



СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В ГАЗОТУРБОСТРОЕНИИ (Обзор)*

В. В. РОМАНОВ, канд. техн. наук, **Ю. В. БУТЕНКО**, инж.
(ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект», г. Николаев)

Рассмотрены современные разработки газотурбинных установок и промышленное применение прогрессивных сварочных и родственных технологий — электронно-лучевой сварки, лазерной резки, вакуумной пайки, наплавки и др.

Ключевые слова: технологии сварки, газотурбинные установки, новые материалы, дуговая сварка, лазерная резка, электронно-лучевая сварка, электрошлаковая сварка, плазменно-порошковая наплавка, вакуумная пайка

Южный турбинный завод (ныне ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект») создан в начале 1950-х годов с целью разработки и серийного производства газотурбинной техники для боевых кораблей Военно-Морского Флота СССР. В начале 1979 г. предприятием было освоено серийное производство газовых турбин для перекачки природного газа и выработки электроэнергии на передвижных и стационарных электростанциях.

В ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» накоплен огромный опыт создания газотурбинных установок (ГТУ) различного назначения — для привода компрессоров природного газа, энергетики и судовых энергетических установок.

За более чем пятидесятилетнее существование предприятием в конструкторском бюро разработаны 56 типов и модификаций газотурбинных двигателей (ГТД), 38 типов различных редукторных передач, на базе которых созданы более 70 типов газотурбинных агрегатов, которые находились и находятся на вооружении военно-морских сил стран СНГ и ряда стран дальнего зарубежья. Изготовлено свыше 1700 судовых ГТД, которыми к началу 1990-х годов оснащено около 65 % надводных кораблей Военно-Морского Флота СССР. Общая мощность установленных на судах двигателей достигает 17 млн л. с., а их наработка — 3 млн ч.

В настоящее время в эксплуатации на компрессорных станциях находится более 800 ГТУ производства ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект», суммарная наработка которых составляет более 75 млн ч. Предприятие продолжает активно ра-

ботать в направлении совершенствования существующих и создания перспективных ГТУ для газоперекачивающих агрегатов. Одним из перспективных проектов стало создание ГТУ регенеративного цикла номинальной мощностью 16 МВт с КПД более 40 % для привода газоперекачивающих агрегатов.

ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» активно работает над созданием ГТД промышленного типа для энергетики. Отличительными конструктивными особенностями таких двигателей являются двухопорная конструкция ротора, отсутствие газодинамически обособленной (свободной) турбины генератора, высокая (до 500...550 °С) температура газов на выходе из двигателя, возможность ее поддержания на режиме частичной нагрузки за счет регулирования расхода воздуха на входе в двигатель.

В ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» создана энергетическая ГТУ промышленного типа ГТЭ-110 номинальной мощностью 110 МВт с КПД 36 %. На базе этой установки разработаны проекты парогазовых установок (ПГУ) номинальной мощностью 160 и 325 МВт соответственно с КПД 50,2 и 51,5 %.

Изготовлены образцы энергетических установок ГТЭ-45(60) и UGT5000 номинальной мощностью соответственно 60 и 5 МВт, установка ГТЭ-45(60) предназначена для использования в «большой» энергетике в составе ПГУ, а UGT5000 — в составе когенерационных установок.

По сравнению с разработанными ранее установкой UGT5000 имеет ряд принципиальных отличий. Поэтому конструкторы, технологи и производственники решают вопросы, с которыми ранее никогда не сталкивались.

Для изготовления современных ГТД (рис. 1) используют различные материалы — низко- и высоколегированные (жаростойкие и жаропрочные) стали, титановые сплавы, никелевые деформируемые и литейные дисперсионно-твердеющие сплавы. Применение высоколегированных жаростойких и жаропрочных сплавов, а также широкое использование при изготовлении двигателей сва-

*Публикуется по материалам доклада, представленного на научно-технической конференции, состоявшейся в Национальном университете кораблестроения им. Адмирала Макарова 14–17 окт. 2009 г.

рочных и родственных технологий обеспечили получение высоких технических характеристик ГТД при минимальных массогабаритных характеристиках.

ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» освоены современные технологии лазерной резки, электронно-лучевой сварки (ЭЛС) и электрошлаковой сварки (ЭШС), наплавки, вакуумной пайки и других процессов.

Лазерная резка тонколистового (до 12 мм) материала осуществляется лазерным комплексом «Байстар-3015-3» фирмы «Байстрионик», который состоит из CO_2 -лазера выходной мощностью 3 кВт с высокочастотной накачкой, портала с высокоскоростными приводами, двух рабочих сменных столов для листов размером 1,5×3,0 м, компьютерного блока управления процессом резки и слежения за составом рабочей смеси, блока газовых баллонов для создания рабочей смеси, блока охлаждения лазера с автоматическим поддержанием заданной температуры, блока отсоса из зоны резки аэрозолей и возвращения очищенного воздуха обратно в помещение, блока загрузки листов и снятия вырезанных деталей; имеется также блок вырезки фигурных отверстий на трубах диаметром до 200 мм.

Для генерирования лазерного излучения используют газы высшего сорта — азот технический, диоксид углерода и гелий, а в качестве режущего газа — кислород. При этом обрабатываемые листы должны быть плоскими, гладкими и чистыми.

В настоящее время номенклатура вырезаемых деталей насчитывает много тысяч наименований. Вырезанные лазером детали не требуют механической обработки.

Наиболее широкое распространение при изготовлении статорных и роторных узлов получила ЭЛС. Это обусловлено прежде всего тем, что такой способ сварки сочетает в себе высококонцентрированный источник нагрева и наиболее совершенное средство защиты расплавленного металла — вакуум. Указанные особенности ЭЛС позволяют сваривать с минимальными деформациями легированные, аустенитные и мартенситные стали, никелевые и титановые сплавы толщиной до 100 мм без разделки кромок и использования присадочной проволоки.

Участки ЭЛС созданы на опытно и серийном производстве ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» при сотрудничестве с ИЭС им. Е. О. Патона. Вакуумные камеры и механизмы перемещения разработаны и изготовлены силами предприятия. Для генерации электронного пучка используют энергоблоки У-250А, ЭЛА-15, ЭЛА-30, ЭЛА-60/60, ЭЛА-60Б. Создан типоразмерный ряд установок, позволяющих обеспечить сварку статорных узлов от пакетов лопаток до крупногабарит-

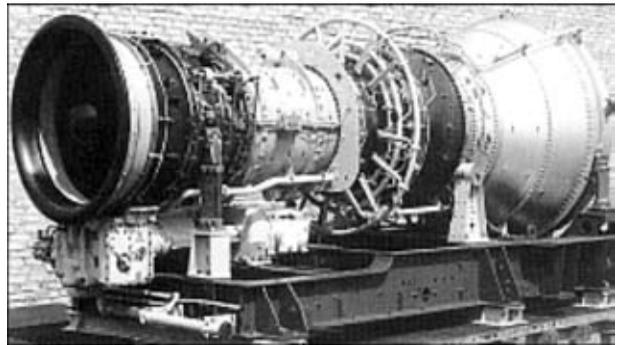


Рис. 1. Внешний вид ГТД ДН-80

ных узлов диаметром 3,5 м, а также валов и барабанов роторов.

Участок серийного производства оснащен устройством «Проток-10» для размагничивания узлов перед сваркой и необходимой контрольно-измерительной аппаратурой. Указанные участки расположены в непосредственной близости друг от друга, что позволяет оперативно решать возникающие проблемы.

В настоящее время с помощью ЭЛС выполняют около 70 % объема сварочных работ на узлах ГТД, без нее уже немислимо изготовление этих двигателей. Это позволило проектантам газовых турбин разработать и внедрить в серийное производство ряд принципиально новых сварочных конструкций — роторов компрессоров низкого (КНД) и высокого (КВД) давлений, шестерен центральных приводов, валов КВД из материалов ВТ31, ВТ8, ВТ9, ЭП 609, ЭП 517.

Применение новых материалов (ЭП 609Ш, ЭП 866, ЭП 517) для изготовления узлов с большой толщиной стенок потребовало коренного пересмотра технологических приемов ЭЛС. Совместно с ИЭС им. Е. О. Патона проведены работы по созданию, освоению и внедрению систем управления лучом (СУ-65, СУ-29, СУ-259). Внедрен новый технологический процесс — ЭЛС с горизонтально расположенной пушкой с вращением электронного пучка по заданной программе. Все это позволило решить проблему сварки узлов с толщиной стенок до 70 мм.

Жаровые трубы из сплава ЭИ 602 двигателей второго поколения (толщина стенки $\delta = 2,5$ мм) и из сплава ВЖ 98 двигателей третьего поколения ($\delta = 1,5$ мм) являются одними из самых «напряженных» элементов, поскольку работают в условиях воздействия высоких термических и вибрационных нагрузок и определяют ресурс жарового узла. Попытки выполнить соединения с помощью аргонодуговой сварки (АДС) к успеху не привели — в корне шва образовывалась хрупкая пленка, способствующая возникновению продольных трещин. Исследования нахлесточных соединений тонкостенных обечаек, полученных ЭЛС, подт-



Рис. 2. Макрошлиф нахлесточного соединения обечаяк жаровых труб, полученного ЭЛС

вердили эффективность этой технологии. Разработан способ ЭЛС жаровых труб с применением развертки электронного пучка специально созданным генератором. Путем подбора амплитуды, частоты и скважности колебаний электронного пучка удалось получить равномерное проплавление в нахлесточном соединении обечаяк жаровой трубы шириной до 8 мм (рис. 2). На рис. 3 представлен внешний вид жаровой трубы, изготовленной с применением ЭЛС.

В структуре металла границы сплавления обечаяк оксидные пленки и другие дефекты отсутствуют. На макрошлифах поперечного сечения шва видно, что при ЭЛС длина зоны термического влияния составляет 1,5...2,5 мм, тогда как при АДС она равна 10...12 мм. Ширина зоны теплового контакта нахлесточного соединения увеличилась в 2...3 раза. ЭЛС жаровых труб позволила продлить срок службы изделий в 4...6 раз.

Сопловые лопатки ГТД работают в особо тяжелых условиях и испытывают воздействия термических и динамических нагрузок, изгибающего и крутящего моментов, а также солевой и сульфидной коррозии, они подвержены также эрозионному износу. Получить качественные соединения сплавов ЭП 539ЛМ, ЧС 70Л, ЭК 9Л, ЧС 104, применяемых для сопловых лопаток корабельных газовых турбин, с помощью дуговых способов сварки не представлялось возможным в связи с низкой технологической прочностью этих сплавов.

На основании результатов экспериментальных исследований определены пути повышения технологической прочности и основные условия получения бездефектных сварных швов пакетов лопаток сопловых аппаратов из сплавов ЭП 539ЛМ, ЭК 9Л и других



Рис. 3. Внешний вид жаровой трубы (сплав ЭИ 602, $\delta = 2,5$ мм) с пятью кольцевыми швами, выполненными ЭЛС

материалов, выполненных способом ЭЛС на форсированных режимах с применением модуляции электронного пучка (рис. 4). Проведенные на двигателях испытания показали высокую надежность сварных соединений пакетов лопаток сопловых аппаратов.

Роторы компрессоров КНД и КВД с частотой вращения 20000 об/мин при высоком давлении являются особо ответственными узлами компрессоров. Сварная конструкция ротора без закрытых полостей в осевом направлении, в которой диски соединены не штифтами, а ЭЛС, более надежна в эксплуатации и технологична в изготовлении. Поскольку диски на сварку поступают с окончательно обработанными пазами, то трудность изготовления ротора заключается в получении после сварки минимального радиального и торцевого биения узла, не превышающего 0,3 мм.

Для получения узла требуемых размеров сварку и последующую термофиксацию роторов осу-

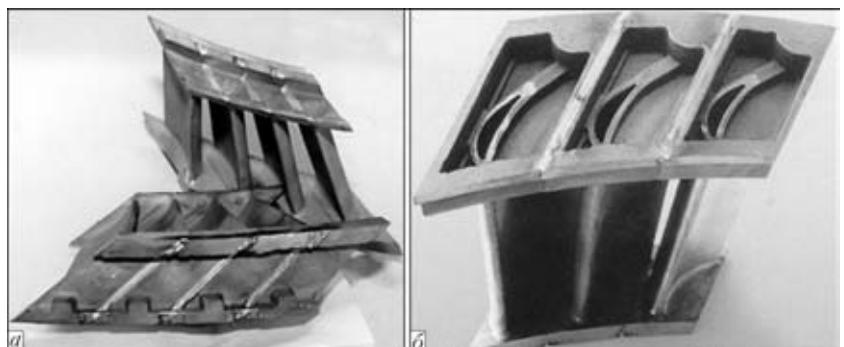


Рис. 4. Пакеты лопаток из сплава ЭК 9Л сопловых аппаратов I ступени после ЭЛС по малой полке (а) и II ступени после ЭЛС по большой полке (б)

ществляют в специально разработанных приспособлениях, которые жестко фиксируют каждый диск по внутренним диаметрам полотен. Соединение дисков выполняют на центрирующей подложке толщиной 5...8 мм. После сварки узел подвергают термообработке для снятия внутренних напряжений и улучшения пластических свойств сварных соединений, а подложку срезают для удаления дефектов в корне шва.

Создание цельносварных роторов газовых турбин из титановых сплавов ВТ31, ВТ8, ВТ9 и сплавов ЭП 609, ЭП 517 способом ЭЛС (рис. 5) является существенным достижением сварочной техники. Испытания сварных роторов, проведенные на стендах и двигателях, показали их высокую работоспособность.

Для изготовления некоторых узлов ГТД необходимы материалы, сочетающие высокую прочность и пластичность, жаропрочность и жаростойкость, горячую твердость и термостойкость в условиях эксплуатации, близких к предельным. Объединить все эти требования в одном материале невозможно. Поэтому разрабатывают изделия, отдельные части которых состоят из различных материалов, наиболее соответствующих условиям эксплуатации. Соединить эти разнородные материалы в одном изделии можно с использованием технологии вакуумной пайки либо пайки в муфеле с проточным аргоном.

ГП НПКП «Зоря»–«Машпроект» освоена технология вакуумной пайки воздушных и топливных фильтров, клеммников, сотовых и металлокерамических уплотнителей, пакетов лопаток спрямляющих аппаратов, обойм, корпусов воспламенителей, штуцеров горелочных устройств и др. Отличные результаты получены при исправлении дефектов литья из жаропрочных никелевых сплавов пайкой, технология которой разработана совместно с Национальным университетом кораблестроения им. Адмирала Макарова (рис. 6).

В производстве используют высокотемпературный порошковый припой ВПр11-40Н и припой собственного изготовления НС-12, НС-12А. Кроме порошковых припоев, применяют фольгированные припои ВПр-4 и ВПр-7. В зависимости от типа припоя температура пайки составляет 1050...1180 °С.

Как в основном, так и в опытном производстве созданы специализированные участки, обеспеченные необходимым вакуумным оборудованием, приспособлениями и оснасткой.

В газотурбостроении необходимо сваривать также детали большого сечения. Например, кольца спрямляющих аппаратов, фланцы КНД, КВД изготавливают из сталей мартенситно-ферритного класса с использованием кованных полуколец с площадью поперечного сечения до 14500 мм².

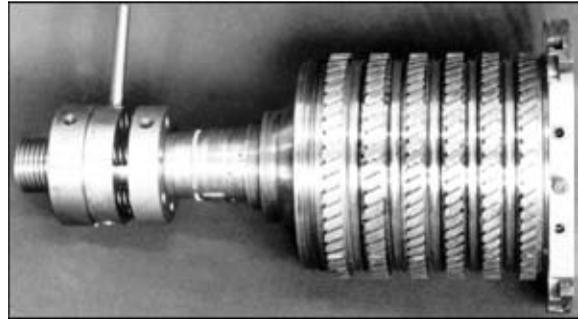


Рис. 5. Внешний вид цельносварного ротора КВД из титанового сплава ВТ31

Практически все узлы, в которых используются кольца, работают при высоких нагрузках и повышенных температурах, поэтому сварные соединения полуколец должны иметь эксплуатационные свойства не ниже уровня основного материала.

Для изготовления полуколец из сталей 20Х13, ЭП 609Ш, ЭИ 961Ш и других марок применяли механизированную сварку в диоксиде углерода ванным способом, однако неоднократные исправления дефектов сварных швов увеличивают затраты на изготовление детали. С целью повышения качества сварки кованных полуколец на предприятии внедрена технология ЭШС. Некоторые особенности ЭШС не позволяли ранее применять данную технологию, поскольку необходимо было создавать технологический «карман» для начала электрошлакового процесса, устанавливать выводные пластины для наварки «прибыли» в конце сварки, применять медные водоохлаждаемые пластины для формирования боковых поверхностей шва.

В результате поисковых работ подготовку деталей к сварке удалось упростить. Введение предварительного подогрева до 500...600 °С позволяет перейти с дугового процесса на электрошлаковый уже на втором проходе, поэтому при наличии припусков необходимость в технологическом кармане отпала.

Усадочная рыхлость в конце сварки достигнута благодаря операции, аналогичной заварке кратера при дуговой сварке. На завершающем этапе останавливается движение сварочной головки, плавно снижаются до нуля сварочный ток и подача проволоки. Таким образом, в наварке «прибыли» нет необходимости.

Вместо медных формирующих пластин, требующих в каждом конкретном случае подгонки свариваемых кромок, используют керамические на основе Al₂O₃. Такая керамика выдерживает температуру жидкой ванны и не переходит в шов благодаря наличию тонкого слоя шлака между ней и металлом жидкой ванны. Легкая обрабатываемость керамических пластин и возможность



Рис. 6. Внешний вид деталей и изделий, полученных пайкой: *a* — воздушные и топливные фильтры, клеммники датчика; *б* — лопатки сопловых аппаратов, обоймы поворотных лопаток, корпуса воспламенителей; *в* — пакеты и лопатки сопловых аппаратов после исправления поверхностных дефектов литья; *г* — сотовые и металлокерамические уплотнители

приклеивать их в зоне стыка смесью жидкого стекла с глиноземом делают этот материал удобным заменителем медных пластин, особенно при их большой разнотолщинности.

Сварку мартенситно-ферритных сталей выполняют сварочной проволокой ЭП 609Ш диаметром 4 мм с использованием флюса АН-348А. Химический состав металла шва соответствует требованиям ТУ 14-1-2412-78, механические свойства металла шва и ЗТВ выше аналогичных показателей основного металла.

Ресурс двигателя определяется продолжительностью работы наиболее «ослабленного» узла или детали. Узлы и детали высокотемпературного тракта работают в тяжелых условиях. К числу наиболее нагруженных деталей, определяющих ресурс современных ГТД, относятся рабочие лопатки турбины.

Для рабочих лопаток ГТД в основном применяют жаропрочные сплавы ЧС 70, ЧС 88ВИ, ЧС 88У-ВИ на основе никеля, содержащие хром, вольфрам, молибден, титан, алюминий, бор и другие элементы. Высокая жаропрочность указанных сплавов, обусловленная наличием сложного легированного твердого раствора и максимальным содержанием упрочняющей фазы, сочетается с их удовлетворительной технологичностью. Жаропрочные свойства сплава в значительной степени зависят от его структурного состояния, размера зерна, формы и дисперсности упрочняющих фаз. В процессе эксплуатации контактные поверхности бандажных полок и торцов рабочих лопаток изнашиваются. Уменьшение высоты лопаток способствует осевому перетеканию газа, при этом КПД двигателей снижается на 1,5...3,5%. Появление выработки приводит к образованию зазоров и росту уровня вибрационных нагрузок, что может вызвать поломку лопатки и выход из строя всего двигателя. Срок эксплуатации рабочих лопаток оп-

ределяется степенью износа контактных поверхностей бандажных полок и торцов. Однако несмотря на износ перо лопатки и замок сохраняют свою работоспособность и при упрочнении могут выдержать 3–4 срока эксплуатации. Кроме того, изношенные ранее упрочненные поверхности можно восстанавливать несколько раз.

Согласно существовавшей ранее технологии упрочнение торцов и бандажных полок рабочих лопаток ГТД выполняли наплавкой стеллита дугой в среде аргона неплавящимся электродом. Главными недостатками этой технологии были образование трещин в зоне наплавки (стеллит-основной металл) и неравномерность распределения твердости наплавленного стеллита по площади торца либо бандажной полки лопатки.

По новой технологии из пластифицированного жаропрочного материала КБНХЛ-2 изготавливают электроды трапециевидальной формы (3×2×2×260 мм) в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16-ИЗ. Наплавку ими осуществляют с помощью кислородно-ацетиленового пламени, используя ручную горелку ГО2 (наконечник № 2) и флюс ПВ-200. Наплавляют торцы рабочих лопаток из сплавов ЧС 70, ЧС 88ВИ, ЧС 88У-ВИ.

Кислородно-ацетиленовая наплавка обеспечивает высокое качество металла без внешних и внутренних дефектов со стабильной твердостью *HRC* 60 по всей площади торца либо бандажной полки рабочей лопатки. В настоящее время пластифицированную смесь жаростойкого материала КБНХЛ-2 изготавливают на предприятии.

Внедрение технологии упрочнения торцов и бандажных полок рабочих лопаток ГТД кислородно-ацетиленовой наплавкой жаростойкого материала КБНХЛ-2 позволило исключить брак, обусловленный возникновением трещин и других дефектов. С помощью данной технологии изготовлено более 180 комплектов электродов и про-

изведено упрочнение торцов и бандажных полок более чем на 1000 рабочих лопаток.

Конструкция ГТД предусматривает крепление жаровых труб фиксаторами. Большинство фиксаторов изготавливают из мартенситно-ферритных сталей 14X17H2 и ЭИ 961, а для новых и более мощных двигателей (например, ДН-80) — из аустенитного сплава на никелевой основе ЭП 648.

Для повышения износостойкости цилиндрические рабочие поверхности фиксаторов наплавляют стеллитом. Выбор материала для наплавки обусловлен высокой температурой эксплуатации деталей (450...600 °С), а также наличием значительных контактных нагрузок на эти поверхности. Основные требования, предъявляемые к наплавленному слою, — это отсутствие трещин (ЛЮМ-А контроль) и сложность наплавки ($HRC \geq 40$).

Ранее на заводе наплавку осуществляли ручной АДС литыми прутками диаметром 3...4 мм. Однако этой технологии присущи серьезные недостатки. Во-первых, при наплавке сталей 14X17H2 и ЭИ 961 часто образуются продольные трещины по всей длине наплавки, переходящие в основной металл. У стеллита и мартенситно-ферритной стали (например, 14X17H2) различные значения термического коэффициента линейного расширения, поэтому при остывании наплавленной детали возникают высокие напряжения, а если в наплавке имеют место поры и включения, то они становятся очагами зарождения трещин. Во-вторых, наплавку деталей выполняют в два слоя для обеспечения требуемой твердости наплавленного слоя, поскольку при АДС происходит интенсивное перемешивание стеллита с основным металлом, в результате чего твердость первого слоя не превышает $HRC 32...35$. Наплавка в два слоя приводит к перерасходу дорогостоящего

стеллита и увеличению трудоемкости изготовления деталей.

В связи с этим взамен аргонодуговой была применена плазменно-порошковая наплавка цилиндрических поверхностей фиксаторов труб на установке УПМ-150Д («Плазма-Мастер Ltd.»). Наплавку осуществляют высокотемпературной сжатой дугой, получаемой в плазматроне с неплавящимся электродом. Диапазон регулирования тока основной дуги составлял 25...150 А. Присадочным материалом является порошок стеллита марки Stellite 12, химический состав которого идентичен стеллиту ПРВ-ВЗКР. В качестве плазмообразующего, транспортирующего и защитного газа используют аргон. Конструкция питателя барабанного типа обеспечивает равномерную и строго дозированную подачу порошка. При плазменно-порошковой наплавке фиксаторов диаметром от 8 до 27 мм возможны меньшие припуски на механическую обработку, вследствие чего наплавка имеет хороший внешний вид.

Внедрение на предприятии технологии плазменно-порошковой наплавки стеллита повысило качество наплавленных деталей и снизило трудоемкость изготовления дорогостоящих изделий.

Освоены также технологии электронно-лучевого напыления жаростойких и теплозащитных покрытий, плазменного напыления и многие другие.

Таким образом, в ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» введены в производство современные сварочные и родственные технологии, обеспечивающие разработку и изготовление высокоэкономичных ГТУ различного назначения, конкурентоспособных на мировом рынке. В настоящее время сварочное производство предприятия способно решать разнообразные технологические задачи любой сложности.

The paper deals with modern developments of gas turbine units and commercial application of advanced welding and related technologies: electron beam welding, laser cutting, vacuum brazing, surfacing, etc.

Поступила в редакцию 18.11.2009