера, утолщения в местах соединения с сопловыми секциями – для соединительных накладок) выполнить невозможно. Так появилась идея выполнения необходимых для конструкции сопловых блоков утолщений по технологии лазерной наплавки с применением присадочного материала в виде порошка.

Таким образом, по результатам работ первого этапа определились контуры новой альтернативной технологии получения сопловых блоков, которая включала следующие операции: сборка и подготовка деталей под сварку (ложная пайка); соединение прорезным лазерным швом внутренней стенки и рубашки по вершинам ребер; создание утолщений на рубашке при помощи наплавки лазерной сваркой. После получения подтверждения принципиальной возможности осуществления металлургической связи рубашки со стенкой при помощи лазерной сварки были развернуты полномасштабные научно-исследовательские работы по отработке технологии лазерной сварки и наплавки. С целью выполнения данной задачи был заключен договор с ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». ГП «КБ «Южное» приобрело специальное сварочное оборудование (робот, головка для лазерной наплавки и т. п.) и поставило его на ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» для использования в опытно-технологических исследовательских работах. После завершения отработки технологии лазерной сварки и наплавки на ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» данное оборудование послужит основой для создания нового производ-

ственного специализированного участка лазерных технологий на территории ГП «КБ «Южное».

Исследования были начаты с отработки режимов лазерной сварки и наплавки на стандартизированных образцах тавровых соединений (рис. 4). Образец представляет из себя тонкостенную полку тавра из стали 12Х21Н5Т и тонкостенное ребро тавра из стали 10Х18Н10Т с размерами согласно международному стандарту ISO 15614-11.

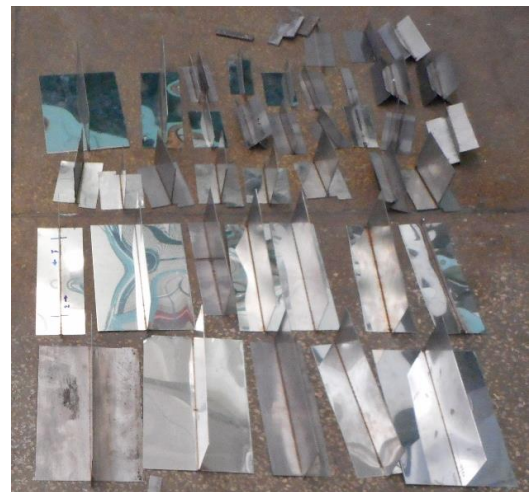


Рис. 4. Образцы тавровых соединений, сваренные лазерной сваркой

Был опробован 131 вариант технологических режимов сварки. По результатам радиографического и визуального контроля, металлографических исследований и механических испытаний был выбран режим технологической сварки, при котором параметры сварного соединения (геометрические размеры, механические свойства и т. д.) соответствовали заданному.

Результаты механических испытаний приведены в таблице.

По результатам испытаний расчетом определен предел прочности соединения, приведенный к сечению ребра.

Результаты испытаний образца на одноосное статическое растяжение образца таврового сварного соединения, выполненного на выбранном технологическом режиме сварки

№	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм	Усилие разрушения, Н	Предел прочности, МПа	Место разрушения
1	25,4	1,1/1,2	20365	668,14	По ребру
2	24,3	1,1/1,2	20327	697,09	По ребру
3	24,9	1,1/1,2	21942	734,34	По ребру
4	25,3	1,1/1,2	20433	673,02	По ребру
5	25,2	1,1/1,2	19796	–	По шву

В большинстве случаев разрушение происходило по основному материалу (рис. 5).



Рис. 5. Образец таврового соединения после испытания на одноосное статическое растяжение

Исследования на плоских тавровых образцах показали, что механические свойства полученных сварных соединений удовлетворяют требованиям стандартов ISO и ГОСТ, предъявляемым к сварным соединениям, полученным сваркой плавлением.

Дефектные участки полученных сварных соединений могут быть отремонтированы с применением технологий лазерной обработки. Данный аспект является значительным преимуществом лазерной сварки сопел перед пайкой. Дефектный паяный шов не доступен для непосредственного оперативного вмешательства. Существующие методы ремонта паяного шва зачастую не эффективны. Крупная дорогостоящая паяная секция сопла в случае возникновения критического дефекта пайки списывается в утиль, тогда как при использовании лазерной сварки ее можно отремонтировать.

Выполнение операции ремонта по разработанной методике позволяет устранить несплошность в сварном соединении, сформировать галтели по обеим сторонам ребра, сформировать необходимое усиление верхнего валика шва (рис. 6 и 7).



Рис. 6. Общий вид сварного соединения без ремонтной сварки

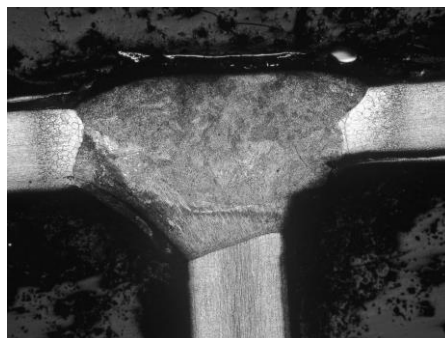


Рис. 7. Общий вид сварного соединения после ремонтной сварки

На следующем этапе исследований была отработана технология лазерной наплавки конструктивных элементов в виде поясов и бобышек разных размеров. Результаты металлографических исследований образцов после лазерной наплавки показывают, что полученные наплавленные слои имеют хорошую металлургическую связь с основным металлом (рис. 8, 9).



Рис. 8. Образец после лазерной сварки и наплавки

Установлено, что наплавленные слои можно при необходимости ремонтировать, они хорошо механически обрабатываются и позволяют выполнять дальнейшие операции по присоединению соответствующих деталей к наплавленным слоям путем применения аргонодуговой сварки.



Рис. 9. Поперечное сечение образца с полосой наплавки

Следующим этапом исследований стало определение критериев качества подготовки под сварку и проверка влияния возможных отклонений (дефектов), неизбежно возникающих на производстве, на качество выполнения сварных швов, а также проведение ресурсных испытаний на малоцикловую устойчивость.

Были проверены:

1) влияние близкорасположенных сварных швов друг на друга (рис. 10);

2) влияние зазора между рубашкой и стенкой на формирование сварного шва. Как видно из рис. 11, наличие зазора перед лазерной сваркой приводит к непровару по всей ширине ребра и, как следствие, к образованию концентраторов напряжений (отсутствие галтелей) и увеличению ширины неподкрепленного участка (снижение прочности соединения);

3) возможность выполнения качественного сварного шва на рубашке переменной толщины;

4) возможность качественной сварки в зоне прерывания ребра под рубашкой;

5) малоцикловая усталость (50 циклов нагружения с частотой 1 Гц и усилием 50% значения, полученного при статических испытаниях на прочность контрольного образца до разрушения).

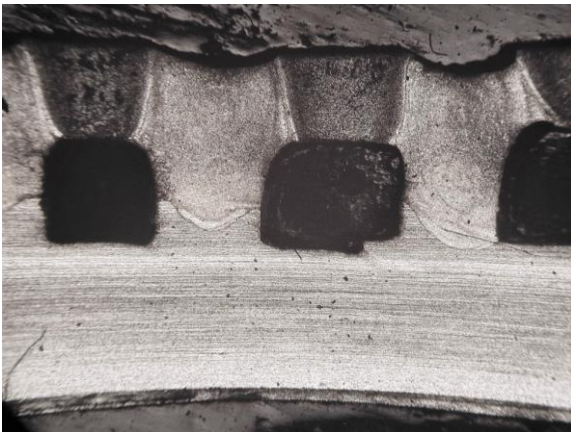


Рис. 10. Поперечное сечение образца с малой шириной канала

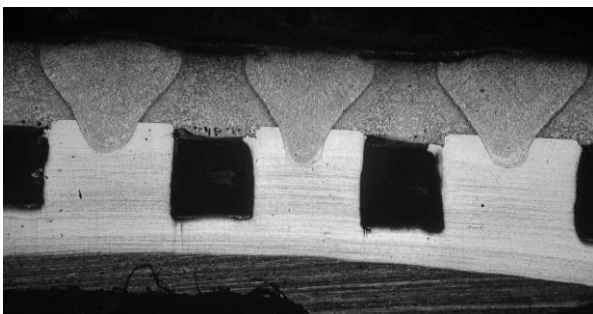


Рис. 11. Поперечное сечение образца с зазором между ребрами и рубашкой до сварки

Результаты исследования возможных дефектов будут использованы в дальнейшем на этапе отработки лазерной сварки и наплавки на малогабаритных сопловых блоках.



Рис. 12. Орбренная фрезерованная внутренняя стенка



Рис. 13. Внутренняя стенка с рубашкой, собранные под ложную пайку



Рис. 14. Образец малогабаритного соплового блока после ложной пайки

При использовании нового оборудования и специально спроектированной и изготовленной технологической оснастки будут проведены сварка и наплавка двух малогабаритных сопловых блоков и ряд комплексных проверок, позволяющих оценить качество сопловых блоков, изготовленных по новой инновационной технологии – лазерной сварки и наплавки.

Результат работ по сварке малогабаритных сопловых блоков даст ответ на вопрос о возможности воспроизведения данной технологии для изготовления крупногабаритных сопловых блоков для камер ЖРД, что позволит уйти от ранее используемой дорогостоящей технологии пайки. При этом выполнение ложной пайки возможно в широко распространенных печах для термической обработки.

На ГП «КБ «Южное» были подготовлены два образца малогабаритных сопловых блоков. Конструктивно образцы состоят из оребренной фрезерованной внутренней стенки и рубашки постоянной толщины в зоне выполнения лазерной сварки и наплавки (рис. 12 – 14).

При проектировании малогабаритных сопловых блоков были внедрены конструктивные и технологические решения, позволяющие успешно разрешить проблемы, возникающие при динамическом позиционировании лазерного луча относительно ребер в процессе сварки.

На четвертом этапе планируется внедрение технологии лазерной сварки и наплавки в технологический процесс изготовления крупногабаритных сопловых блоков с диаметром на срезе до 2000 мм.

### **Заключение**

Первые результаты исследований по лазерной сварке и наплавке на образцах показали принципиальную возможность разработки и целесообразность дальнейшего внедрения новой технологии для изготовления охлаждаемых оребренных конструкций крупногабаритных сопловых блоков, производство которых будет налажено на ГП «КБ «Южное».

Статья поступила 09.08.2018