



УДК 621.791.3

ПАЙКА ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ И СУДОВЫХ ТУРБИН — ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДЛЕНИЯ ИХ РЕСУРСА (Ретроспективный анализ состояния и перспективы развития)

А. М. Жадкевич

Дан ретроспективный анализ состояния и перспектив развития пайки изделий горячего тракта ГТД. Изложены вопросы выбора жаропрочных сплавов для лопаток турбин. Описаны способы производства литых лопаток. На примере трех двигателестроительных компаний приведены объемы возможных ремонтных работ с помощью пайки лопаток. Представлена история развития пайки. Обосновано применение новых припоев. Изложены способы пайки лопаток и деталей ГТД, перспектива внедрения технологий в сферу ремонтного производства и их эффективность.

Retrospective analysis of status and prospects of development of brazing of parts of a hot path of gas turbine engine is given. Problems of selection of heat-resistant alloys for turbine blades are shown. Methods of manufacture of cast blades are described. Volumes of possible repair works using brazing of blades are shown on the example of two engine construction companies. History of brazing development is presented. The application of new brazing alloys is grounded. Methods of brazing of blades and parts of gas turbine engines are described and prospects of implementation of technologies into the sphere of repair manufacturing and their effectiveness are described.

Ключевые слова: пайка; ремонт; продление ресурса; технологии ремонта; жаропрочные сплавы; лопатки турбин; структура; упрочняющая фаза; литье; дефекты лопаток; двигателестроительные компании; история техники; припой; проблемы внедрения

Несмотря на многовековой опыт применения пайка как способ соединения металлов до прошлого столетия была предметом ремесла для получения украшений и изделий домашней утвари [1, 2]. В 1930-х и особенно в 1950–1960-х гг. в период бурного научно-технического прогресса во многих отраслях промышленности при изготовлении отдельных деталей, узлов и конструкций пайка становится основным технологическим процессом [3].

Идея создания газовых турбин многие годы не могла быть реализована из-за отсутствия материалов с достаточной жаропрочностью. Исследования используемых литейных жаропрочных никелевых сплавов взамен деформируемых, выполненные в ВИАМ, позволили превзойти уровень жаропрочности лучшего в то время зарубежного сплава Нимоник 75 на 200 °С [4]. Более высокий уровень прочности и жаропрочности литейных никелевых сплавов получен за счет интерметаллидного упрочнения при наличии γ -фазы (Ni_3Al) в виде дисперсных выделений, карбидов и высокой структурной стабильности сплавов. Результаты исследований позволили широко использовать литейные жаро-

прочные никелевые сплавы для изготовления лопаток газовых турбин, возможности которых оценены генеральными конструкторами-турбостроителями Н. Д. Кузнецовым и А. М. Люлькой в начале 1960-х гг. Только спустя несколько лет их опыт стали использовать в США и других странах [4, 5].

В настоящее время для изготовления лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) используют литейные жаропрочные никелевые сплавы с различной кристалличес-



Рис. 1. Макроструктура жаропрочных сплавов в лопатках ГТД: а — равноосная; б — направленная столбчатая; в — монокристаллическая (×300)

© А. М. ЖАДКЕВИЧ, 2005

кой структурой: равноосной, направленной (столбчатой) и монокристаллической [4–9] (рис. 1). Сплавы с равноосной структурой имеют зерна, границы которых приблизительно одинаково удалены от центра (рис. 1, а). В этом случае отсутствует направленный теплоотвод при кристаллизации. Уровень прочности и жаропрочности зависит от совершенства границ зерен и может регулироваться условиями кристаллизации [7].

Более перспективными являются сплавы с направленной столбчатой структурой, состоящей из зерен, вытянутых вдоль действия основной силовой нагрузки на лопатку. В рабочей части отливки лопатки должны отсутствовать границы, расположенные в направлении, перпендикулярном к воздействию главных напряжений. Подобная структура возникает при направленном теплоотводе [8, 9] (рис. 1, б).

Отливки лопаток с направленной кристаллизацией, при которой обеспечиваются условия затвердевания металла из одного центра кристаллизации, представляют собой один кристалл и называются монокристаллическими. Структура таких отливок отличается наиболее оптимальным сочетанием прочностных, пластических, усталостных и других характеристик. При такой структуре важно знать кристаллографическую ориентировку фазовых составляющих, поскольку характер и уровень напряжений, действующих в лопатках, а также механические свойства зависят от них существенно [10] (рис. 1, в).

При изготовлении лопаток авиационных и судовых турбин, других деталей горячего тракта, работающих в условиях высоких температур, при агрессивном воздействии продуктов сгорания топлива и высокотемпературной газовой (сульфидно-оксидной) коррозии широко применяются деформируемые и литейные жаропрочные сплавы сложного легирования на никелевой основе (дисперсионно- и недисперсионно-твердеющие). Структура дисперсионно-твердеющих сплавов состоит из матрицы (γ -фазы), представляющей собой сложнелегированный твердый раствор на основе никеля, и γ' -фазы на основе интерметаллидного соединения Ni_3Al [11] (рис. 2).

Наиболее распространенными жаропрочными сплавами для изготовления деталей горячего тракта авиационных ГТД являются ЭП 102, ЭП 109, ЭП 220, ЭП 617, ЭП 718, ЭП 742, ЭП 748, ЭП 791, ЭИ 437Б, ВЖЛ-12, ВЖЛ-128, ЖС6, ЖС6К, ЖС6КП, ЖС6 ФНК, ЖС6У, ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС30-ВИ, Нимоник 80А, инконель 718, и др., а для судовых энергетических установок — ЭП 99, ЭП 202, ЭП 367, ЧС 70 ВИ, ЧС 88 ВИ, ЧС 102, ЭП 539, ЭП 648, ЭИ 437А, ЭИ 602, ЭИ 617, ВЖ-36Л, ЖС6К и др. Это сложные по химическому составу никелевые сплавы, содержащие от 50 до 80 % никеля, легированные алюминием, титаном кобальтом, хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием, ниобием, танталом в разнообразных сочетаниях по составу легирующих элементов и с разной массовой долей [4, 12, 13].



Рис. 2. Микроструктура высокопрочного литейного жаропрочного сплава. Эвтектика $\gamma + \gamma'$ ($\times 8000$)

Лопатки из деформируемых жаропрочных сплавов для авиационных и судовых ГТД изготавливаются способомковки и штамповки с последующей механической обработкой, а лопатки из литейных сплавов с равноосной структурой — литьем по выплавляемым моделям [4, 6, 7]. Если требуется более высокий температурный уровень работы лопаток, применяют жаропрочные литейные сплавы с интерметаллидным упрочнением, полученные направленной кристаллизацией [4, 5, 8, 9].

В 1963 г. ВИАМ впервые получил лопатки из сплава ЖС6К с направленной структурой при индукционной вакуумной плавке. В качестве материала литейной формы использовали электрокорунд. Эти лопатки в 1965 г. испытаны на двигателях АИ-20, АИ-24 и НК-12 в самолетах ТУ-114 и АН-22, где отработали двойной и тройной ресурс без появления на них дефектов в виде трещин [4].

В настоящее время накоплен большой опыт по разработке и освоению технологии литья монолитных и охлаждаемых лопаток способом направленной кристаллизации. Применение для литья лопаток оболочковых форм толщиной 5... 8 мм с использованием одновременного нагрева формы, плавки в ней металла и различных способов направленного отвода теплоты кристаллизации обеспечивает столбчатую структуру металла со скоростью кристаллизации 15... 20 мм/мин и производительность 20... 30 лопаток в сутки [4, 8, 9].

На первой стадии развития промышленной технологии направленной кристаллизации созданы вакуумные порционные печи со шлюзовыми камерами для загрузки и выгрузки формы, затем — двухкамерные с высокочастотным нагревом формы и, наконец, — непрерывно-действующие с вертикальной камерой кристаллизации и горизонтальными шлюзами для загрузки и выгрузки форм [4]. Их суточная производительность достигала 80 лопаток. В последние годы автоматические многокамерные установки производят до 60 000 лопаток в год.

Отливку лопаток с монокристаллической структурой можно рассматривать как дальнейшее развитие процесса направленной кристаллизации с использованием современных способов специальной электрометаллургии. К процессу получения таких

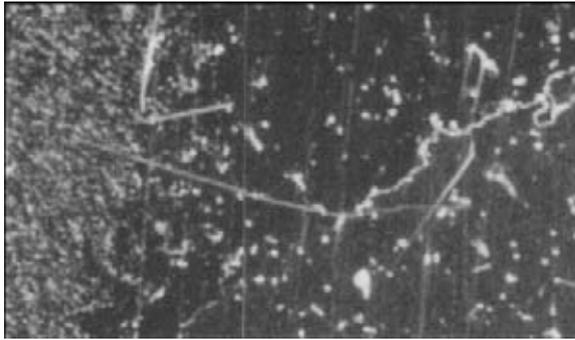


Рис. 3. Микротрещины в металле ЗТВ сварного соединения из сплава инконель 738 (X100)

отливки предъявляются более жесткие требования по температурным и скоростным параметрам кристаллизации. Лопатки с монокристаллической структурой изготавливают различными способами, но в любом случае важно получить в отливаемой детали одно зерно. Этого можно достичь, например, путем введения в полость формы монокристаллической затравки с ориентировкой [001], от которой ведут кристаллизацию жидкого металла всей отливки. При этом идет блокирование роста посторонних кристаллов за счет использования специальных стартовых устройств и регулирования теплового поля кристаллизации металла.

Для получения лопаток с направленной и монокристаллической структурой применяют также проходные методические вакуумные печи непрерывного действия, в которых металл плавится непосредственно в самой форме, нагреваемой до 1500 °С. В этом случае оболочковую форму с помещенной в приемную чашу заготовки сплава устанавливают в графитовую опоку и закрепляют опорным наполнителем. Опока с закрытой крышкой подается с загрузочного стола автоматически в шлюзовую камеру. Пройдя шлюзовую камеру, опока по заданному режиму перемещается в печи через плавильную зону в зону кристаллизации (тепловой фронт в печи расположен под углом 5... 10° относительно направления перемещения формы). После полного затвердевания металла и естественного охлаждения до 350 °С опоку выгружают на разгрузочный стол через шлюзовую камеру. Все операции в печи запрограммированы и осуществляются автоматически [4, 8, 9].

Лопатки для судовых энергетических установок выполняются монолитными, в основном со сплошным сечением пера. Лопатки авиационных ГТД имеют внутренние каналы в теле пера, предназначенные для их охлаждения в процессе работы двигателя.

Применению литейных жаропрочных сплавов для лопаток ГТД способствовали успехи в создании керамических материалов, оснастки и оборудования, позволяющие получать тонкие и сложные по форме отливки лопаток с каналами для охлаждения, выполнять которые другими способами практически невозможно.

Для изготовления лопаток турбин применяют многооперационную дорогостоящую технологию.

В серийном производстве лопаток не допускаются большие потери и отбраковка на каждой операции технологического процесса. При литье лопаток выход годного металла относительно простых однополочных лопаток составляет 95 %, а при литье с направленной кристаллизацией — 85 %. Отбраковка увеличивается при литье лопаток сложных конструкций с полостями охлаждения, где выход годного металла составляет всего 60... 65 %, а при литье монокристаллических лопаток он не превышает 50 %. Основными видами отбраковки лопаток при литье являются раковины, пузыри и неметаллические включения на поверхности лопатки.

В процессековки, штамповки, механической обработки заготовок лопаток, нанесения защитных покрытий, а также при эксплуатации турбин на рабочей поверхности пера лопатки возникают различные дефекты: раковины, забоины, вмятины, искажения формы, риски, царапины, сколы, утонение пера и т. п. Эксплуатация таких лопаток приводит к снижению КПД турбины, а в большинстве случаев просто невозможна.

Устранение указанных дефектов при помощи сварки в применяемых в судостроении недисперсионно-твердеющих сплавах типа ЭИ 602 не вызывает затруднений. Они хорошо свариваются аргонодуговым способом с использованием близких по химическому составу присадочных проволок. Механические свойства таких сварных соединений идентичны свойствам основного металла [13].

При сварке жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов возникают проблемы, связанные с образованием горячих трещин в металле околошовной зоны, ухудшением свойств металла в зоне термического влияния (ЗТВ), снижением жаростойкости и жаропрочности соединений (рис. 3). Для предотвращения возникновения горячих трещин при сварке этих сплавов существует множество технологических приемов, например измельчение структуры металла шва, легирование металла шва молибденом, хромом, вольфрамом, бором в различных сочетаниях, введение в металл шва алюминия и титана, осуществление искусственного отвода тепла с целью изменения направленности кристаллизации металла вдоль оси шва, изменение размера сварочной ванны, регулирование скорости нагрева при термической обработке, применение различных способов сварки (лазерная, электронно-лучевая, диффузионная) и т. п. [12, 13]. Однако получить высокое качество сварных швов на высоколегированных жаропрочных никелевых сплавах практически не удается [13, 14].

Применение высокотемпературной пайки для экспериментального ремонта лопаток соплового аппарата и жаровой трубы камеры сгорания ГТД после их эксплуатации было выполнено в США в 1971 г. компанией «Пратт и Уитни» (PW) корпорации «Юнайтед Технолоджи» [15]. Основатель компании Фредерик Ренчлер в конце 1925 г. с группой инженеров выпустил первый поршневого двигателя

для самолетов под названием «Wasp». С этого события начался отсчет истории компании PW, ставшей мировым лидером в производстве надежных авиационных двигателей.

С конца 1940-х г. PW приступает к выпуску надежных и простых в эксплуатации реактивных двигателей JT8D (последующая модель JT9D), наиболее распространенной модели для Боинга 727. В 1991 г. этими двигателями были оснащены 42 % самолетов гражданской авиации в 350 авиакомпаниях, т. е. 14000 двигателей и 450 млн наработанных летных часов. Объем реализации компании PW (35 тыс. работников) на мировом рынке в 2002 г. составил 7,6 млрд дол. США.

В 2003 г. свыше 600 авиакомпаний из 150 стран мира эксплуатировали ГТД компании PW. Производственная деятельность PW расширяется с каждым годом благодаря выпуску новых двигателей PW-2000, PW-4000, PW-6000, созданию новых ремонтных предприятий, а также за счет совместных предприятий в других странах, в том числе в России и Украине, в которые вложено более 400 млн долларов США. В 1991 г. PW и АК им. С. В. Илюшина приступили к совместному производству двигателя ПС-90А2. На самолет ИЛ-96М был установлен американский двигатель PW-2337 (рис. 4) [16].

Имея большой производственный и научно-технический опыт, компания PW обосновала и показала на примере производственной деятельности техническую и экономическую целесообразность, а также перспективность применения пайки в вакууме при ремонте лопаток ГТД и деталей горячего тракта двигателя вместо аргонодуговой сварки [15, 16].

В России ремонт сопловых лопаток ГТД с применением пайки произведен в 1972 г. на ММЗ «Сатурн» (ныне ОАО «А. Люлька-Сатурн»), вот уже 50 лет являющемся традиционным разработчиком и изготовителем двигателей для военной и гражданской авиации. Высокотемпературную пайку на лопатках ГТД выполняли в газовой среде, состоящей из аргона с продуктами разложения фторбората калия без снятия алитированного слоя. Такой процесс обеспечил сохранность алитированного слоя и дальнейшую жаростойкость поверхности лопаток.

Годом рождения одного из самых передовых предприятий двигателестроения России — ОКБ «А. Люлька» — можно считать 1946, когда для постройки летного экземпляра турбореактивного двигателя (ТРД) А. М. Люлька как главному конструктору выделили в Москве экспериментальную базу и опытный завод. А. М. Люлька, изучая теоретические исследования Б. С. Стечкина воздушно-реактивного двигателя, с группой инженеров ХАИ в 1937 г. предложил проектную проработку ТРД, не принятого харьковскими специалистами. Проект был направ-



Рис. 4. Двигатель PW-2337 на техническом обслуживании

лен в Москву и получил высокую оценку крупнейшего специалиста по новым силовым установкам для авиации профессора В. В. Уварова.

В апреле 1941 г. А. М. Люлька запатентовал свою схему двухконтурного ТРД [17], ставшую прототипом существующих ныне схем двигателей. К лету 1941 г. двигатель был готов на 70 % в металле. Дальнейшему его производству помешала война.

В 1943 г. в ЦИАМ, а затем в НИИ-1, А. М. Люлька возглавил отдел по исследованию и конструированию ТРД и создал новый проект двигателя С-18 (стендовый) — прообраз ТР-1. В мае 1947 г. опытный истребитель СУ-11 впервые подняли в воздух с реактивным двигателем ТР-1 (рис. 5). Осуществилась мечта, к которой А. М. Люлька шел 10 лет.

В 1950-х гг. А. М. Люлька создает самый мощный в то время ТРД с тягой 5000 кгс — АЛ-5. Второе поколение этого двигателя — АЛ-7 — было лучшим в мире. Его использовали на летающей лодке Бериева М-10 и пассажирском самолете ТУ-110, после чего творческая дружба А. М. Люльки и А. Н. Туполева длилась до конца их жизни (рис. 6).

Двигатель АЛ-7 и его модификации выпускали для истребительной и гражданской авиации. Объем их выпуска достиг 20 тыс. экземпляров. Новые возможности ТРД были воплощены в двигателях АЛ-21Р и АЛ-21Ф-3 для самолетов СУ-17, СУ-17М, СУ-24, эксплуатируемых с 1973 по 1993 г. В середине 1980-х гг. А. М. Люлька создал двухконтурный двигатель АЛ-31Ф с тягой 12500 кгс. В 1979 г.

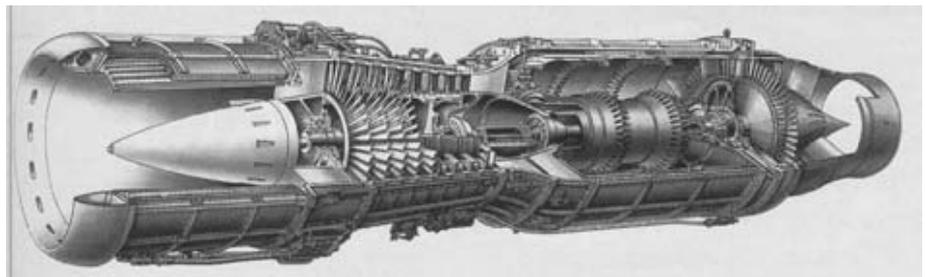


Рис. 5. Газотурбинный двигатель ТР-1



Рис. 6. А. М. Люлька (справа) и А. Н. Туполев, 1958 год

этот двигатель поднял в воздух СУ-27. На нем позднее установлено более 30 мировых рекордов.

Самолет СУ-37 с двумя двигателями АЛ-31ФП с поворотным соплом, над которым работали с 1988 г., стал «звездой» авиасалона в Фарнборо, Сеуле, Ле Бурже [17, 18].

Богатый научный, исследовательский, экспериментальный и промышленный потенциал коллектива ОАО «А. Люлька-Сатурн» позволил их предприятию стать головным по внедрению новых прогрессивных технологий в сфере производства и ремонта ГТД.

Нельзя не упомянуть о перспективах отечественного флагмана двигателестроения — объединения ОАО «Мотор Сич», которому в этом году исполняется 85 лет. Оно занимает достойное место среди ведущих двигателестроительных фирм, работающих для авиации. В настоящее время несколько десятков тысяч ГТД 55 наименований, изготовленных ОАО «Мотор Сич», эксплуатируется в 105 странах мира.

В объединении ведется интенсивная подготовка и освоение ряда новых авиационных двигателей, в том числе нового поколения двигателей Д-27, АИ-450, Д-436 (Т1 и ТП), ТВЗ-117, ВК-1500, АИ-222-25, АИ-22, предназначенных для самолетов ТУ-334 и АН-74 (Д-436), АН-38 и самолета-амфибии Бе-32 (ВК-150), АН-70 (Д-27), ЯК-130 (АИ-222-25), АН-140 (ТВЗ-117 и ВК-2500) и вертолетов (ВК-1500В), несмотря на отдельные трудности реальная перспектива развития одного из гигантов отечественной

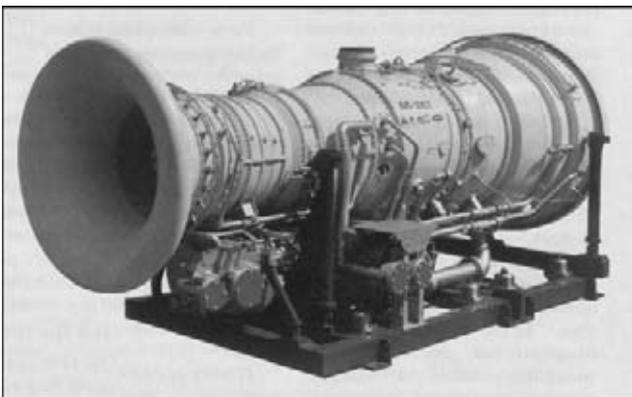


Рис. 7. Авиационный газотурбинный привод АЛ-31СТ для газоперекачивающих агрегатов производства ОАО «А. Люлька-Сатурн»

двигателестроительной промышленности ОАО «Мотор Сич» дает основание предполагать выполнение большого объема работ с использованием пайки при эксплуатации и ремонте многих тысяч ГТД [19].

Краткий анализ производства ГТД только в трех компаниях (PW, ОАО «Мотор Сич» и ОАО «А. Люлька-Сатурн», по праву самых передовых в мире) свидетельствует о большой перспективе использования ремонтных технологий, в том числе и пайки, в продлении ресурса работы нескольких десятков тысяч двигателей. Кроме этих производителей ГТД, на рынке авиационных и судовых двигателестроителей успешно работают «General Electric», «Rolls Royce», «Boeing», EADS, «Mitsubishi», ОАО «СНТК им. Н. Д. Кузнецова», ОАО «Уфимское моторостроительное объединение», ОАО «Рыбинские моторы», ФГУП ММП «Салют», ОАО «Авиадвигатель», ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», ЗМКБ «Прогресс» им. А. Г. Ивченко («Ивченко-Прогресс») и многие другие. Всего в мире около 250 больших фирм, выпускающих газотурбинные двигатели. Большинство этих компаний, фирм и предприятий начали успешно работать по конверсионной программе создания комплексов с ГТД для энергетической и нефтегазовой отрасли (рис. 7, 8) [20–23].

Продление ресурса работы сотен тысяч действующих ГТД за счет ремонта и повторного использования двигателя дает колоссальный экономический эффект. Сохранение и повторное использование сотен миллионов работающих на турбинах дорогостоящих лопаток — одна из главных задач современного ремонтного производства в двигателестроении наряду с созданием и выпуском новых ГТД.

Комплекс научно-исследовательских работ, выполненных за последние 30 лет двигателестроительными объединениями совместно с научными центрами ВИАМ, ЦИТМ, НИАТ, НИИД, ЦНИИ КМ «Прометей», МГТУ им. Н. Э. Баумана, МАТИ, ИЭС им. Е. О. Патона, НУК им. адмирала Макарова и др., позволили рекомендовать пайку в качестве основного технологического процесса для ремонта дефектов лопаток после их литья и наработки при эксплуатации [12, 13, 15, 24–30].

Пайка лопаток ГТД является сложным технологическим процессом, в котором подготовка поверх-

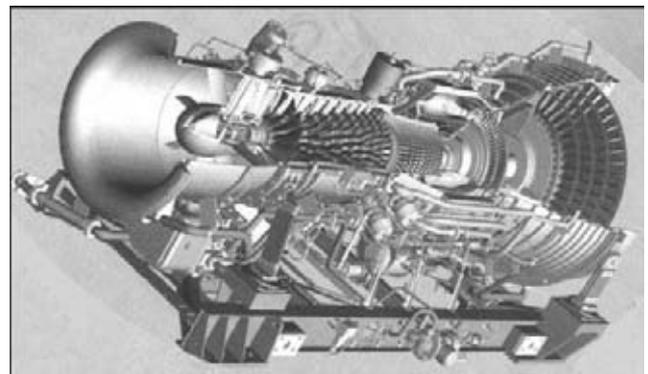


Рис. 8. Газотурбинный двигатель для привода наполнителей газа, электрогенераторов и судовых двигателей производства ГП НПКГ «Зоря-Машпроект»

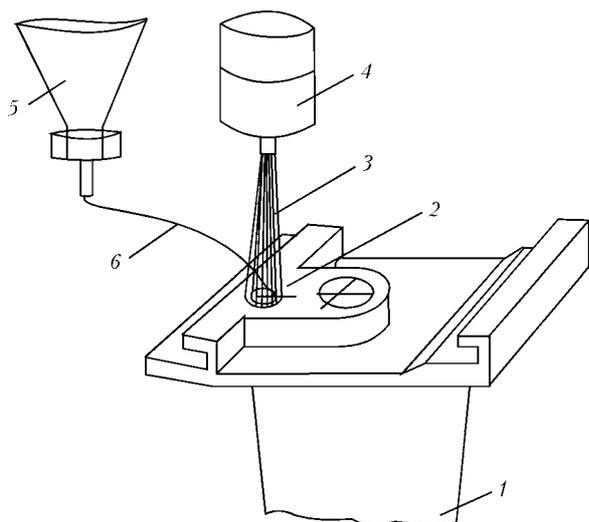


Рис. 9. Схема процесса дуговой пайки отверстия под штифт лопатки соплового агрегата ГТД-30КУ: 1 — лопатка; 2 — отверстие под штифт; 3 — дуговой разряд; 4 — горелка; 5 — питатель для подачи порошкового припоя; 6 — транспортирующая труба

ности по трудоемкости составляет 2/3 всего процесса. Широкому внедрению пайки для ремонта лопаток препятствовало отсутствие средств для гарантированного удаления с ее поверхности оксидов, нагаров и жаростойких покрытий, а также трещин с внутренней поверхности, что требовало механической разделки лопатки [15]. Существующие способы дробеструйной и абразивно-жидкостной обработки поверхности лопатки не обеспечивали тщательную и равномерную обработку всей поверхности пера и приводили к изменению размеров изделия.

Разработанные в 1970 г. в НИАТ и спустя четыре года в РВ композиционные припои позволили внедрить пайку как способ ремонта лопаток, деталей и узлов горячего тракта ГТД с зазором под пайку до 0,15 мм после механической обработки дефектных участков. Этому способствовал и созданный в 1980 г. на фирме «Дейтон» (США) процесс фтористо-ионной очистки ремонтируемой поверхности изделия от оксидов, нагаров и жаростойких покрытий.

Ведущие зарубежные компании РВ, «General Electric», «Rolls Royce», «Mitsubishi», «Interturbine» в первой половине 1980-х гг. начали активно и успешно применять для ремонта лопаток соплового агрегата, створок регулируемого сопла, сотовых уплотнений, отверстий в сопловых лопатках под штифт и т. п. высокотемпературную пайку (рис. 9).

В эти же годы передовые российские двигателестроительные предприятия НПО «Сатурн», НПО «Машпроект», КНПО «Труд», НПО «Салют» и др. совместно с НИАТ, НИИД, ИЭС им. Е. О. Патона, НКИ им. академика Макарова, МГТУ, МАТИ и др. успешно применили для пайки при ремонте дефектных лопаток после их эксплуатации вместо оборудования для фтористо-ионной очистки термовакuumный отжиг, дробеструйную и абразивно-жидкостную очистку поверхности [24–26, 30].

Пайка жаропрочных никелевых сплавов, легированных алюминием, титаном, хромом и другими элементами, затруднена прежде всего из-за необходимости удаления термодинамически прочных ок-

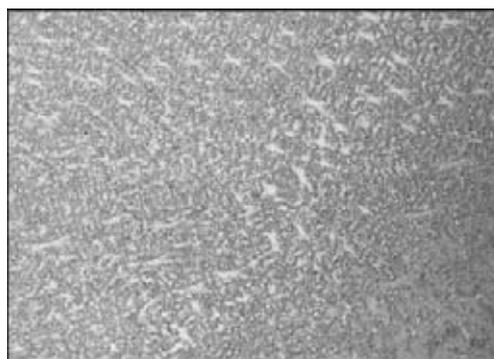


Рис. 10. Микроструктура металла шва из сплава ЖС6У-ВИ (X200), полученного способом пайки с использованием композиционного порошкового припоя (смесь сплава Ni-Cr-Zr и жаропрочного сплава ЖС26У)

сидных пленок, а также обеспечения жаропрочности паяных соединений. Наиболее эффективной и рациональной является высокотемпературная пайка в вакууме ($1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ Па) с использованием никелевых припоев [31, 32].

В мировой практике ремонта способом пайки дефектных отливок и изношенных поверхностей лопаток и деталей ГТД используют преимущественно припои на основе систем Ni-Cr-B, Ni-Cr-Si, Ni-Cr-Si-B (BNi-2, BNi-5, ВПр24, ВПр27, ВПр42 и др.). Анализ припоев указанных систем показал, что они имеют ряд недостатков, а их применение вызывает иногда непреодолимые трудности. Для борсодержащих припоев — это образование хрупких фаз, содержащих бориды хрома, и межзеренная химическая эрозия паяемого металла, а для кремнесодержащих — слабое растворение паяемого металла, образование силицидов, развитие локальной и общей химической эрозии с заметным увеличением зерна при выдержках свыше 15...30 мин и температуре 1220 °С [12, 31, 33]. И все же эти припои широко используются для ремонта лопаток [13, 24, 30] с применением различных технологических приемов и режимов пайки.

В конце 1980-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ИМФ им. Г. В. Курдюмова, НКИ им. адмирала Макарова (ныне НУК) и НПП «Машпроект» (ныне ГП НПКГ «Зоря-Машпроект») разработано новое направление в создании перспективных и высокоэффективных припоев на основе легированных эвтектических сплавов, в которых в качестве депрессантов использованы элементы IV и V групп таблицы Менделеева (титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий).

Наиболее хорошо изучена система Ni-Cr-Zr. Выполненный комплекс исследований позволил изучить фазовый состав и структуру этих припоев, их растекание и смачивание поверхности, твердость, температуру плавления. Установлено, что наличие в них интерметаллида Ni_7Cr_2 с невысокой твердостью дает возможность регулировать твердость металла паяного шва. Данные припои являются перспективными, поскольку гарантируют высокое качество изделий при изготовлении способом пайки сотовых панелей, составных лопаток ГТД, а также при ремонте литых лопаток и лопаток ГТД после эксплуатации (рис. 10) [33–37].

В настоящее время для ремонта лопаток и деталей горячего тракта ГТД применяют следующие способы пайки:

высокотемпературную пайку припоем в вакууме, в защитной атмосфере аргона, в инертной или восстановительной атмосфере [24, 28, 31, 32];

пайку с использованием дугового нагрева неплавящимся электродом под защитой аргона с применением припоя в качестве присадочного материала [24, 26, 34];

пайку давлением в вакууме с использованием припоя и вакуумных прижимов с давлением 0,07... 1,27 МПа [25, 30, 31].

Для повышения уровня механических свойств изделия после пайки подвергают диффузионному отжигу. При пайке давлением эффективно применение последующей термической обработки по режиму основного металла [31].

С целью восстановления служебных свойств металла и характеристик сопротивления усталости лопатки после длительной эксплуатации подвергают восстановительной термообработке и стабилизирующему отпуску по специально разработанным режимам [38, 39].

Ремонтная технология пайки литых жаропрочных лопаток, а также лопаток, деталей и узлов горячего тракта авиационных и судовых ГТД после их наработки при эксплуатации является перспективной и обеспечивает гарантированно высокое качество изделий.

Внедрение в сферу ремонтного производства выполненных в последние годы научных, технических и технологических исследований в области пайки жаропрочных сплавов на никелевой основе позволит получать большой экономический эффект за счет восстановления и повторного использования дорогостоящих лопаток и других деталей горячего тракта ГТД как при строительстве новых турбин, так и при их эксплуатации [39]. Однако отсутствие государственных стандартов на ремонтные технологии с помощью пайки, специализированных производителей технологического оборудования и материалов для пайки сдерживает широкомасштабное внедрение этой высокоэффективной технологии [40].

Выводы

1. Показано, что лопатки, детали и узлы горячего тракта авиационных и судовых газовых турбин являются дорогостоящими изделиями и составляют весомую часть себестоимости производства и эксплуатации двигателей в целом.

2. Для изготовления лопаток, деталей и узлов горячего тракта авиационных и судовых ГТД требуется использование специальных жаропрочных никелевых сплавов сложного легирования.

3. Установлено, что многооперационный технологический процесс изготовления лопаток ГТД и их эксплуатация приводят к образованию разнообразных дефектов, несовместимых с требованиями эксплуатации турбины.

4. В мировой практике эксплуатации авиационных и судовых ГТД используется многомиллионное количество лопаток, которые можно восстанавли-

вать способом пайки, продлевая тем самым ресурс их работы.

5. Выполненные научными центрами Украины и России совместно с двигателестроителями комплексные научно-технологические работы позволяют с большим экономическим эффектом внедрить эти разработки в сферу ремонтного производства и гарантировать высокое качество готового изделия.

6. Широкое внедрение технологии пайки для ремонта лопаток и изделий горячего тракта ГТД сдерживается из-за отсутствия стандартов на ремонт, а также специализированных производителей оборудования и материалов для пайки.

1. Рыбаков Б. А. Ремесло древней Руси. — М.: Изд-во АН СССР, 1948. — 780 с.
2. Жадкевич А. М. История возникновения, технологические особенности и технические возможности первых способов пайки // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 43–48.
3. Современные достижения и задачи в области пайки металлов и других материалов // С. Н. Лоцманов, И. И. Ильевский, И. Е. Петрунин и др. // Пайка металлов в производстве и перспективы ее развития. — М.: МДНТП, 1962. — С. 72–77.
4. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
5. Шалин Р. Е., Булыгин И. П., Голубовский Е. Р. Жаропрочность сплавов газотурбинных двигателей. — М.: Металлургия, 1981. — 120 с.
6. Прогресс в точном литье — один из решающих факторов в повышении мощности, ресурса и надежности газотурбинных двигателей / В. М. Степанов, В. Г. Чубаров, А. Е. Кононова и др. // Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники. — М.: Наука, 1978. — С. 319–329.
7. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов / А. В. Логунов, Н. В. Петрушин, Е. А. Кулепова и др. // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1981. — № 6. — С. 16–20.
8. Технология литья лопаток газотурбинных двигателей по методу направленной кристаллизации / В. А. Чумаков, В. М. Степанов, Б. Г. Иванов и др. // Литейн. пр-во. — 1978. — № 1. — С. 23–24.
9. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов / С. Т. Кишкин, Г. Б. Строганов, А. В. Логунов и др. // Там же. — 1984. — № 4. — С. 17–19.
10. Изучение длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов / В. Г. Лютцау, Е. П. Костюкова, В. Н. Толорайя и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1981. — № 6. — С. 180–184.
11. Бокштейн С. З., Брофтин М. Б., Другова И. А. Свойства интерметаллидных фаз в никель-алюминиевых сплавах // Современные способы упрочнения деталей машин термообработкой. — Ташкент: Наука, 1973. — С. 56–61.
12. Квасницкий В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении. — Л.: Судостроение, 1986. — 232 с.
13. Квасницкий В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении // Автомат. сварка. — 1985. — № 6. — С. 26–30.
14. Характер образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных сплавов / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, А. В. Звягинцева // Там же. — 2004. — № 8. — С. 35–40.
15. Ключников И. П., Гейкин В. А. Ремонт высоконагруженных деталей и узлов горячего тракта ГТД методом высокотемпературной пайки // Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции.: Сб. 2. — М.: ЦРДЗ, 2001. — С. 19–24.
16. Глина О., Торякова-Матвеева Д. Pratt & Whitney — всегда там, где мы нужны // Газотурбин. технологии. — 2003. — № 2. — С. 38–40.
17. Зинченко Г., Моргунов Е. Талант, умноженный на дерзость, труд и упорство // Там же. — С. 30–32.
18. Настоящее и будущее российского турбостроения. Обзор. ОАО «А. Люлька-Сатурн» // Там же. — 1999. — № 1. — С. 34.
19. Гончаров С. Помпаж с помпой // Газ. "Телеграф". — 2001. — 24–30 дек. — С. 12–13.
20. Развитие семейства ГТУ на базе двигателя Д-30 третьей серии / Т. Комарова, А. Михайлов, С. Палатиди и др. // Газотурбин. технологии. — 2003. — № 3. — С. 6–8.
21. Кузнецов А., Куприк В., Хороших А. Опыт создания, доводки и эксплуатации систем управления стандартных газотурбинных двигателей семейства АЛ-31 // Там же. — 2004. — № 1. — С. 8.



22. *Муравченко А.* Модернизация газотурбинных двигателей «Ивченко-Прогресс» для энергетических установок промышленного применения // Там же. — 2004. — № 2. — С. 52–54.
23. *Богуслав В.* Газотурбинные установки ОАО «Мотор Сич» для энергетики и нефтегазовой отрасли // Там же. — 2003. — № 6. — С. 46–47.
24. *Ямпольский В. М., Неровный В. М.* Упрочнение и восстановление лопаток газотурбинных двигателей пайкой // Тр. МВТУ. — 1981. — № 383. — С. 72–78.
25. *Орлов А. В., Березников Ю. И., Самсонова Т. С.* Ремонт деталей газовых турбин методом дуговой пайки // Энергомашиностроение. — 1984. — № 2. — С. 33–34.
26. *Хорунов В. Ф., Кудашов А. О.* Пайка давлением высокотемпературных сталей и жаропрочных сплавов // Материалы и технология пайки: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1991. — С. 14–17.
27. *Повышение ресурса лопаток турбин авиационных двигателей методом дуговой пайки* // В. М. Воробьев, В. Г. Черняев, В. М. Неровный, В. С. Рыльников // Там же. — С. 23–26.
28. *Груздев Б. Л., Козлов В. В., Вангиц И. С., Сыретин В. А.* Особенности технологии пайки сплава ЖС6К припоем ВПр11 // Свароч. пр-во. — 1974. — № 2. — С. 34–35.
29. *Wrede U., Bohrenkamper G., Umluft R.* Labenschaurverlangernde Massnahmen an Gasturbinen // Allianz Report. — 1999. — № 2. — S. 97–103.
30. *Квасницкий В. Ф., Корсунь А. И.* Исследование возможности исправления поверхностных дефектов литых лопаток и создание подслоев припоя перед нанесением покрытий // Судостроение. — 1986. — Вып. 35. — С. 103–106.
31. *Квасницкий В. Ф.* Специальные способы сварки и пайки в судостроении. — Л.: Судостроение, 1984. — 224 с.
32. *Лашко Н. Ф., Лашко С. В.* Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1988. — 376 с.
33. *Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Зволлинский И. В.* Исследование химической неоднородности паяных швов соединений жаропрочных никелевых сплавов // Сварка и контроль-2004: Сб. докл. всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. (Пермь, окт. 2004). — Пермь: ПГТУ, 2004. — Т. 2. — С. 291–294.
34. *Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Самохин С. М.* Пайка современных и перспективных жаропрочных материалов для газотурбостроения // Пробл. соврем. материаловед.: Тр. IV сессии Науч. совета по новым материалам МААН. — Киев; Гомель: ИММС АН Белоруси, 2000. — С. 77–81.
35. *Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Иванченко В. Г.* Разработка припоев для пайки жаропрочных сплавов на основе никеля и титана // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 27–32.
36. *Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Зволлинский И. В.* Структура паяных соединений высоколегированных никелевых сплавов, полученных с использованием дугового нагрева // Там же. — 2003. — № 7. — С. 19–22.
37. *Квасницкий В. В., Хорунов В. Ф.* Исследование диаграмм состояния систем на никелевой основе с целью создания новых припоев для пайки жаропрочных материалов // Технология судостроения и сварочного производства: Сб. науч. тр. — Николаев: УГМТУ, 1996. — С. 16–25.
38. *Восстановление структуры и свойств лопаток из сплава ЖС6У после длительной эксплуатации* // А. Ф. Белов, С. С. Хаюров, А. С. Клецев и др. // Авиацион. пром-сть. — 1984. — № 2. — С. 54–56.
39. *Иванов Ю., Кузьменко М., Михайлов А.* Термическая обработка жаропрочных никелевых сплавов // Газотурбин. технологии. — 2003. — № 2. — С. 10–12.
40. *Хорунов В. Ф.* Пайка: Достижения и перспективы // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 51–53.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 10.01.2005