

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	2
1. Конструктивные особенности лопаток турбины.....	4
2. Материалы, применяемые при изготовлении лопаток турбины.....	8
3. Причины повреждения лопаток турбины.....	12
4. Существующие методы ремонта лопаток.....	16
4.1. Восстановительная термообработка.....	16
4.2. Диффузионная пайка.....	19
4.3. Дуговые технологии ремонта лопаток.....	20
4.4. Плазменные технологии ремонта.....	23
4.5. Электронно-лучевые технологии ремонта лопаток.....	24
4.6. Лазерные технологии ремонта лопаток.....	26
Выводы.....	47
Список использованной литературы.....	50

## Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, среди которых энергетическая, авиационная и др. [1]. Ежегодный спрос на ГТД составляет более 1200 штук. Основным потребителем ГТД является энергетика, где они используются в качестве приводов электрогенераторов электростанций различных типов, обеспечивающих конечных потребителей электричеством и теплом. Объём продаж ГТД в данной отрасли неуклонно растёт и если в 2014 году он составлял 22,7 млрд. дол. США или 1280 ГТД, то по прогнозам к 2021 году будет составлять около 27 млрд. дол. США, что составляет около 1500 ГТД.

Другой отраслью промышленности, в которой также в огромном количестве используются ГТД, является авиастроение. Так в 2011 году объём мирового рынка продаж ГТД в авиастроении составлял 60,1 млрд. дол. США и по прогнозным оценкам должен вырасти к 2025 году в 1,7 раз и составить 100,8 млрд. дол. США [2]. Согласно прогнозам ОАО «НПО «Сатурн» объём продаж ГТД в авиации за период с 2014 года по 2028 год составит около 1440,1 млрд. дол. США при ежегодном росте рынка на 1,4% [3].

Надёжность газотурбинных двигателей в значительной степени зависит от надёжности рабочих лопаток (РЛ) турбины, поскольку они являются наиболее нагруженными деталями. РЛ подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок; испытывают термические напряжения; работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре [4], [5]. РЛ имеют установленный разработчиком ресурс работы (~ 25 000 часов). Поскольку жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) обладают довольно высокой стоимостью, то ремонт изношенных изделий является экономически целесообразным решением.

Существующие технологии дуговой ремонтной наплавки РЛ обеспечивают низкий коэффициент выхода годной продукции, связанный с

формированием трещин, как в основном, так и в наплавленном металле вследствие большого тепловложения в обрабатываемый материал. Лазерные методы наплавки обладают высокой концентрацией энергии, что позволяет сбалансированно направлять тепловую мощность на расплавление основного и присадочного металла и минимизировать объём расплава и припуски на последующую механическую обработку. На данный момент на территории Российской Федерации отсутствуют отечественные технологические комплексы и реализуемые на них технологии ремонтной лазерной наплавки РЛ ГТД, что обуславливает актуальность настоящей работы.

## 1. Конструктивные особенности лопаток турбины

Лопатки турбины являются наиболее нагруженными, ответственными и массовыми деталями газотурбинной установки. Некоторые ГТУ имеют до семи ступеней турбинных лопаток. Общее количество лопаток турбины на одном двигателе может достигать более 500 штук. Длина лопаток составляет 40-400 мм, закрутка пера составляет 60 градусов. Основную номенклатуру составляют лопатки длиной от 60 до 250 мм (рисунок 1.1).

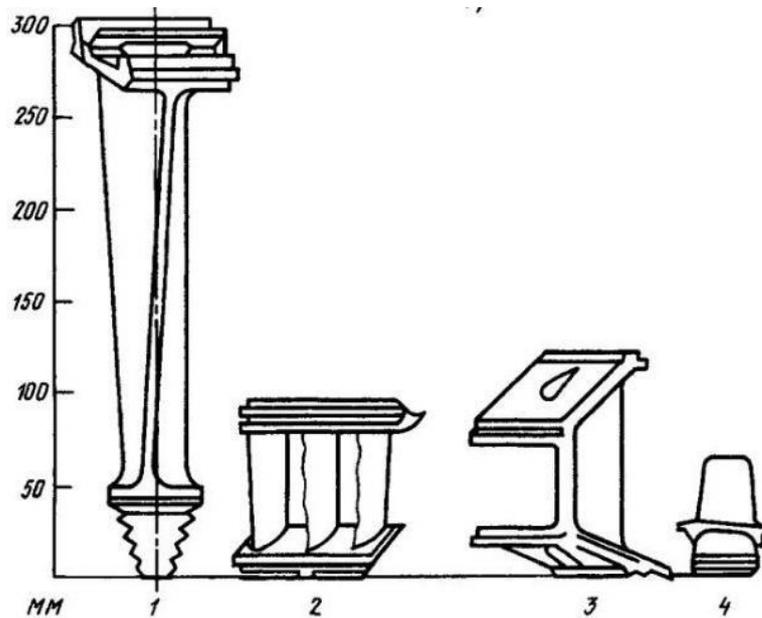
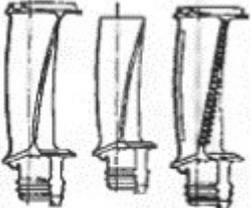
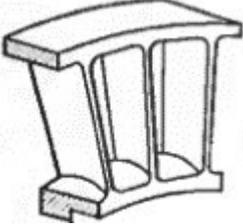
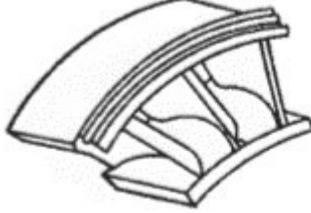


Рисунок 1.1. Разновидности лопаток турбины

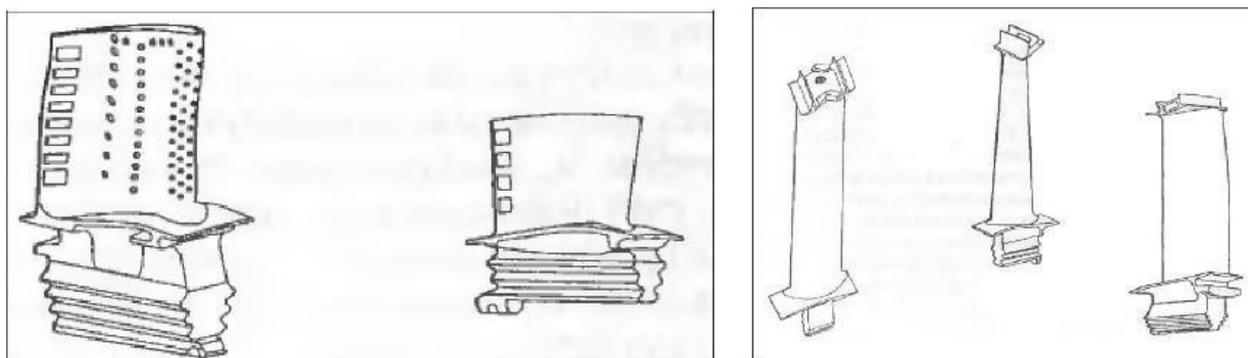
По назначению лопатки турбины подразделяют на лопатки ротора (рабочие лопатки) и статора (лопатки соплового аппарата). По конструктивному исполнению лопатки подразделяют на отдельные, лопатки в секторах и лопатки в моноколёсах (таблица 1).

Таблица 1. Классификация лопаток турбины ГТД [6].

Конструктивное исполнение	Наружный диаметр, мм	Высота пера, мм	Назначение и эскиз	
			Ротор	Статор
			Рабочие	Сопловые
Лопатки отдельные		10-100 101-250 251-400		
Конструктивное исполнение	Наружный диаметр, мм	Высота пера, мм	Назначение и эскиз	
			Ротор	Статор
			Рабочие	Сопловые
				
Лопатки в цельных рабочих колёсах и цельных сопловых аппаратах	150-300 301-700	10-100 50-400		

Рабочие лопатки турбины, применяемые в ГТУ, бывают охлаждаемые и неохлаждаемые (монолитные). Лопатки отдельные различают по конструктивному исполнению (рисунок 1.2):

- с ёлочным хвостовиком и без бандажной полки;
- с ёлочным хвостовиком и с бандажной полкой.



а)

б)

Рисунок 1.2. Одиночные безбандажные охлаждаемые лопатки (а); лопатки отдельные с елочным хвостовиком и с бандажной полкой (б)

Для обеспечения высокого коэффициента полезного действия (КПД) турбины большое значение имеет предотвращение утечек через радиальный зазор между рабочими лопатками и статором. С целью уменьшения перетекания газов на рабочих лопатках применяют бандажные полки с расположенными на них лабиринтными гребешками. Над гребешками рабочих лопаток на ответных статорных деталях выполняется уплотнение. На рабочих лопатках, на которых применение бандажных полок не представляется возможным, уменьшение радиального зазора между ротором и статором достигается за счет нанесения на торец лопаток износостойкого материала, а на проставки статора – прирабатываемого покрытия. Кроме снижения концевых потерь бандажные полки обеспечивают необходимый уровень демпфирования вибрационных напряжений на пере лопатки.

Рабочие охлаждаемые лопатки турбины, различаются конструктивным исполнением системы охлаждения. В настоящее время основными схемами охлаждения рабочих лопаток являются: конвективная, пленочная, конвективно-пленочная и с проникающим охлаждением (рисунок 1.3).

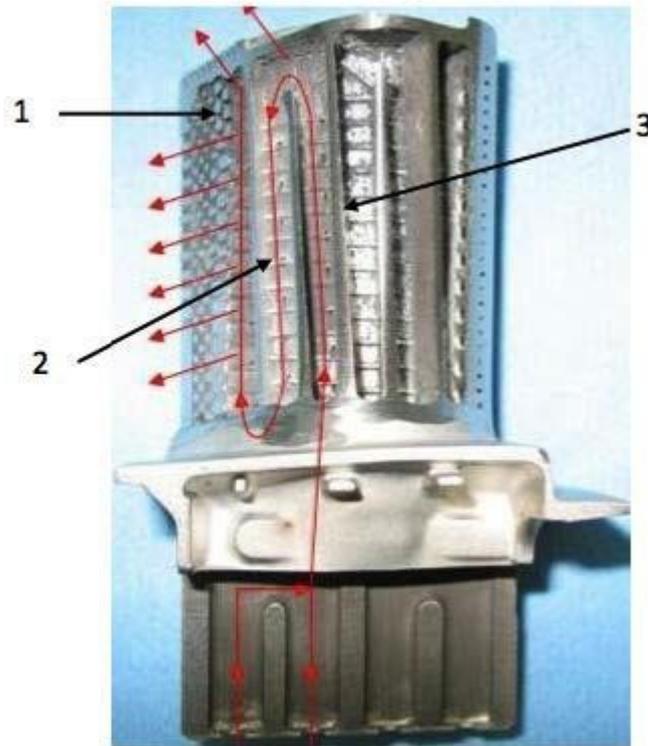


Рисунок 1.3. Рабочая лопатка турбины с конвективно-пленочным охлаждением: 1 – отверстие для выхода охлаждающего воздуха на поверхность пера лопатки и организации пленочного охлаждения; 2 – каналы с петлевым течением охлаждающего воздуха; 3 – ребра (интенсификаторы теплоотдачи)

Лопатки отдельные сопловые выполняются без хвостовика, с призматическим хвостовиком, имеющим сложную форму с тонкими полками радиусной сферической формы, и с призматическим хвостовиком и полками с двух сторон пера. Система охлаждения сопловых лопаток, включающая конфигурацию внутренней полости, перфорацию стенки пера, дефлектор, входные и выходные каналы для воздуха и т.д., подобна системе охлаждения рабочих лопаток.

## 2. Материалы, применяемые при изготовлении лопаток турбины

Лопатки турбины изготавливаются из жаропрочных сплавов, выбор которых определяется рабочей температурой при эксплуатации двигателя (таблица 2).

Таблица 2. Жаропрочные сплавы для изготовления лопаток турбины [7].

Рабочая температура, град С	Марка сплава
650-800	ЭИ437А, ЭИ437Б
800-850	ЭИ617, ЭИ598, ЭИ896
850-950	ЭИ929, ЭИ867, ЭП109
950-1000	ЖС6К, ЖС6У
1000-1200	ЖС6К, ЖСЗДК, ВЖЛ12, ВЖЛ12Э, ЖС26-ВИ, ЖС32-ВИ

Внедрение в практику сплавов с направленной кристаллизацией и монокристаллических сплавов позволило достичь значимого прогресса в повышении рабочих параметров турбины и долговечности сопловых и рабочих лопаток. Применение этих технологий позволяет минимизировать границы между зёрнами, перпендикулярными направлению центробежных сил (направленная кристаллизация) для снижения ползучести и разрушения на границах зёрен. Монокристаллические детали имеют минимальную протяженность границ, поэтому они имеют оптимальные характеристики прочности. В России в настоящее время применяются монокристаллические сплавы для рабочих лопаток ЖС32 и ЖС36ВИ, разработанные в ВИАМ.

Для двигателей наземного применения, использующих в качестве топлива природный или попутный газ, одним из основных критериев выбора материала для лопаток турбины являются характеристики по сопротивлению солевой коррозии. Такие свойства материалу придает увеличенное содержание хрома. В России в турбинах наземных двигателей применяются

коррозионностойкие сплавы ЧС70-ВИ, ЧС-80, ЦНК-7НК. В ВИАМ разработаны перспективные коррозионностойкие сплавы нового поколения ЖСКС-1 и ЖСКС-2. По жаропрочности ЖСКС-1 превосходит существующие сплавы ЦНК-7НК, ЧС-80 и зарубежные аналоги GTD-111, IN738L, не уступая им по сопротивлению горячей коррозии. Безуглеродистый сплав ЖСКС-2, легированный 2% тантала и 1 % рения, и предназначенный для литья монокристаллических лопаток, по жаропрочности не уступает авиационным сплавам направленной кристаллизации ЖС30-НК и ЖС26-ВНК, значительно превосходя последние по сопротивлению солевой коррозии [9].

За рубежом в середине 1960-х на первой ступени наземной турбины для рабочих лопаток использовался сплав UDIMET-500 (на основе Ni). В настоящее время он используется на последних ступенях турбины, на некоторых установках GE. Сплав IN738 (на основе Ni) использовался для рабочих лопаток первой ступени в 1971-1984 годах. В настоящее время его используют для рабочих лопаток второй ступени. Сплав имеет прекрасную комбинацию высокотемпературной прочности и устойчивости к горячей коррозии, что делает его привлекательным для применения в наземных турбинных установках. GE разработали сплав GTD-111 по прочностным показателям превышающий IN738. GTD-111 заменил IN738 как материал рабочих лопаток в различных моделях наземных турбинных установок GE. Для сопловых лопаток используются сплавы на основе Co – X40, X45, FSX414, а также сплав на основе никеля GTD-222 (на 2 и 3 ступенях). Также начинают широко применяться направленно-кристаллизованные (DTD 111, TMD-103 (на основе никеля)) и монокристаллические (CMSX11B, AF56, PWA1483, SC16 (на основе никеля)) сплавы.

Сложнолегированные сплавы с гетерофазной структурой, главными структурными элементами которой являются сложнолегированный никелевый  $\gamma$ -твердый раствор и дисперсные частицы  $\gamma'$ -фазы на основе упорядоченного интерметаллидного соединения  $Ni_3$  (Al, Ti, Nb, Ta) (сверхструктура  $L1_2$ ).

Основными фазами сплава ЖС32 являются твердый раствор на основе никеля и упрочняющая фаза на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$  со сверхструктурой типа  $L1_2$  ( $\gamma'$  фаза). Кроме этого присутствуют карбиды ( $\text{MeC}$  и  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ ), которые выделяются на границах и внутри зёрен. Сплав содержит более 50%  $\gamma'$  фазы и имеет верхний предел рабочих температур  $1050^\circ\text{C}$ .

Наиболее важной фазой для создания подобных суперсплавов на никелевой основе фактически послужила фаза  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Как в самой простой форме  $A_3B$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ), так и в сложной форме  $A_3(BC)$ , например,  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ , и еще в более сложных вариантах, например  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Hf})$ , её свойства во многом определяют механическое поведение этих материалов в широком температурном интервале. Кристаллическая решетка фазы  $\text{Ni}_3\text{Al}$  совпадает с кристаллической решеткой фазы  $\text{Cu}_3\text{Au}$ . Она повторяет элементарную ячейку фазы  $\text{Cu}_3\text{Au}$ , но теперь в центрах граней расположены атомы  $\text{Ni}$ , в вершинах куба — атомы  $\text{Al}$ . Поэтому при составе, близком к стехиометрическому (атомные доли:  $\text{Ni}$  — 0,75,  $\text{Al}$  — 0,25), вполне упорядоченное состояние сохраняется вплоть до значений  $T_{nl}$ .

Фазовая диаграмма бинарной системы  $\text{Ni}$  —  $\text{Al}$  является важной для конструирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Она приведена на рисунке 1.4.

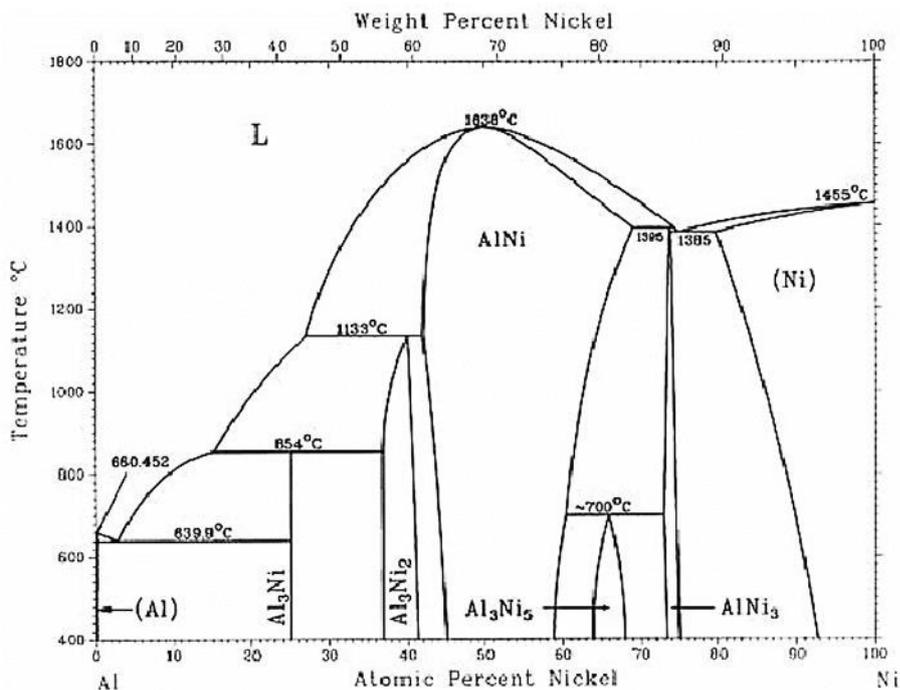


Рисунок 1.4. Диаграмма фазового состояния двойной системы Ni — Al

Сверхструктура  $L1_2$  ( $\gamma'$ -фаза) реализуется при комнатной температуре в интервале концентраций 22,3—27,0 ат. % Al. С увеличением температуры концентрационная область существования фазы  $Ni_3Al$  уменьшается.

При концентрации Al меньше стехиометрической,  $\gamma'$ -фаза ( $Ni_3Al$ ) соседствует с  $\gamma$ -фазой — твердым раствором Al в Ni на базе ГЦК-решетки. Растворимость Al в Ni значительно понижается с уменьшением температуры. В соответствии с этим фазы  $\gamma$  и  $\gamma'$  разделены широкой (при 673 К более 15 ат. %) двухфазной областью состава  $\gamma + \gamma'$  [10].

### 3. Причины повреждения лопаток турбины

Повреждение и разрушение рабочих лопаток турбин высокого давления (ТВД) и турбин низкого давления (ТНД) может возникнуть в результате следующих воздействий [11], [12], [13]:

1) Вследствие образования усталостных трещин. При этом основными дефектами рабочих лопаток ТВД являются трещины на профиле пера со стороны корыта и спинки, трещины на торце пера лопатки (вдоль оси лопатки), растрескивание на кромке отверстий перфорации, поверхностное растрескивание покрытия на входной кромке пера лопатки, пятна на пере лопатки.

2) Вследствие попадания в проточную часть посторонних предметов (рисунок 1.5). Например, прогар жаровых труб камеры сгорания приводит к повышению температуры перед ТВД, а в некоторых случаях при попадании частичек жаровой трубы на лопаточный аппарат ТВД и ТНД, и к их разрушению.



Рисунок .15. Лопатки ТНД ГТД ГТК-10-4 с забоиной [13].

3) В результате превышения предельно допустимой температуры газов (рисунок 1.6). Характерными дефектами в этом случае являются: местное выкрашивание, вытяжка или обрыв части пера рабочей лопатки,

термоусталостное растрескивание, выгорание легирующих элементов поверхностного слоя, рост зерна в лопатках из никелевых сплавов, сильная эрозия при исчезновении защитного покрытия [13].



Рисунок 1.6. Местное выкрашивание лопатки ТВД ГТД ГТН 25 (наработка 32152 ч.) [13].

4) Часть разрушений обусловлена причинами технологического характера: следы касания торца пера лопатки о вставки, литейные дефекты в виде раковин и оксидных включений. Наибольшее количество отказов приходится на рабочие лопатки, прошедшие ремонт.

5) Оплавление лопаток турбины вызывается преимущественно попаданием конденсата в топливный газ, а прогары полых охлаждаемых лопаток — нарушениями в работе системы их охлаждения, иногда (при встроенных камерах сгорания) чрезмерной длиной факела.

6) Коррозионное повреждение лопаток, снижающее предел выносливости их материала на 10—30%.

7) В редких случаях разрушения обусловлены повторными, периодически повторяющимися термическими напряжениями при частых пусках и остановках турбин [13].

В процессе эксплуатации на сегментах соплового аппарата могут возникать поры или цепочки пор, микротрещины, трещины, рыхлоты,

растрескивания поверхностного слоя, забоины, смятие материала (рисунок 1.7), вырывы материала на гребешках уплотнений, выработка материала по поверхностям вращения, биения, засорения щелей. Также встречаются литейные дефекты в виде раковин и окисных включений. Поры проявляются на поверхности в виде отдельных (локальных) дефектов. Рыхлота является следствием деградации основного материала и потери им прочностных свойств, например, вследствие термоциклической усталости. Забоина, смятие материала — дефект, возникающий при механическом воздействии на поверхность инородного тела [13], [14].



Рисунок 1.7. Деформация в виде забоин и вырывов материала соплового блока ГТУ ГТН25 [13].

Таким образом, лопатки компрессоров и турбин подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок, кроме того, лопатки испытывают циклические, термические напряжения; работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре и подвергаются газовой коррозии [5]. Лопатки ГТД имеют сложную пространственную геометрию и изготавливаются из трудно-деформируемых материалов: жаропрочных никелевых и титановых сплавов. К ним предъявляются повышенные требования по структуре металла, его химическому составу, механическим

свойствам, геометрическим размерам и наличию дефектов (заковы, прострелы, пережоги, прижоги и т.д.) [4], [15].

#### **4. Существующие методы ремонта лопаток**

Рабочие лопатки турбины газотурбинных установок имеют установленный разработчиком ресурс работы (обычно 25 000 часов). Поскольку ЖНС обладают довольно высокой стоимостью, то ремонт изношенных изделий часто является экономически целесообразным решением, чем замена. Например, компоненты турбинного двигателя, такие как рамы, ковши и лопатки, могут ремонтироваться несколько раз в течение срока их службы. В общем случае ремонт заключается в выполнении следующих операций: демонтаж лопаток, чистка, дефектация, восстановление микроструктуры основного материала, восстановление геометрии и формы, восстановление покрытий, контроль качества [1]. Поскольку исходная микроструктура основного металла может быть претерпеть изменения при воздействии повышенной температуры, то технологические приёмы процесса ремонтной сварки/наплавки, могут значительно отличаться от используемых для первоначального изготовления. В случае дисперсно-упрочненных (precipitation – strengthened) и монокристаллических сплавов, состав присадочных материалов может отличаться от основного металла. В ситуациях, когда после сварки для восстановления механических свойств требуется термическая обработка, растрескивание может быть проблемой, особенно в высокоэффективных сплавах, упрочненных выделением фазы гамма-штрих ( $\gamma'$ ) и / или гамма-2 штриха ( $\gamma''$ ) [16].

##### **4.1. Восстановительная термообработка**

В деталях высокотемпературных ступеней турбины, работающих продолжительное время при высокой температуре и больших нагрузках, происходит потеря начальных эксплуатационных свойств. В ходе такой эксплуатации происходит деградация микроструктуры. Для снижения стоимости жизненного цикла лопаток турбины были разработаны процессы

для ее восстановления к исходному состоянию. Процесс включает в себя горячее изостатическое прессование (ГИП) и восстановительную термообработку [17].

Восстановительная термовакуумная обработка (ВТВО) один из способов устранения нежелательных изменений в структуре и свойствах сплава лопаток, полученных в процессе эксплуатации. Необходимость применения восстановительной термообработки при ремонте лопаток определяется по структурному состоянию материала, которое оценивается электронно-микроскопическим методом, и механическими свойствами материала после наработки лопаток в составе двигателя [12]. В работе [18] показана возможность полного восстановления структуры и свойств сплава ЖС6У-ВИ, подвергнутого воздействию высоких эксплуатационных температур путем проведения ВТВО.

Восстановительную термообработку проводят в вакуумных печах при остаточном давлении не более  $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст. и скорости охлаждения не менее 40 град/мин, что обусловлено не только защитой детали от окисления, но и возможностью удаления газа из микродефектов материала лопатки, что необходимо для более успешного их залечивания [12].

Выбор оптимального режима ВТВО определяется конструктивными особенностями восстанавливаемых лопаток и состоянием их материала, которое зависит от продолжительности работы при наиболее «жестких» режимах. Температура процесса ВТВО должна быть в большинстве случаев достаточна для полной гомогенизации сплава, что позволяет достичь исходной плотности дислокаций, а также обеспечить оптимальную морфологию и размеры частиц упрочняющей фазы.

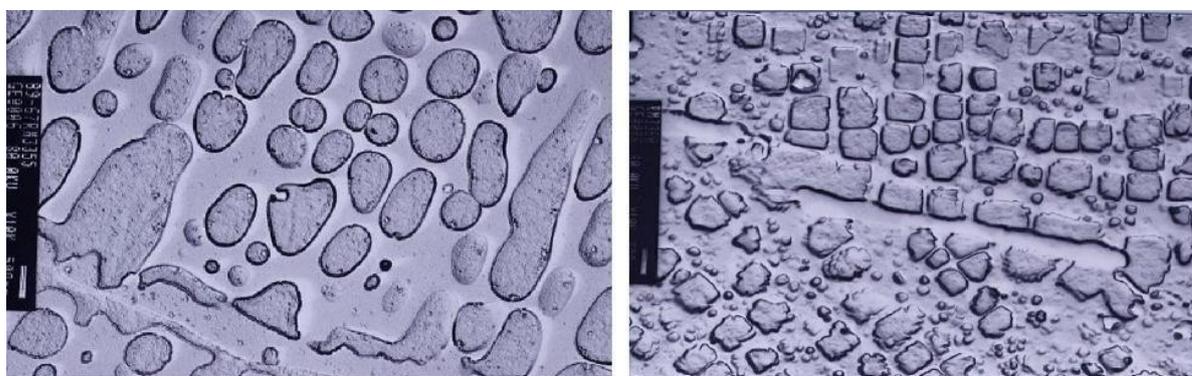
Продолжительность ВТВО определяется компромиссом между необходимостью достаточно полного «залечивания» микропор по границам зёрен и предотвращением значительного распада монокарбидной фазы. Отрицательные последствия последней реакции связаны не только с образованием двойных карбидов неблагоприятной морфологии, но и с

разупрочнением твердого раствора из-за обеднения тугоплавкими легирующими элементами областей вокруг этих выделений. Для сплавов с устойчивой монокарбидной фазой такой опасности не существует, и они могут подвергаться вакуумной восстановительной обработке многократно [19].

Применяемая на ряде российских предприятий ВТВО по режиму высокотемпературной гомогенизации не обеспечивает стабильного восстановления структуры и свойств, вследствие сохранения микропористости в лопатках, что приводит к существенному снижению эксплуатационных свойств, в частности предела выносливости [20].

Сущность ГИП заключается в одновременном воздействии на обрабатываемую деталь высокого давления и высокой температуры. В результате ГИП происходит залечивание внутренних дефектов структуры сплава, вследствие чего увеличивается плотность материала сплава, уменьшается дефектность тонкой структуры, повышаются эксплуатационные характеристики детали (усталостная и длительная прочность) [21].

На рисунке 1.8 проведено сравнение микроструктуры сплава GTD111 после наработки в течение 24000 часов и после восстановления до исходной микроструктуры с применением восстановительной термической обработки в комплексе с ГИП.



а)

б)

Рисунок 1.8. Сплав GTD111 после 24000 часов эксплуатации (а); после восстановительной термической обработки в комплексе с ГИП (б)

Восстановительная термическая обработка полностью перестраивает микроструктуру лопатки после эксплуатации. Параметры восстановительной термической обработки существенно отличаются от параметров термообработки при изготовлении новых деталей. Для ускорения диффузии процесс ведут при высоких температурах, но не превышающих температуры ликвидуса сплава и температуры начала интенсивного роста зерна.

Следует отметить, что монокристаллические сплавы в контексте восстановительных работ требуют отдельного рассмотрения. Восстановительная термообработка может вызвать рекристаллизацию материала лопатки, что не согласуется с их изначальной монокристаллической природой. Поэтому при разработке для них восстановительной термообработки необходимо учитывать склонность к рекристаллизации для каждого конкретного сплава [22].

#### **4.2. Диффузионная пайка**

Технологию диффузионной пайки используют для ремонта трещин в некритичных областях стационарных компонентов.

В компании Siemens технология диффузионной пайки используется для ремонта мелких усталостных трещин сопловых лопаток, качество ремонта которых сильно зависит от степени очистки поверхности и микротрещин под пайку. Зачастую очистку осуществляют ионами фторидов, также используют механические способы (рисунок 1.9) [23].



Рисунок 1.9. Очищенная трещина в сплаве на основе кобальта [23].

Технология диффузионной пайки также с успехом применяется компаниями Pratt&Whitney aircraft [24] и Liburdi Engineering Ltd [25] при ремонте и производстве деталей из жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта [1].

#### **4.3. Дуговые технологии ремонта лопаток**

Благодаря простоте, доступности и низкой себестоимости дуговые методы ремонта лопаток являются самыми распространёнными. К примеру, сотрудники фирмы Alstom [26], ориентируясь снижением стоимости ремонтных операций, производит восстановление поврежденных деталей из жаростойких сплавов методами аргонодуговой наплавки, рисунок 1.10.

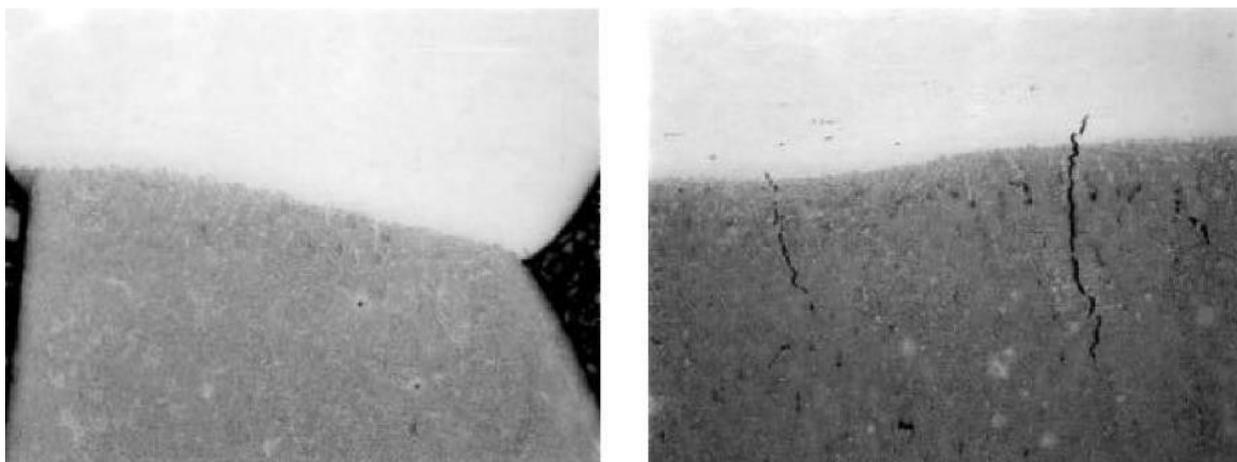


Рисунок 1.10. Локальный ремонт аргодуговой сваркой входной кромки статорной лопатки из сплава IN939 с использованием присадочной проволоки IN625. Зона термического влияния приблизительно 0,5 мм [26].

Подобный локальный ремонт с использованием технологии аргодуговой наплавки также применяется для восстановления торцов пера лопаток (сплав IN738) ротора. Авторы [27] отмечают существенно меньшее растрескивание зоны термического влияния. Наплавку реализовали при минимальной длине дуги.

Компания Nickham Industries, Inc [28] использует процесс аргодуговой сварки неплавящимся электродом для восстановления лопаток из направленно-закристаллизованного сплава GTD111. Технология ремонта подразумевает использование камер с контролируемой атмосферой, а также предварительную и последующую сварочную термообработку. Сварочное соединение без растрескивания было получено с использованием присадочного материала IN738LC и Rene 80. Усталостные испытания восстановленных изделий показали, достижение 80% свойств основного.

Chromalloy HIT и Siemens-Westinghouse Power Corp. [29] успешно применяют технологию аргодуговой сварки неплавящимся электродом при ремонте рабочих лопаток высокотемпературной секции турбины из литого сплава IN738 и направленно-закристаллизованного Mar-M002. Перед наплавкой проводят индукционный нагрев лопатки до температуры 900°C.

Металлографические исследования подтвердили отсутствие растрескивания металла лопатки и сварного соединения. Усталостные испытания показали восстановление свойств металла лопатки на уровне 70-80% свойств основного металла.

Как показал анализ некоторых работ помимо преимуществ аргонодуговой наплавки, данному способу также присущи недостатки: вследствие прямого расплавления основного металла дугой, формируется значительная зона термического влияния с крупнозернистой структурой, требующая последующей термической обработки; формируются припуски до нескольких миллиметров на последующую механическую обработку; низкая производительность и точность обработки, возникающие значительные сварочные напряжения [1], [30].

Для снижения объёмных сварочных напряжений, образующихся при выделении  $\gamma'$ -фазы из твёрдого раствора в ЗТВ и металле шва, и подавления трещинообразования предложен метод импульсной аргонодуговой наплавки путём равномерного плёночного расплавления основного металла ЖС6 на глубину до 0,2-0,3 мм [31]. В данном методе основной металл расплавляется за счёт теплоты расплавленного наплавляемого материала. Предложенный метод не исключает образование напряжений: объёмные напряжения заменяются линейными. Для снятия напряжений, восстановленные лопатки требуют последующего отжига при температуре 950 °С в течение 3 часов. Так же необходима последующая механическая обработка. К сожалению, существующие дуговые методы восстановления рабочих лопаток промышленных ГТД характеризуются низкой эффективностью: коэффициент выхода годного изделия составляет изделия 15...25%, коэффициент использования материала – 10...20%, поэтому интересны иные, более эффективные, методы восстановления лопаток [1].

#### 4.4. Плазменные технологии ремонта

Sermatech разработал процесс для восстановления торца пера лопатки и ремонта трещин с использованием плазменного источника нагрева [32].

Использование порошкового присадочного материала с композицией соответствующей основному металлу способствовало применению этого процесса для ремонта наиболее ответственных сплавов IN738 и GTD111. Нанесение слоя толщиной до 2,3 мм позволило получить усталостную прочность наплавленных слоёв на уровне 79% от базового материала.

Для ремонта поверхностных дефектов на ММПП «Салют» (Москва, Россия) применяют малогабаритные плазмотроны с самоустанавливающейся длиной дуги и с осевой подачей рабочего газа - аргона или его смесей с азотом или водородом. Подача напыляемого материала осуществляется на срезе сопла-анода. Дуга в таких плазмотронах характеризуется невысоким напряжением. Для получения дуги с мощностью, достаточной для качественного напыления, необходимы большие токи (300-500А). При этом ресурс стержневого вольфрамового катода и выходного электрода-анода с ростом тока значительно уменьшается. Нарушение формы сопла плазмотрона отрицательно отражается на качестве покрытия [12].

Для расширения возможности ремонта эксплуатационных и литейных дефектов на деталях и узлах, изготовленных из высоколегированных литейных сплавов, а также получения стабильных результатов, применялась аргонно-плазменная установка, разработанная в НИИЭМ МПУ им. Н.Э. Баумана. Одним из важных достоинств плазменного напыления порошковых материалов является то, что расплавленные частицы порошка, деформируясь при ударе о поверхность детали, образуют структуру покрытия с минимальной пористостью. Как локальный источник нагрева, он в достаточной мере отвечает требованиям, которые накладывают на него металлургические и технологические свойства сплавов типа ЖС6У и особенности ремонтируемых деталей и узлов ГТД [12].

#### **4.5. Электронно-лучевые технологии ремонта лопаток**

На заводе ММПШ «Салют» (Москва, Россия) отработана технология восстановления титановых лопаток компрессора газовой турбины, имеющих местные повреждения, превышающие допустимые нормы [33]. Процесс заключается в приварке цилиндрических вкладышей, изготовленных из того же материала, что и лопатка. Поврежденный участок лопатки удаляют фрезерованием. Затем изготавливают вкладыш соответствующего диаметра и подгоняют по месту фрезерования пера лопатки. Вкладыш закрепляют на лопатке специальным приспособлением и вместе с лопаткой помещают в вакуумную камеру электронно-лучевой установки. Сварка проводится в условиях глубокого вакуума, рисунок 1.11 [12].

Сложность получения качественного сварного соединения с минимальными деформациями лопаток заключается в том, что лопатки имеют переменную толщину, при этом наиболее сложными участками являются входная и выходная кромки лопаток. Перегрев этих участков может вызвать нежелательные последствия, такие как провисание шва и коробление кромки. Во избежание подобного рода дефектов необходимо обеспечить равномерное перемещение электронного луча по стыку и минимальную литую зону сварного соединения [12].

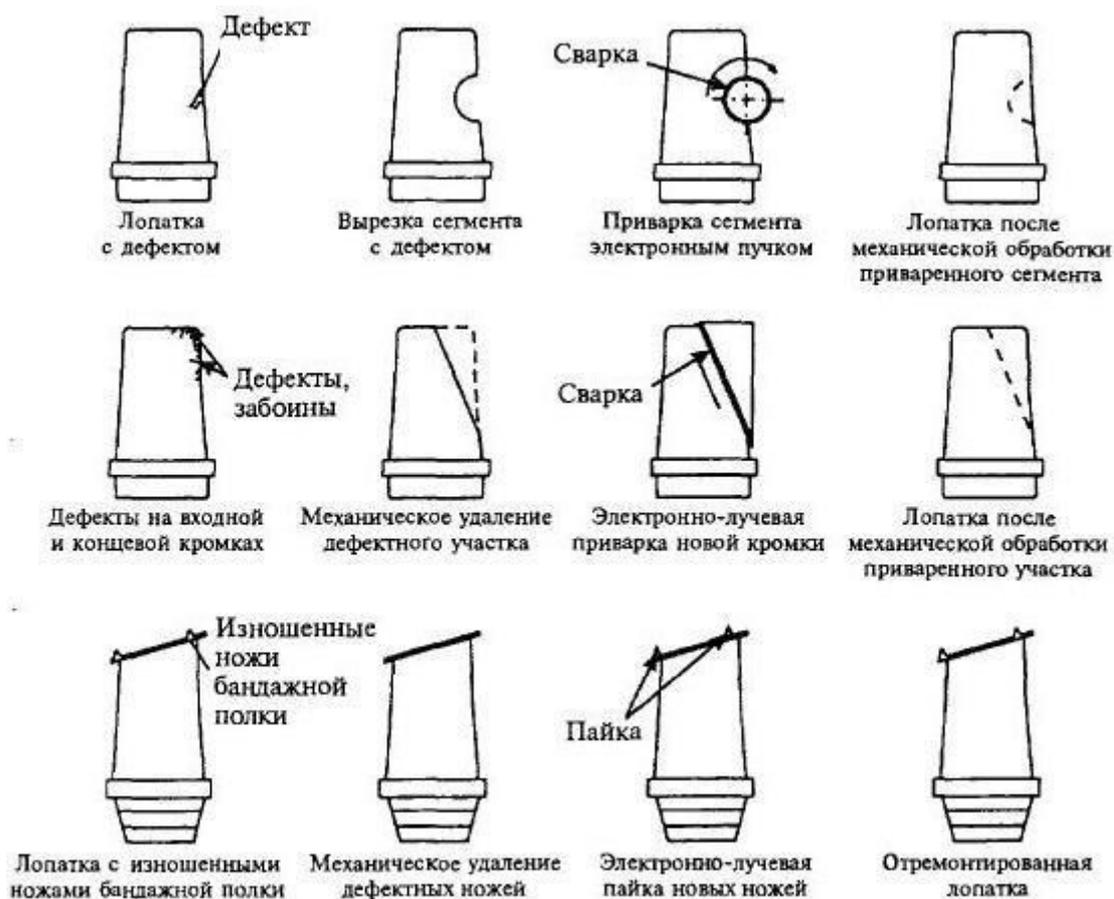


Рисунок 1.11. Схема проведения ремонта титановых рабочих лопаток компрессора газовой турбины с применением технологии электронно-лучевой сварки [12].

После сварки осуществляют визуальный контроль сварного шва, затем вкладыш отрезают параллельно кромке лопатки электроимпульсным способом, шлифуют и полируют с обеих сторон для получения нужного профиля. Далее проводят рентгеновский контроль сварного шва, термическую обработку в виде отпуска по стандартному режиму для снятия внутренних напряжений, окончательную полировку и виброгалтовку пера лопатки [12].

На фотографии ниже приведен еще один пример восстановительного ремонта лопатки компрессора из сплава титана, рисунок 1.12.



Рисунок 1.12. Лопатка из сплава Ti6Al4V с приваренной вставкой электронно-лучевым методом (Precision Technologies, Inc)

Для восстановления поверхности лопаток компрессора ГТД ряд авторов предлагают использовать технологию электронно-лучевой наплавки [34], [35]. Несмотря на преимущества данной технологии, схожие с преимуществами лазерной наплавки, способ имеет ограничения по габаритным размерам восстанавливаемых заготовок, зависящих от размеров вакуумной камеры, на создание вакуума в которой также требуется время [1].

#### **4.6. Лазерные технологии ремонта лопаток**

Первый промышленный ремонт лопаток наземной турбины лазерной сваркой был проведен в 1994 году [36]. Был использован метод с подачей порошка, результаты оказались обнадеживающими.

Наиболее интересными являются работы, в которых приведён сравнительный анализ результатов ремонта лопаток с использованием различных технологий. Так в работе [37], автор описывает результаты восстановления лопаток турбостартера авиационного винтового двигателя НК-12МП, изготовленных методом литья из сплава ЖС6К (ТУ 1 -809-1025-98) с использованием технологий вакуумной пайки и импульсной лазерной

наплавки самофлюсующегося высокотемпературного припоя ВПР24 с дисперсностью 100-315 мкм, а также технологий аргонодуговой наплавки и импульсной лазерной наплавки сварочной проволоки ХН60ВТ. Результаты восстановления лопаток: их внешний вид и микроструктура - представлены на рисунке 1.13.

По результатам исследования микроструктуры, измерения твёрдости металла наплавленных слоёв и прилегающего к нему основного металла, а также с учётом коэффициента линейного расширения металла наплавленных валиков автор отдаёт предпочтение технологии импульсной лазерной наплавки самофлюсующегося припоя ВПР24. Выбор объясняется низкой дисперсностью структуры наплавленного металла, наивысшими значениями и равномерным распределением твёрдости наплавленных слоёв благодаря равномерному распределению упрочняющих интерметаллидов, а также высокой производительностью процесса.

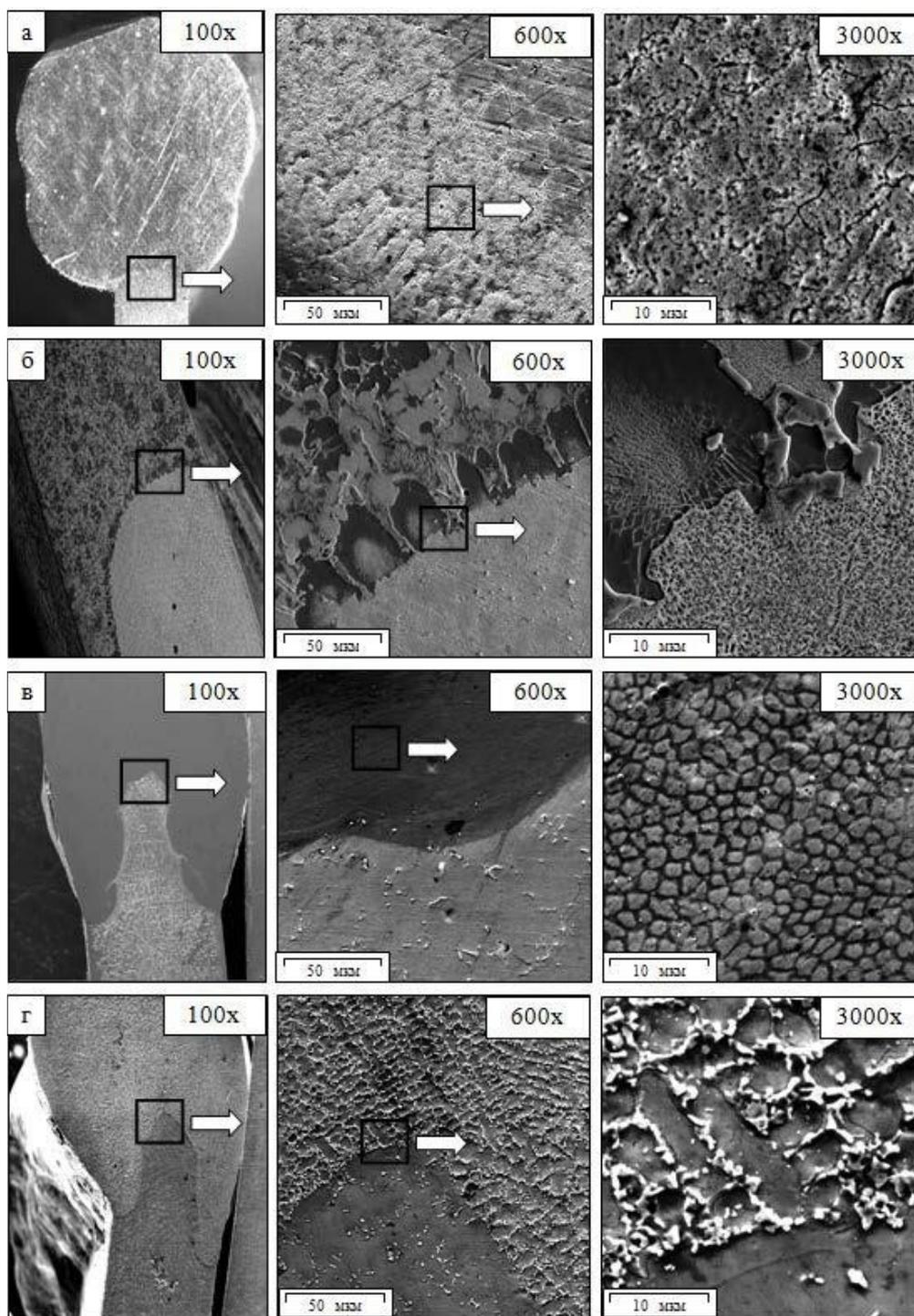


Рисунок 1.13. Результаты восстановления лопаток турбостартера:

а – аргонодуговая наплавка с присадочной проволокой ХН60ВТ;

б – вакуумная печная пайка с припоем ВПр24;

в – лазерная импульсная наплавка с присадочной проволокой ХН60ВТ;

г – лазерная импульсная порошковая наплавка с припоем ВПр24 [37].

Касательно других методов восстановления необходимо отметить, что технология аргонодуговой наплавки показала себя с наихудшей стороны из-за широкой ЗТВ, низкой производительности, а также низкой твёрдости наплавленного материала. При восстановлении лопаток с использованием технологии вакуумной пайки получена крупнодисперсная структура наплавленных слоёв, склонная к охрупчиванию из-за высокого содержания интерметаллидов. При импульсной лазерной наплавке с использованием присадочной проволоки ХН60ВТ отмечается наличие мелкодисперсной структуры с размерами зерна 3-6 мкм, а также низкие значения твёрдости наплавленного слоя и низкая производительность процесса.

Результаты исследования технологических характеристик слоёв, образованных при лазерной и аргонодуговой наплавке порошковых материалов на никелевой основе Inconel 625 и Rene 142 на подложку, в качестве которой также использовали никелевые сплавы C1023, Inconel 792, Rene 80, Rene 125, DS Rene 142, используемые при изготовлении лопаток ГТД, описаны в работе [38]. В качестве источника лазерного излучения использовали CO<sub>2</sub>-лазер фирмы Rofin Sinar мощностью 1 кВт. Авторы отмечают снижение сварочных деформаций, однородное распределение твёрдости как вдоль, так и поперёк наплавленного слоя, наличие переходной зоны меньшей толщины, а также минимальное количество внутренних дефектов при лазерной наплавке.

Преимуществами технологии металлопорошковой лазерной наплавки перед технологиями аргонодуговой, плазменной и электронно-лучевой наплавки также являются минимальный припуск под последующую механическую обработку (около 100 мкм), узкая зона термического влияния (до 100 мкм), наличие мелкозернистой структуры наплавленного слоя, минимальный (локальный) энергозатрат, увеличение ремонтной площади поверхности лопатки ГТД, отсутствие необходимости последующей термической обработки, а также повышенные механические характеристики наплавленного слоя [1], [39], [40].

В работе [40] также приведены результаты экспериментального исследования влияния времени воздействия и мощности лазерного излучения при наплавке порошка Stellite 6L на хромоникелевый сплав 12CrNi на структуру, твёрдость и долю участия основного металла в наплавленном слое. В качестве источника лазерного излучения использовали CO<sub>2</sub>-лазер. По результатам эксперимента авторы отметили увеличение твёрдости, уменьшение размера зерна структуры, а также снижение доли основного металла в наплавленном слое при снижении времени воздействия и мощности лазерного излучения.

Результаты обработки торца пера лопатки импульсной лазерной наплавкой, с использованием импульсно-периодического твердотельного Nd:YAG лазера, в составе лазерного комплекса HTS-Mobile 300 (ОКБ «Булат»), представлены в работах [1], [41]. Подачу присадочной проволоки диаметром 0,4 мм в процессе наплавки осуществляли вручную. Наплавку выполняли с варьированием длительности импульса излучения 0,2-20 мс, частоты следования импульсов излучения 1-20 Гц и диаметра пятна лазерного излучения 0,25-2 мм. В результате экспериментальных исследований была отработана технология восстановления торца пера лопатки с общей высотой наплавленных слоёв 0,8 мм, значением твёрдости, превышающей твёрдость ОМ, и мелкодисперсной структурой наплавленного металла рисунок 1.14.

По результатам металлографического исследования внешних и внутренних дефектов не обнаружено.

Основным недостатком разработанной технологии является отсутствие автоматизации технологического процесса [1].



Рисунок 1.14. Поперечный макрошлиф торца пера лопатки [41].

Следует отметить, что в линейке ОКБ «Булат» присутствует технологический комплекс для импульсной лазерной наплавки с системой автоматической подачи проволоки, автоматической фокусировки лазерного луча и перископической насадкой. Такая автоматизация позволяет повысить качество и производительность процесса ремонта лопаток.

Технологии импульсной лазерной наплавки позволяют наплавлять сплавы на никелевой, кобальтовой и титановой основах [42]. Примеры отечественного и зарубежного комплекса на базе импульсно-периодического твердотельного лазера представлены на рисунке 1.15.

К основному недостатку приведенных комплексов можно отнести отсутствие кассетной оснастки, позволяющей перейти от штучной наплавки каждой лопатки к автоматизированной наплавке набора однотипных лопаток [1].



а)



б)

Рисунок 1.15. Комплекс для лазерной наплавки:  
а - LRS-PRO (ОКБ «Булат»); б - PSM 400 (Schunk) [1], [42].

В рамках проекта Awfors были проведены исследования технологической возможности ремонта лопаток компрессора, изготовленных из титанового сплава Ti6242, с использованием технологии лазерной наплавки [43]. В процессе отработки технологии лазерной наплавки были проведены механические испытания наплавленных слоёв, показавшие повышенные значения предела прочности и предела текучести по сравнению с материалом подложки. По результатам ремонта лопаток авторы дали высокую оценку технологии лазерной наплавки, указав на перспективность её применения.

При исследовании технологических возможностей лазерного комплекса LENS 850R (OPTOMEC), изготовленного на базе волоконного лазера, генерирующего лазерное излучение в непрерывном режиме с максимальной мощностью 1 кВт, проводили работы по восстановлению торца пера входной и выходной кромок титановых лопаток ГТД. В качестве наплавляемого материала использовали порошок на титановой основе дисперсностью 40 – 120 мкм [44]. В рамках исследования были

восстановлены 2-е лопатки: у первой - торец пера, у второй - кромки и торец. Наплавку осуществляли при

изменении мощности лазерного излучения со 150 Вт (1-й и 2-й слои) до 200-250 Вт (3-й и 4-й слои) и 300-350 Вт (5-й и 6-й слои). Внешний вид восстановленных лопаток представлен на рисунке 1.16.

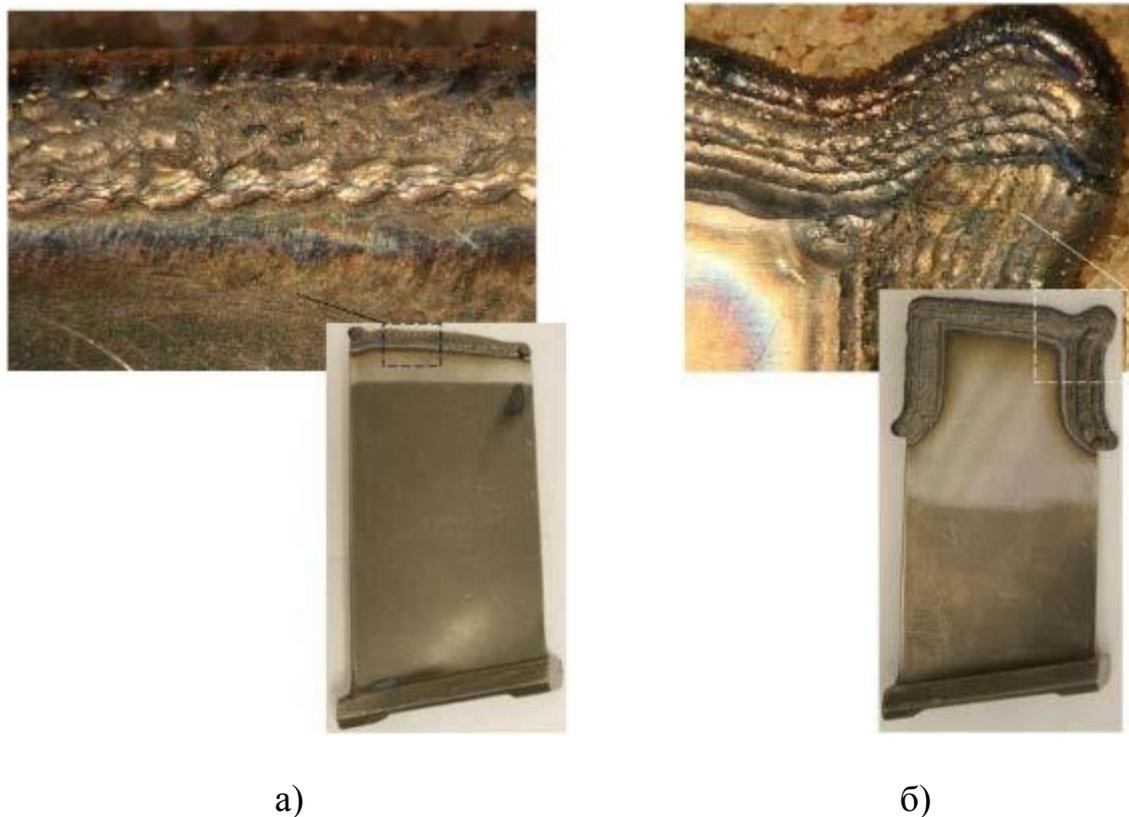


Рисунок 1.16. Внешний вид восстановленных лопаток:

а – восстановлен торец лопатки; б – восстановлены кромки и торец лопатки [44].

Приведенные в работе результаты подтвердили принципиальную возможность использования данного класса оборудования для восстановительного ремонта рабочих лопаток ГТД. Тем не менее, используемые параметры режима далеки от оптимальных, о чём свидетельствует значительный припуск под механообработку, наличие цветов побежалости в ЗТВ, свидетельствующие о некачественной защите зоны обработки, образование слоёв с различными фазовыми составляющими, увеличение микротвёрдости наплавленного металла по сравнению с основой в 1,5-2,5 раза; широкая зона термического влияния (до 0,9 мм), нерасплавленные частицы порошка на поверхности наплавленного слоя,

наличие внутренних дефектов в виде пор, трещин и несплавлений [1], рисунок 1.17.



а)

б)

Рисунок 1.17. Поперечный макрошлиф: а – не травленный (стрелками указаны поры, трещины и несплавления); б – травленный (различный фазовый состав наплавленных слоёв и нерасплавленные частички порошка) [44].

Интересен опыт восстановительной наплавки входных кромок лопаток парогенератора, реализованный на валу ротора [1], [45] сотрудниками частной компании HardWear в 2004 году, рисунок 1.18.

Лазерную наплавку осуществляли с использованием роботизированного комплекса на базе диодного лазера мощностью 3 кВт, порошкового питателя Sulzer Metco и робота-манипулятора Motoman. На лопатки, изготовленные из нержавеющей стали мартенситного класса UNS42000 наплавляли металлические порошки марки Stellite 6 и CC420 (схожий по химическому составу с OM). Наплавку на кромки осуществляли при мощности лазерного излучения 2 кВт и расстоянии между соплом и восстанавливаемой поверхностью 10 мм.



Рисунок 1.18. Ротор парогенератора.

Авторами были получены положительные результаты при восстановлении лопаток парогенератора с использованием порошка марки СС420, что объясняется образованием незначительных внутренних напряжениями из-за схожих коэффициентов линейного расширения наплавляемого материала и ОМ. При восстановлении лопаток с использованием порошка марки Стеллит 6 были обнаружены продольные и поперечные трещины, а также поры. Наличие трещин авторы объясняют различными значениями коэффициентов линейного расширения материалов; образование пор, при многопроходной наплавке - недостаточной мощностью лазерного излучения [46], рисунок 1.19.

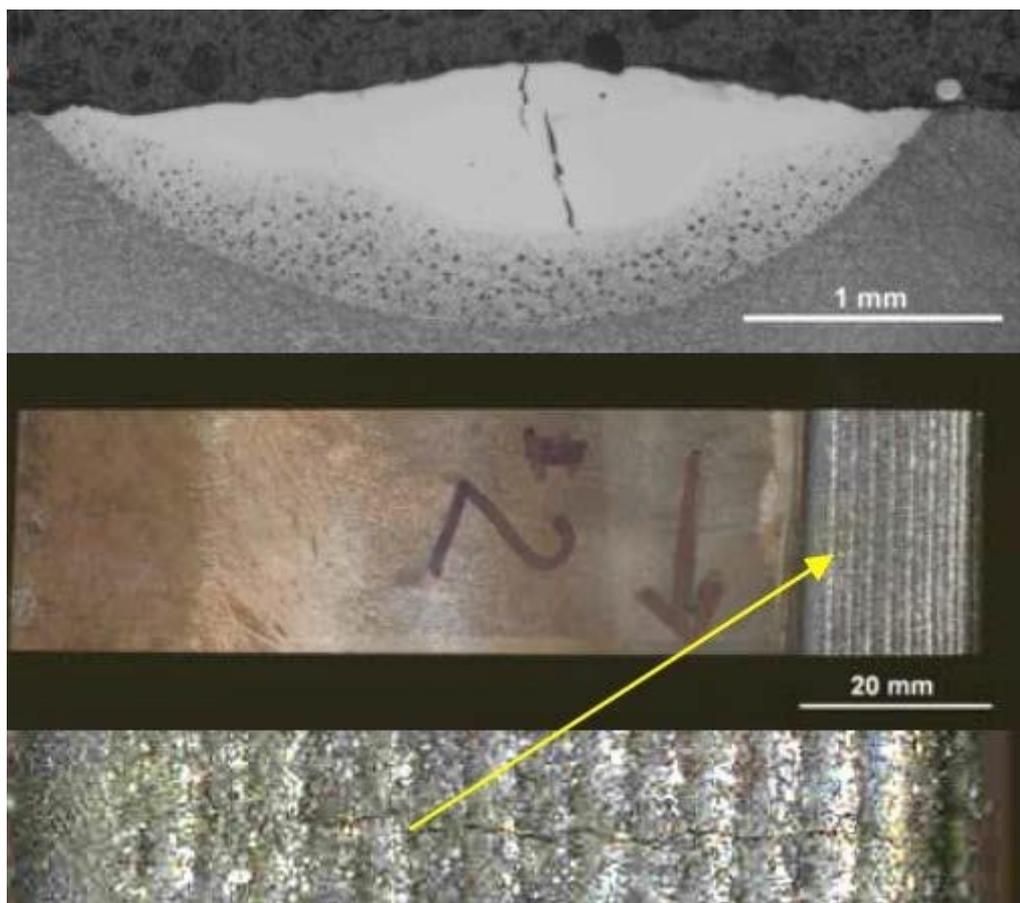


Рисунок 1.19. Трещины при восстановлении лопаток с использованием порошка марки Stellite 6

По результатам исследований, проводимых авторами, образование продольных трещин можно предотвратить, снизив погонную энергию и долю участия основного металла в наплавленных слоях. Для устранения поперечных трещин, помимо вышеперечисленных способов, авторы предлагают сократить длину наплавленных слоёв.

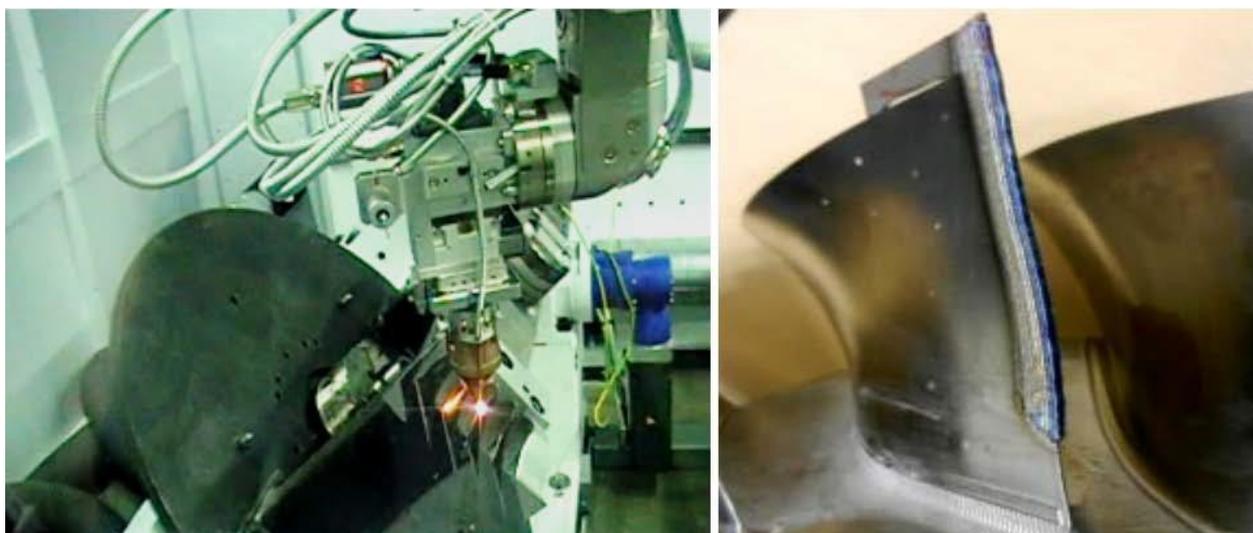
Также в рамках проведённой работы авторами было модернизировано коаксиальное наплавочное сопло и система подачи порошка, что позволило устранить действие сил гравитации в процессе переноса порошка на подложку при наплавке в пространственных положениях, отличных от нижнего.

К основным положительным результатам данной работы следует отнести возможность восстановления лопаток моноколеса парогенератора на валу ротора, что обеспечивает существенную экономию средств по сравнению

с технологиями, требующими устранения дефектной лопатки из состава моноколеса [47], которая, по словам авторов, может достигать 2,3-4,5 млн. долларов США [1].

Известные способы изготовления и ремонта деталей авиадвигателей методами прямого лазерного выращиваия и селективного лазерного плавления [48] по сути, являются многопроходной лазерной наплавкой. Достоинства данных технологий схожи с выше перечисленными достоинствами технологии лазерной наплавки: возможность изготовления деталей сложной формы из дорогостоящих материалов на никелевой и титановой основе с уникальными свойствами, минимальным припуском на последующую механическую обработку при отсутствии деформаций в процессе изготовления/ремонта и наличии минимальной зоны термического влияния. Недостатками являются неапробированность технологии применительно к восстановлению изношенных частей турбинных лопаток, а также использование импортного оборудования [30].

Восстановление лопаток из жаропрочных сплавов на основе титана (BT8M), установленных на моноколесе в компрессоре ГТД ПД-14, на установке TruLaser Cell 7020 (Trumpf), оснащённой твердотельным дисковым лазером мощностью 2 кВт, описано в работе [49] (рисунок 1.20). В качестве присадочного материала применяли сферический порошок гранулометрического состава 45–75 мкм, полученный методом газоструйного распыления заготовки из материала Ti6Al4V в среде инертного газа [49]. Металлографические исследования показали наличие чёткой границы раздела основного и наплавленного металла, отсутствие внутренних дефектов и наличие мелкоигольчатой структуры наплавленного слоя, свидетельствующей о высоких скоростях охлаждения. К преимуществам используемого метода авторы относят, в том числе, его адаптивность, что актуально для различно изношенных поверхностей лопаток. В качестве недостатков можно указать на использование импортного оборудования [1].



а)

б)

Рисунок 1.20. Процесс восстановления входной кромки лопатки ГТД:

а - восстановление входной кромки; б - сектора моноколеса.

Результаты лазерного восстановления лопаток из сплава Inconel 738 для газоперекачивающих станций с применением присадочных порошков на никелевой основе Inconel 625 и Inconel 738, приведены в работе [50]. В качестве источника лазерного излучения использовали твердотельный лазер с длиной волны 1,07 мкм. В обоих вариантах получены качественные валики, при этом в случае использования материала Inconel 738 дополнительно применяли последующую термическую обработку зоны наплавки, позволившую получить наплавленные слои равнопрочные с ОМ. При использовании порошка Inconel 625 механические характеристики наплавленных слоёв отличались меньшими значениями прочностных характеристик по сравнению с ОМ. Также авторы отмечают преимущества использования волоконного лазера перед CO<sub>2</sub>-лазером благодаря лучшему поглощению излучения материалом и простоте доставки лазерного луча в зону обработки [1].

Результаты исследования возможности использования установки LENS 850R (Optomes) для устранения дефектов, образованных при литье и ремонта компонентов авиационных двигателей, изготовленных из сплавов на

никелевой основе (718 и Waspaloy), описаны в работе [51]. В рамках экспериментальных исследований в качестве присадочного материала использовали порошки с одноимёнными названиями. Наплавку осуществляли при варьировании мощности лазерного излучения в диапазоне 150-990 Вт, диаметра пятна лазерного излучения - 0,69 до 2 мм и скорости наплавки - 0,15 до 1,5 м/мин. По результатам исследований в случае использования сплава 718 были получены качественные валики с высокой технологической прочностью и незначительным количеством пор. При лазерной наплавке сплава Waspaloy, чувствительного к трещинообразованию, качественные наплавленные слои были получены при минимальном значении погонной энергии.

Chromalloy HIT and Siemens-Westinghouse Power Corporation создали исследовательскую группу по отработке методов лазерной наплавки сварки IN738 и направленно кристаллизовавшегося сплава Mar-M002 [52]. Использовались достаточно высокие температуры предварительного нагрева (9000С). Испытания показали минимальный уровень пористости; уровень усталостной прочности равнялся 70-80% данного показателя ОМ.

EPRI Repair & Replacement Applications Center (RRAC) провели двухгодичное исследование по применению ремонтной технологии лазерной сварки для сплава IN738 [53]. Использовались присадочные материалы – IN625, IN738, IN939. Удачные результаты были достигнуты с IN625 и IN939. Свободное от трещин сварное соединение с применением IN738 как присадочного материала было также получено, но уровень твердости не соответствовал требованиям. IN625 использовался только для того, чтобы продемонстрировать возможность применения процесса лазерной сварки для  $\gamma'$ -упрочненных сплавов. В ходе исследований было установлено, что IN939 может быть нанесен на IN738 без образования трещин. Прочность соединения составляла 80 процентов от прочности основного материала. Ремонтная технология восстановления лопаток из сплава IN738 с применением присадочного материала IN939 была коммерциализирована в 2001 году.

Honeywell Laser Technology Services использует порошковую лазерную наплавку для ремонта IN738LC [54]. В качестве присадочного материала используется материал, схожий по составу с ОМ. В соединении отсутствуют поры и трещины, оно обладает удовлетворительной прочностью, малой зоной проплавления и узкой зоной термического влияния. Этот процесс также применяется для наземных турбин.

В рамках восстановления рабочих монокристаллических лопаток ГТД, изготовленных из литейного жаропрочного сплава на никелевой основе CMSX-4, были проведены исследования влияния скорости кристаллизации на схему роста кристаллов наплавленных слоёв [55]. Лазерную наплавку порошка идентичного химического состава с дисперсностью 25-75 мкм выполняли с использованием диодного лазера с длиной волны 940-980 нм, максимальной выходной мощностью 680 Вт и диаметром пятна 0,86 мм. Скорость кристаллизации расплава сохраняли в требуемом диапазоне с помощью индуктора мощностью 3 кВт с динамическим контролем частоты от 70 до 450 кГц и пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора температуры ванны расплава, регулирующего мощность лазерного излучения. Лопатку располагали на водоохлаждаемом основании с температурой 18°C. В результате проведённых исследований были получены наплавленные слои без внутренних дефектов, пор и трещин, с эпитаксиальной кристаллизацией. Схожие результаты восстановления лопаток из монокристаллитного никелевого сплава NiCrAlY описаны в работе [56].

Интересен также опыт контроля температуры ванны расплава в процессе лазерной наплавки [57]. При восстановлении лопаток, изготовленных из никелевого сплава, использовали порошок идентичного состава дисперсностью 45-105 мкм, перемещение коаксиальной лазерной наплавочной головки осуществляли манипулятором на базе 4-х осевой установки с ЧПУ-управлением. В качестве источника лазерного излучения использовали твердотельный Nd:YAG лазер (HL3006D) непрерывной

генерации электромагнитного излучения оптического диапазона с максимальной мощностью 3 кВт.

Контроль геометрии наплавленных слоёв осуществляли с помощью регулирования температуры ванны расплава. С этой целью была изготовлена система контроля, состоящая из германиевого фотодиода и ПИД-регулятора температуры ванны расплава. Фотодиод, интегрированный в лазерную наплавочную головку, принимал электромагнитные волны, исходящие от ванны расплава, в диапазоне длин 1300-1600 нм.

Лазерную наплавку осуществляли при мощности лазерного излучения 300 Вт, скорости перемещения 500 мм/мин и массой подаваемого порошка 1,5 г/мин.

Основная технологическая проблема, возникшая при ремонте гребешков бандажной полки лопатки, и для устранения которой авторы изготовили систему контроля температуры ванны расплава, – низкая технологическая прочность (рисунок 1.21в) по причине образования легкоплавких эвтектик по границам зёрен, а также увеличение поперечного сечения в начале и конце наплавленных слоёв (рисунок 1.21б).

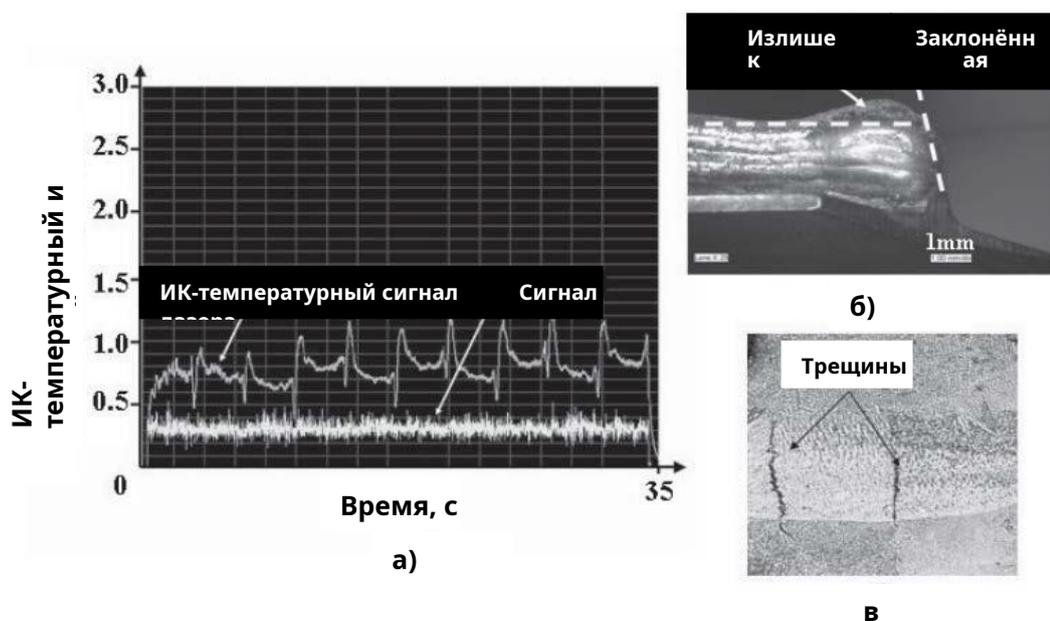


Рисунок 1.21. Восстановление гребешка бандажной полки лопатки без контроля температуры ванны расплава: а – результаты измерения температуры ванны расплава в ИК-диапазоне при постоянном сигнале ПИД-регулятора источнику лазерного излучения ( $P = 300\text{Вт}$ ); б – скос и увеличение поперечного сечения наплавленных слоёв; в – трещинообразование в наплавленных слоях [57].

Для устранения возникших технологических проблем авторы, используя систему контроля, поддерживали постоянной температуру ванны расплава, изменяя мощность лазерного излучения, рисунок 1.22.

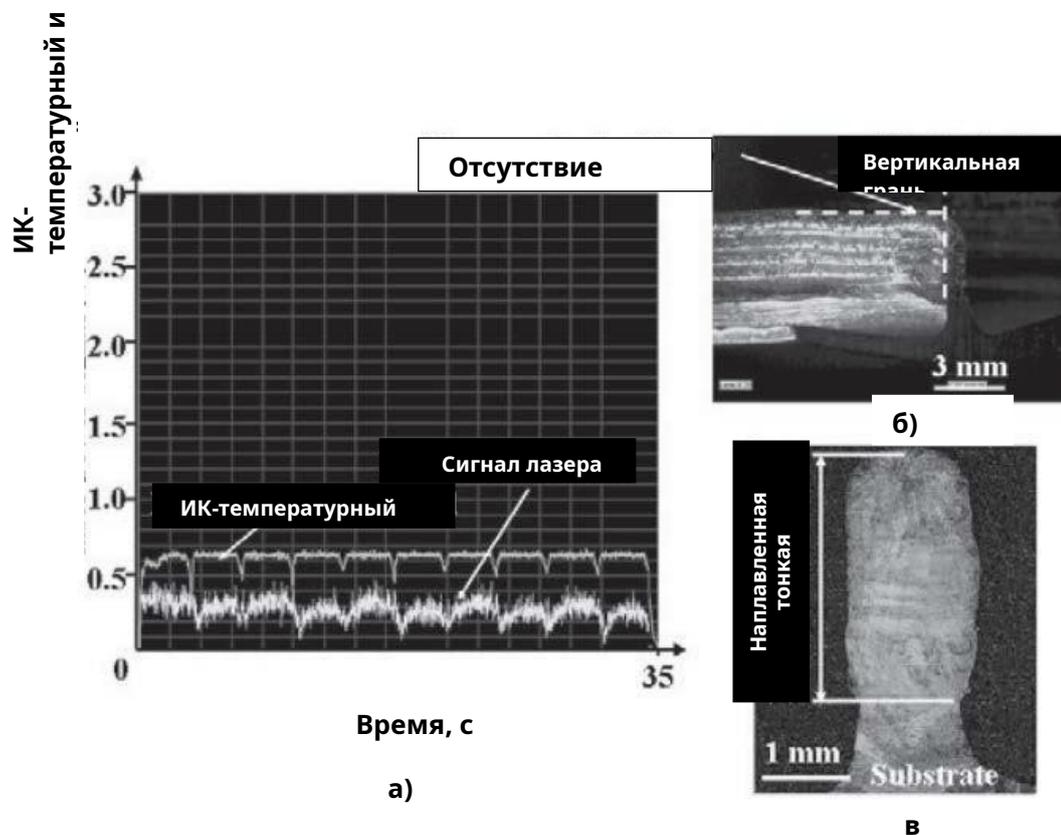


Рисунок 1.22. Восстановление гребешка бандажной полки лопатки с использованием контроля температуры ванны расплава: а – результаты измерения температуры ванны расплава в ИК-диапазоне при переменном сигнале ПИД-регулятора источнику лазерного излучения; б – геометрия наплавленных слоёв; в – поперечный макрошлиф наплавленных слоёв [57].

Таким образом, использование системы контроля температуры ванны расплава при лазерной наплавке обеспечило высокую геометрическую точность и технологическую прочность наплавленных слоёв с мелкозернистой структурой и равномерным распределением твёрдости.

Другим перспективным путем развития технологии ремонта лопаток ГТД является разработка автоматизированных комплексов, объединяющих в себе системы контроля (лазерные радары, лазерные трекеры или контактно-измерительные датчики), механообработки (как предварительной, так и последующей) и лазерной наплавки, либо некоторые из этих систем [1].

Один из таких комплексов был реализован в проекте Reclaim, выполняемом консорциумом английских компаний: Renishaw, Electroх, TWI, Precision Engineering Technologies, Cummins Turbo Technologies, Airfoils Technology International и университетом Де Монфор. Программное обеспечение разрабатывалось компанией Delcam [1].

Данный комплекс оснащён системами контроля геометрии обрабатываемого изделия, механической обработки и лазерной наплавки, обеспечивающими полный цикл обработки лопатки. Цикл восстановления лопатки состоит из нескольких этапов [58]:

1) система контроля на базе 5-и осевого координатного станка с использованием контактного измерительного метода сканирует повреждённую лопатку со скоростью перемещения контактного датчика 300 мм/мин и скоростью сканирования 1000 точек/сек с точностью измерения 10 мкм (рисунок 1.22а);

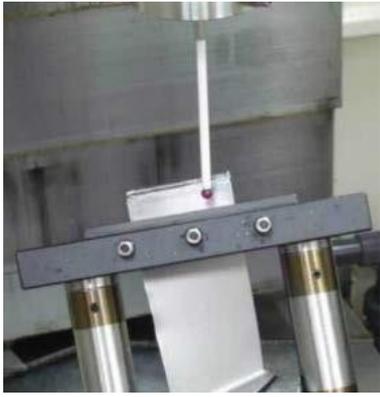
2) полученная в программном обеспечении (ПО) Power Inspect трёхмерная модель лопатки передаётся в ПО Power Shape для её сравнения с исходной моделью;

3) результаты сравнения передаются в ПО Power Mill для разработки технологии механической обработки дефектной поверхности лопатки;

3) после механической обработки осуществляется процесс восстановления поверхности лопатки с использованием технологии лазерной наплавки (рисунок 1.23 б);

4) после восстановления лопатка подвергается окончательной механической обработке (рисунок 1.23 в).

Использование данного комплекса позволяет сэкономить время и средства, устранив транспортировку изделия в процессе её ремонта.



а



б



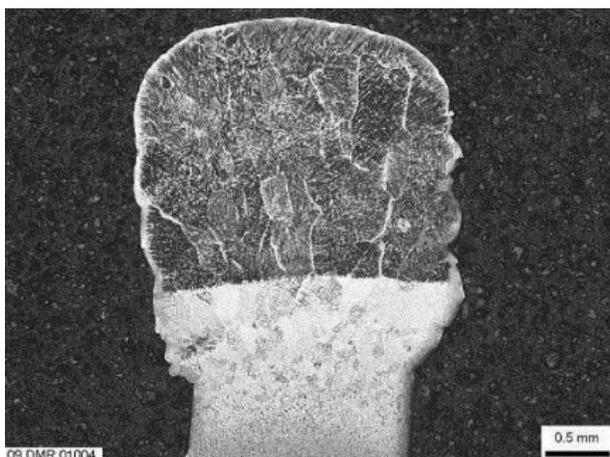
в

Рисунок 1.23. Технологические операции, выполняемые в процессе ремонта лопатки на комплексе Reclaim: а – контроль геометрии лопатки;

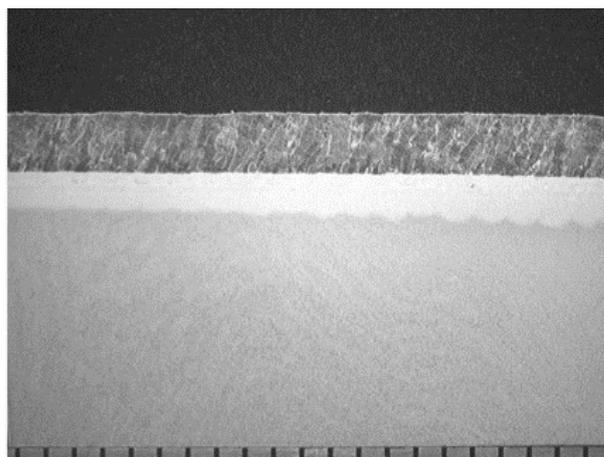
б  
– лопатка после лазерной наплавки; в – процесс окончательной  
механической обработки лопатки

Также необходимо упомянуть об автоматизированном лазерном комплексе LaserTec 65 3D фирмы DMG Mori [59], объединяющем в себе системы лазерной наплавки, механической обработки и системы контроля геометрии изделия. Данный комплекс по своим техническим параметрам и технологическим возможностям вполне может быть использован при ремонте лопаток.

В результате ремонта лопаток с использованием данного комплекса были получены наплавленные валики удовлетворительного качества: с хорошим сплавлением и незначительным количеством пор, рисунок 1.24.



а



б

Рисунок 1.24. Поперечный (а) и продольный (б) микрошлифы наплавленных в процессе восстановления лопатки валиков [59].

Схожий по техническим характеристикам комплекс изготовлен сотрудниками института Fraunhofer и описан в рекламном буклете [60]. Комплекс предназначен для восстановления лопаток ГТД, изготовленных из никелевых сплавов. В комплексе автоматизирован процесс подбора параметров режима лазерной наплавки с учётом геометрии лопатки [1].

## Выводы

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Для обеспечения высокого КПД турбины большое значение имеет предотвращение утечек через радиальный зазор между рабочими лопатками и статором. С целью уменьшения перетекания газов на рабочих лопатках применяют бандажные полки с гребешками лабиринтного уплотнения. Износ лопаток и изменение её формы и геометрических размеров приводит к снижению эффективности турбины.
2. РЛ турбин в процессе эксплуатации подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок, испытывают циклические, термические напряжения, работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре, подвергаются механическому износу. Под воздействием перечисленных факторов происходит разрушение тела лопаток. С экономической точки зрения ремонт изношенных лопаток имеет большую целесообразность по сравнению с полной заменой.
3. Рабочие лопатки из жаропрочных никелевых сплавов изготавливаются как методами пластической деформации, так и методами литья, в том числе с направленной дендритной и монокристаллической структурой. Литейные технологии ЖНС позволяют получать лопатки с большей жаропрочностью. Однако с повышением жаропрочности сплава, усложняется его химический состав и, одновременно, снижается свариваемость. В зависимости от сплава и особенностей сварного соединения для ЖНС характерны как горячие, так и холодные трещины. Получение бездефектной микро- и макроструктуры ЖНС при сварке/наплавке является сложной задачей, требующей как научного подхода к пониманию физических процессов, протекающих в изделии в процессе обработки, так и технологических приёмов, реализующих благоприятное протекание этих процессов.
4. Существующие методы восстановления работоспособности турбинных лопаток имеют ряд технологических ограничений:
  - Методами высокотемпературной вакуумной термообработки возможно

лишь восстановление внутренней микроструктуры лопаток. Применение горячего изостатического прессования позволяет так же залечивать микротрещины.

- Технологию диффузионной пайки используют для ремонта трещин в некритичных областях стационарных компонентов ГТД.
- Способы ремонтной электродуговой наплавки рабочих лопаток промышленных ГТД характеризуются низкой эффективностью. Формируется значительный объём расплава и протяжённая зона термического влияния с крупнозернистой структурой. Выделение  $\gamma$ -фазы из твёрдого раствора в ЗТВ и металле шва приводит к значительным сварочным деформациям и трещинам. Помимо этого, данным методам характерны припуски до нескольких миллиметров на последующую механическую обработку, низкая производительность и точность обработки.
- Электронно-лучевые методы сварки и наплавки хорошо зарекомендовали себя, вследствие высокой плотности мощности в зоне обработки, что позволяет минимизировать энергозатраты в обрабатываемый материал и избавиться от дефектов, характерных для дуговых методов сварки. Однако главным ограничением электронно-лучевых технологий сварки и наплавки является необходимость создания глубокого вакуума. Как следствие стоимость оборудования, производительность процесса и размеры обрабатываемых изделий зависят от размеров рабочей камеры.
- Методы лазерной наплавки имеют преимущества, схожие с преимуществами электронно-лучевой наплавки. В отличие от электронно-лучевых, лазерные технологии не требуют создания вакуума, что позволяет производить обработку в локальной газовой защите ванны расплава. Однако существующие методы ремонтной лазерной наплавки не в полной мере удовлетворяют производственные потребности:
  - о В качестве присадочных материалов используются материалы, обладающие хорошей свариваемостью, снижая тем самым жаропрочность восстановленной зоны;
  - о При использовании присадочных материалов с высокой жаропрочностью не

исключено появление горячих и холодных трещин, пор и снижение твёрдости восстановленного участка;

о Обеспечение отсутствия трещин в наплавленном металле из высокожаропрочных трудносвариваемых сплавов требует дополнительных средств мониторинга процесса с функцией обратной связи.

о Неудовлетворительное формирование геометрии восстановленного элемента – нехватка или избыточность наплавленного металла.

## Список использованной литературы

1. Земляков Е.В., Бабкин К.Д., Корсмик Р.С., Скляр М.О., Кузнецов М.В. Перспективы использования технологии лазерной наплавки для восстановления лопаток компрессоров газотурбинных двигателей // Фотоника. 2016. № 4 (58). С. 10 - 22.
2. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 №303 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности", Подпрограмма 1 "Самолётостроение" // <http://government.ru/>. 2019. URL: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения: 03.03.2021).
3. Годовой отчёт ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн» за 2013 год // [docplayer.ru](http://docplayer.ru). 2014. URL: <https://docplayer.ru/34880615-Godovoy-otchet-otkrytogo-akcionernogo-obshchestva-nauchno-proizvodstvennoe-obedinenie-saturn-za-2013-god.html> (дата обращения: 03.03.2021).
4. Ермоленко А.С. Технологическое обеспечение синтеза композиционных технологий ремонта и восстановления лопаток газотурбинного двигателя ТВ3-117 [Электронный ресурс] // <http://masters.donntu.org/>: [сайт]. [2012]. URL: <http://masters.donntu.org/2012/fimm/ermolenko/diss/index.htm#ref2> (дата обращения: 06.10.2021).
5. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство газотурбинных двигателей. Москва: Машиностроение / Машиностроение - Полёт, 2002. 376 с.
6. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д., и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Запорожье: ОАО "Мотор Сич, 2003. 420 с.

7. Владыкин А.В. Разработка высокоскоростного метода электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра с регулированием режимов по массовыносу. Пермь. 2013. 155 с. диссертация канд. техн. наук.
8. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО "Авиадвигатель", 2006. 1204 с.
9. Сендюрев С.И. Влияние отношения разностей давлений охлаждающего воздуха на дефлекторе и стенке сопловой лопатки на тепловое состояние входной кромки. Пермь. 2010. 151 с. дисс. канд. техн. наук.
10. Каблов Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2005. № №3. С. 155 - 167.
11. Рафиков Л.Г., Иванов В.А. Эксплуатация газокomppressorного оборудования компрессорных станций. Москва: Недра, 1992. 237 с.
12. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., и др. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей. Москва: Высшая школа, 2002. 355 с.
13. Годовский Д.А. Дефекты элементов газотурбинных установок // Нефтегазовое дело. 2006. Т. 4. № 1. С. 201 - 205.
14. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д., и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2003. 396 с.
15. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. Самара: СГАУ, 2012.
16. DuPont J.N., Lippold J.C., Kissner S.D. Welding metallurgy and weldability of Ni-based alloys. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.

17. Davies P.W., Denninson J.P., Evans H.E. Recovery of properties of a nickel- base high-temperature alloy after creep // J. Inst. Met. 1966. No. 94. pp. 270 - 275.
18. Красильникова М.А. Обоснование выбора рациональной технологии изготовления и термической обработки отливок "лопатка" ГТД на основе анализа изменения структуры и свойств жаропрочных никелевых сплавов в условиях повышенных температур. Рыбинск. 2004. 254 с. дисс. канд. техн. наук.
19. Новикова О.В., Кочетков В.А., Жуков А.А. Российская научно-техническая конференция "Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве" // Влияние восстановительной термовакуумной обработки на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖС6У-ВИ. Рыбинск. 2002. С. 167 - 171.
20. Новикова О.В. Обеспечение эксплуатационных характеристик лопаток ГТД на основе совершенствования технологии термической обработки за счет горячего изостатического прессования. Рыбинск. 2012. 193 с. дисс. канд. техн. наук.
21. Новикова О.В. Применение газоизостатического прессования для повышения эксплуатационной надежности лопаток турбины из жаропрочного сплава ЖС6У // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2007. № 8. С. 54 - 56.
22. Liburdi J., Lowden P., Nagy D., et al. ASME Turbo Expo 2009 gas turbine technical congress & exposition // Practical experience with the development of superalloy rejuvenation. Orlando. 2009.
23. McGraw J., Van Deventer G., Burns A. ASME Power 2006 // Advancements in gas turbine vane repair. Atlanta. 2006.

24. Duvall D.S., Owczarski W.A., Paulonis D.F. TLP bonding; a new method for joining heat resistant alloys // *Welding Journal*. 1974. No. 53. pp. 203 - 214.
25. Ellison K.A., Lowden P., Liburdi J. Powder Metallurgy Repair of Turbine Components 1992. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings-pdf/GT1992/78972/V005T12A008/2402717/v005t12a008-92-gt-312.pdf> (дата обращения: 04.03.2021).
26. Henderson M.B., Arrell D., Heobel M., et al. Nickel-based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.160.5257&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 04.03.2021).
27. Lowden P., Liburdi J., Pilcher C. Gas turbine and aeroengine congress and exposition // *Automated Welding of Turbine Blades*. Toronto. 1989. pp. 550 - 554.
28. Greaves W., Van Esch H. Fourth RRAC international welding and repair technology for power plants conference // *Weld repair of GTD 111 DS*. Marco Island. 2000.
29. Jen M., Hsu S., Nico S., et al. Fourth RRAC international welding and repair technology for power plants conference // *Advanced Induction Weld Repair Processes: The Use of Parent Material Filler on Superalloy Rotating Blades*. Marco Island. 2000.
30. Корсмик Р.С., Туричин Г.А., Климова-Корсмик О.Г., Земляков Е.В., Бабкин К.Д. Лазерная порошковая восстановительная наплавка лопаток газотурбинного двигателя // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2016. Т. 15. № 3. С. 60 - 69.

31. Сорокин Л.И. Аргоно-дуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов 2004. URL: <http://viam.ru/public/files/2004/2004-204004.pdf> (дата обращения: 04.03.2021).
32. Curtis R., Miglietti W. Fourth RRAC international welding and repair technology for power plants conference // Development and implementation of effective repair process for advanced industrial gas turbine hot section components. Marco Island. 2000.
33. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., и др. Восстановление лопаток компрессора // В кн.: Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / ред. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., др. и. Москва. 2002. С. 355.
34. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быщенко О.А., и др. Разработка технологического процесса электронно-лучевого ремонта и восстановления свойств лопаток турбины ГТД из сплава ЖС26НК с жаростойким покрытием Nicraly // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 3. С. 34 - 38.
35. Серков А.В., Лоншакова О.Н., Тихомиров А.Е., и др. Способ ремонта поверхностных дефектов пера лопаток турбины ГТД, Изобретение RU2419526C1, 2011.
36. Gandy D.W., Frederick G., Viswanathan R., et al. Overview of Hot Section Component Repair Methods // ASM Utilities and Energy Sector Conference on Gas Turbine Materials Technologies. St. Louis. 2000.
37. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов // Вестник МАИ. 2016. Т. 23. № 1. С. 86 - 97.
38. Sexton L., Lavin S., Byrne G., et al. Laser cladding of aerospace materials // Journal of Materials Processing Technology. 2002. No. 122. pp. 63 - 68.

39. Shepeleva L., Medres B., Kaplan W.D., et al. Laser cladding of turbine blades // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 125. pp. 45 - 48.
40. Kathuria Y.P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 132. pp. 262 - 269.
41. Сотов А.В., Смелов В.Г., Носова Е.А., и др. Импульсная лазерная наплавка лопаток газотурбинных двигателей // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. № 6. С. 293 - 297.
42. «Blade Welder» welds challenging alloys // *Welding and cutting*. 2011. No. 2.
43. Richter K.H., Orban S., Nowotny S. 23rd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics // *Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades*. San Francisco. 2004.
44. Морозов Е.А., Долговечный А.В., Ханов А.М. Лазерная наплавка на лопатки газотурбинных двигателей // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 1 (2). С. 665 - 668.
45. Brandt M., Harris J., Chipperfield C. the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing // *In-situ laser repair of steam turbine blades*. Munich. 2007. pp. 1 - 5.
46. Sun S., Brandt M., Harris J., et al. 2nd Pacific international conference on applications of laser and optics // *Effect of increment and single-track geometry on the formation of multi-track laser cladding*. 2006. pp. 104 - 109.
47. Фомичёв Е.О., Воронин Н.Н. Анализ существующих способов восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя // *Двигатель*. 2013. № 5 (89). С. 18 - 19.

48. Kelbassa I., Albus P., Dietrich J., et al. the 3rd Pacific international conference on application of lasers and optics // Manufacturing and repair of aero engine components using laser technology. 2008. pp. 208 - 212.
49. Ермолаев А.С., Иванов А.М., Василенко С.А. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2013. № 35. С. 49 - 63.
50. Chen C., Wu H.C., Chiang M.F. Laser cladding in repair of IN738 turbine blades // International heat treatment and surface engineering. 2008. Vol. 2. No. 3/4. pp. 140 - 146.
51. Liu D., Lippold J.C., Li J. Laser Engineered Net Shape (LENS) Technology for the Repair of Ni-Base Superalloy Turbine Components // Metallurgical and Materials Transaction A. 2014. Vol. 45A. pp. 4454 - 4469.
52. Jen M., Hsu S., Nico S., et al. The Fourth RRAC international welding and repair technology for power plants conference // Advanced Induction Weld Repair Processes: The Use of Parent Material Filler on Superalloy Rotating Blades. Marco Island. 2000.
53. Stover J., Gandy D., Frederick G., et al. The Fourth RRAC international welding and repair technology for power plants conference // Development of a Laser-Based/High Strength Weld Filler Process to Extend Repair Limits on IN738 Gas Turbine Blades. Marco Island.
54. Hu Y., Reynal V., Ramundo F., et al. The Fourth RRAC international welding and repair technology for power plants conference // Laser Powder Fusion Repair of Industrial Gas Turbine Blades Using IN738LC Nickel-Based Superalloy. Marco Island. 2000.
55. Rottwimkel B., Noelke C., Kaielerle S., et al. Crack repair of single crystal turbine blades using laser cladding technology // Procedia CIRP. 2014. pp. 263 - 267.

56. Vilar R., Santos E.C., Ferreira P.N., et al. Structure of NiCrAlY coatings deposited on single-crystal alloy turbine blade material by laser cladding // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 57. pp. 5292 - 5302.
57. Bi G., Gasser A. Restoration of nickel-base turbine blade knife-edges with controlled laser aided additive manufacturing // *Physics Procedia*. 2011. No. 12. pp. 402 - 409.
58. Jones J., McNutt P., Tosi R., et al. 23rd Annual international solid freeform fabrication symposium // *Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine*. Austin. 2012. pp. 821 - 827.
59. DMG MORI. LaserTec series URL: [http://t-sistem.ru/netcat\\_files/multifile/2295/pl0uk13\\_lasertec\\_series\\_pdf\\_data.pdf](http://t-sistem.ru/netcat_files/multifile/2295/pl0uk13_lasertec_series_pdf_data.pdf) (дата обращения: 05.03.2021).