

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

В.А. Барвинок, П.А. Бордаков, С.Ф. Демичев,  
А.Л. Усольцев, А.В. Покоев

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ БАРЬЕРНЫХ  
ПРОСЛОЕК ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ  
ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Учебное пособие*

САМАРА 2002

Барвинок В.А., Бордаков П.А., Демичев С.Ф., Усольцев А.Л.,  
Покоев А.В. **Выбор и оптимизация барьерных прослоек при  
сварке давлением элементов авиационных конструкций из  
разнородных материалов: Учебное пособие / Самар. гос. аэрокосм.  
ун-т. – Самара, 2002. 67 с.**

**ISBN 5-7883-0214-5**

Представлены принципы и методы выбора и оптимизации барьерных прослоек для получения высокопрочных и надежных сварных соединений применительно к узлам авиационных конструкций. Приведена математическая модель процесса взаимной диффузии в соединениях с прослойкой. Рассмотрены примеры технологий диффузионной сварки ряда узлов авиационной техники.

Пособие предназначено для проведения практических и самостоятельных занятий, а также курсового и дипломного проектирования по дисциплине “Технология производства летательных аппаратов”.

Табл. 4. Ил. 31. Библиогр.: 26 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Проничев Н.Д.  
канд. техн. наук, доц. Бичуров Г.В.

**ISBN 5-7883-0214-5**

© В.А. Барвинок, П.А. Бордаков,  
С.Ф. Демичев, А.Л. Усольцев,  
А.В. Покоев, 2002

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2002

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. Состояние и перспективы применения диффузионной сварки в производстве летательных аппаратов .....	5
2. Выбор и оптимизация барьерных прослоек при диффузионной сварке разнородных материалов.....	15
3. Математическое моделирование диффузионного взаимодействия в соединениях из разнородных материалов с прослойкой.....	29
4. Оптимизация толщин барьерных прослоек с учетом их контактного упрочнения .....	43
5. Диффузионная сварка элементов авиационных конструкций из разнородных материалов.....	48
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	64

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие авиационно-космической техники тесно связано с достижениями в сфере производства неразъемных неподвижных соединений деталей и конструкций. Прогрессивным методом получения таких соединений является сварка. Сварные соединения во многих случаях превосходят по ряду важнейших технико-экономических показателей неразъемные соединения, выполненные с помощью других методов, например, методов механического крепления и клепки.

Возможность снижения массы и габаритных размеров неразъемных соединений, высокая прочность в широком интервале температур, герметичность сварных соединений - эти и другие положительные качества сварки обуславливают ее широкое применение в производстве летательных аппаратов.

Использование традиционных способов сварки плавлением и давлением для соединения разнородных сочетаний материалов не обеспечивает получения требуемых результатов. Решить эти задачи удастся только с помощью метода диффузионной сварки в вакууме.

Получение сварных соединений представляет собой процесс, сопровождающийся сложными и многообразными явлениями, происходящий на границе соединяемых материалов. При этом во многих случаях важной проблемой является целенаправленное регулирование этих процессов путем применения специальных прослоек. Многие теоретические вопросы диффузионной сварки разнородных материалов являются общими для всех способов сварки давлением, осуществляемых в условиях совместной пластической деформации соединяемых поверхностей.

В настоящем пособии обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований по выбору и оптимизации барьерных прослоек для получения высокопрочных узлов авиационной техники из разнородных материалов, выполненных в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С. П. Королева, а также в других отечественных и зарубежных организациях.

# 1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Диффузионная сварка занимает прочные позиции и имеет большие перспективы в сфере изготовления неразъемных узлов в производстве ЛА, в других передовых отраслях промышленности.

К настоящему времени в части развития теории и в вопросах практического осуществления диффузионной сварки достигнуты значительные успехи. Получены диффузионные соединения большого количества различных материалов в однородном и разнородном сочетаниях, в том числе неметаллических материалов (керамика, графит, кермет, кварц и др.) с неметаллическими, жаропрочными, тугоплавкими, пористыми, порошковыми материалами и многими другими. Диффузионная сварка используется и как метод изготовления композиционных материалов (с металлической матрицей, слоистых металлических композитов), и как способ их соединения [1].

Перспективы диффузионной сварки в производстве ЛА, в том числе в авиадвигателестроении, связаны, прежде всего, с внедрением новых конструкционных материалов и прогрессивных технологических процессов. В соответствии с прогнозами, в частности в их конструкциях, будет неуклонно возрастать доля композиционных материалов; широкое распространение получают порошковая и гранульная технология изготовления деталей [2].

По данным отечественной и зарубежной печати метод диффузионной сварки нашёл широкое применение в производстве ЛА. Так, например, фирма "British Aerospace" при изготовлении самолёта "Европейский Аэробус" А - 310 (рис. 1.1) до 30% сварочных работ выполняет с помощью диффузионной сварки. С использованием ДСВ изготавливаются рама крепления двигателя, панели обтекателя и обшивки, входные двери (люки). Кроме этого, диффузионная сварка применяется при изготовлении элементов топливной арматуры (трубопроводы, заборные устройства), углов двигательных установок (магнитные клапаны, роторы турбогенераторов), для армирования поверхностей трущихся пар износостойкими материалами.



Рис. 1.1. Аэробус А – 310

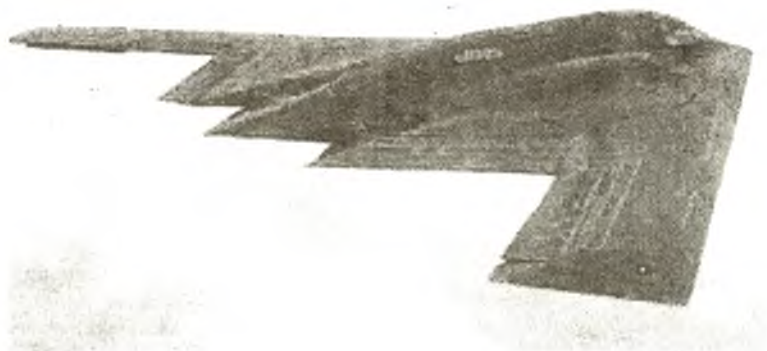


Рис. 1.2. В-2 SPIRIT  
(стратегический бомбардировщик)

Стратегический бомбардировщик В-2 (рис.1.2) относится к третьему поколению американских малозаметных самолетов. В-2 выполнен по схеме “летающее крыло” и не имеет вертикального оперения. Функцию рулей направления выполняют расщепляющиеся щитки, установленные на концах крыла. Планер самолета построен

в основном из титановых и алюминиевых сплавов с широким применением углепластиков с бисмалеимидной и полиимидной матрицами, обладающими повышенной теплостойкостью по сравнению с эпоксидными связующими. Основным несущим компонентом конструкции служит однолонжеронный титановый кессон, расположенный в передней центральной части корпуса и в примыкающих промежуточных секциях, к которым крепятся углепластиковые консоли крыла, не имеющие сужения. Толщина монолитных титановых панелей кессона достигает 23 мм. Ряд титановых элементов изготовлен с применением сверхпластического формования и диффузионной сварки в вакууме. Некоторые титановые панели обшивки — самые длинномерные в американской авиации.

Узлы, изготовленные диффузионной сваркой, зачастую используются в особых условиях эксплуатации. От таких элементов, как конструкции типа “сэндвич”, ребра жесткости фюзеляжа и двигательной установки, цапфы основного шасси, гондолы двигателей, тепловые трубы и т.п., требуется высокая прочность, причем в некоторых случаях при термических нагрузках.

Рассматривая эти элементы, необходимо отметить, что речь идет об узлах, подвергающихся действию максимальных нагрузок. Чтобы получить необходимую прочность при использовании традиционных методов изготовления, потребовалось бы огромное количество дополнительных элементов, что привело бы не только к росту затрат, но и к увеличению веса конструкции.

Главная тенденция в современном авиадвигателестроении - использование более высоких температур и давлений. Ключевым фактором в развитии авиационных ГТД является повышение температуры газа перед турбиной ( $T_r^*$ ). Рабочая температура газа определяет КПД двигателей. Увеличение  $T_r^*$  позволяет резко повысить их экономичность, применить дешевые виды топлив. Так, например, если  $T_r^*$  турбореактивного двигателя с тягой 35 кН поднять с 1473 до 1623 К, то его удельная тяга увеличивается на 15%, а удельный расход топлива снижается на 8%.

Планируется, что новые современные двигатели в эксплуатационных условиях будут работать при температуре газа перед турбиной ( $T_r^*$ ) ~1750 К (в идеальном случае  $T_r^*$  может быть

увеличена до значений, приближающихся к 2273 К, являющихся стехиометрическим пределом идеального горения всех видов топлива) (рис.1.3) [2].



Рис.1.3. Прогноз роста рабочих температур в авиационных ГТД:  
1 - в современных двигателях; 2 - в двигателях будущего

Повышение рабочих температур и давлений в двигателях достигается в основном за счет увеличения объема жаропрочных сплавов, причем жаропрочность самих материалов, предназначенных для наиболее “горячих” узлов двигателей, непрерывно возрастает [3] (рис.1.4).

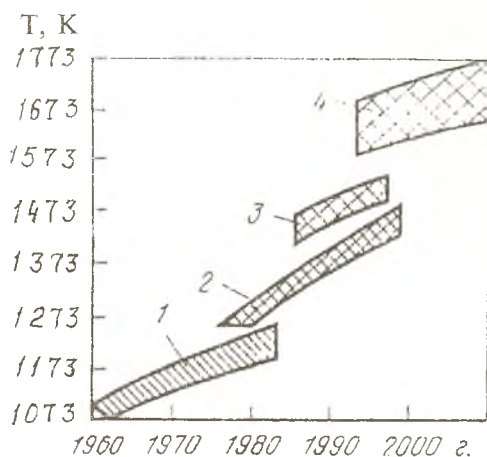


Рис.1.4. Прогноз применения материалов с повышенной жаропрочностью:  
1 - традиционные жаропрочные сплавы; 2 - металл со структурой, упрочненной направленной кристаллизацией; 3 - термозащитные покрытия; 4 - композиционные материалы с керамической матрицей



В числе перспективных разработок в области высокожаропрочных сплавов следует отметить использование эвтектических сплавов, в которых все компоненты имеют одну и ту же температуру затвердевания; добавление в сплавы частиц керамических оксидов; разработку композиционных материалов с металлической матрицей, армированных вольфрамовыми волокнами; композиционных материалов, состоящих из никелевой матрицы, внутри которой армирующие волокна из карбидов ниобия образуются в процессе кристаллизации; использование специальных защитных покрытий [2].

Продолжаются также работы по внедрению различных видов керамик, увеличивается объем применения тугоплавких металлов и их сплавов [4, 5].

Достигнутые успехи в области диффузионного соединения материалов придали новый импульс промышленному освоению данного процесса, расширили границы области его применения. Наряду с диффузионной сваркой получили распространение и ее разновидности - диффузионная сварка - пайка, а также родственные ей по своей природе процессы клинопрессовой и термовакуумной клиновой сварки. Весьма эффективным является комбинированный процесс, сочетающий формоизменение в сверхпластическом состоянии с диффузионной сваркой (СПФ/ДС).

Применение всех этих процессов позволяет снизить массогабаритные параметры неразъемных соединений, повысить коэффициент использования материалов, снизить трудоемкость их изготовления, использовать новые конструктивные решения. С их помощью изготавливается ряд ответственных деталей и конструкций ЛА: сотовые панели, многослойные конструкции стрингерного и ячеистого типов из титановых и алюминиевых сплавов, детали и узлы космических аппаратов и многое другое.

Разновидности диффузионной сварки и родственные ей сварочные процессы находят широкое применение и успешно конкурируют с традиционными технологиями сварки плавлением при изготовлении ряда деталей и узлов авиационных конструкций. Например, составных роторов турбоэнергоагрегатов из "магнитной" стали 30ХГСА и немагнитной аустенитной стали ДИ-8, биметаллических трубчатых

переходников [6], элементов модулей уплотнений валов – титаново-стальных обжим и составных контактных колец из стали 40ХН2МА с системой каналов охлаждения с жестко регламентированными размерами проходного сечения (рис.1.5), пластинчатых и пористо-компактных теплообменников.

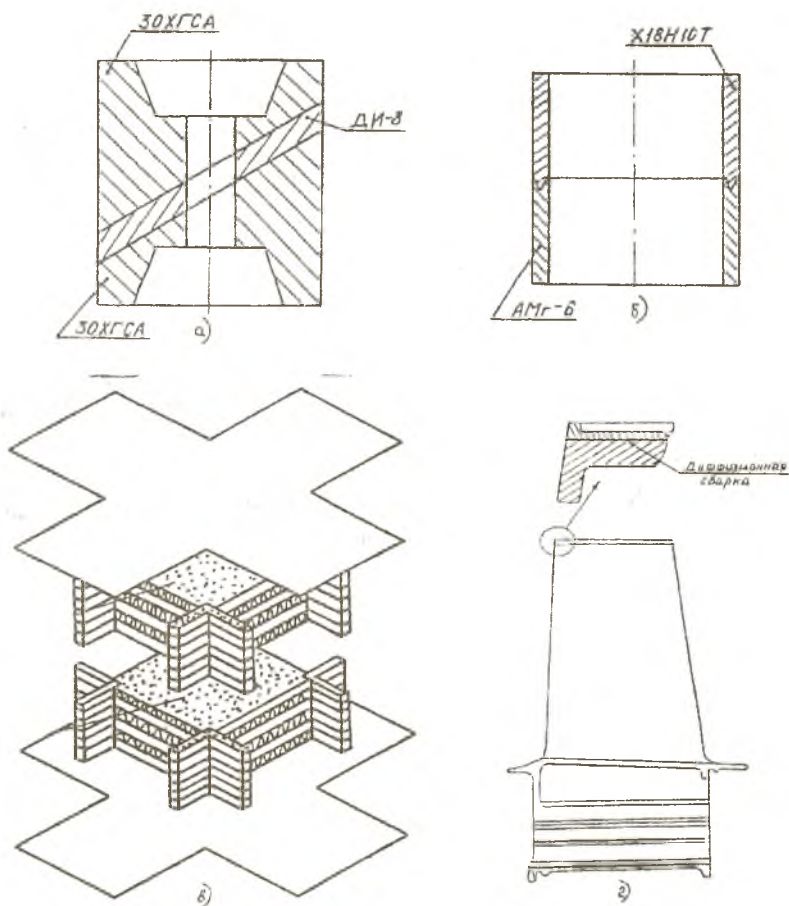


Рис.1.5. Детали и узлы авиационных ГТД, изготавливаемые с помощью диффузионной сварки (а, г) и термовакuumной клиновой сварки (б) и пайки (в): а - ротор турбогенератора, б - биметаллический трубчатый переходник, в – блок пластинчатого теплообменника; г – консольная турбинная лопатка

Большое значение методу диффузионного соединения в авиационно-космическом производстве придают за рубежом. Технологии диффузионной сварки разрабатываются рядом крупных фирм США, Японии, Великобритании, Германии и других стран. Широкое распространение при изготовлении крупногабаритных конструкций из титановых сплавов нашла технология СПФ/ДС; применяются также шовная или роликовая, диффузионная сварка [7, 8]. Так, различными компаниями США (“Rockwell International”, “Mc. Donnell Aircraft”, “Douglas Aircraft” и др.), Великобритании (“British Aerospace”), Японии (“Мицубиси Дзюкоге”) с помощью СПФ/ДС-процесса изготовлены разнообразные детали и узлы опытных изделий авиационной и космической техники: створки люков, рамы, воздухозаборники, обтекатели хвостового оперения, сложные полые шпангоуты, топливные баки, элероны, предкрылки и закрылки для самолетов и др. Некоторые конструкции прошли испытания и изготавливаются серийно. Один из ведущих разработчиков в области диффузионной сварки титана - корпорация “Rockwell International” - сообщила о производстве различных конструкций для опытных вариантов бомбардировщика В-1. Сварено 66 различных деталей максимальной длиной 6,2 м (несущий профиль крыла, рама каркаса стабилизатора, сложные шпангоуты, лонжероны и др.) [9].

Посредством шовной диффузионной сварки соединяют, например, обшивку и гофрированные листы корпусов камер сгорания. Экспериментальное производство соплового аппарата турбины двигателя фирмы “Роллс Ройс” с помощью роликовой диффузионной сварки показало, что применение этого процесса дает значительную экономию. Изготовление полых втулок для газотурбинных двигателей с использованием диффузионной сварки, по мнению зарубежных специалистов, представляет собой веху в развитии производства таких двигателей [9, 10].

Применение процессов диффузионной сварки и диффузионной сварки-пайки открыло дорогу новым прогрессивным конструкторско-технологическим решениям основных деталей компрессоров и турбин авиационных ГТД и их вспомогательных агрегатов.

С использованием этих процессов разработаны технологии изготовления лопаток составной конструкции, армирования бандажных полок и торцов пера лопаток пластинами из износостойких материалов.

Потенциальные возможности методов диффузионной сварки и диффузионной сварки-пайки в авиадвигателестроении высоко оценены компаниями “Пратт-Уитни” и “Дженерал Электрик”. В частности, диски вентилятора с полым ободом из сплава Ti-6Al-4V применены в двигателе JT90-70, что, по существу, является первым зарубежным опытом использования метода диффузионной сварки при изготовлении вращающейся части двигателя. Переход от массивного обода к полому обеспечил снижение его массы на ~30% [11]. Фирма “Дженерал Электрик” опробовала диффузионную сварку для изготовления полых лопаток компрессора из титановых сплавов, получена экономия 79 кг титана на один двигатель при снижении себестоимости лопаток примерно на 50% по сравнению с изготавливаемыми по существующей технологии [9]. Фирмой “Пратт-Уитни” с целью уменьшения массы широкохордные титановые лопатки вентиляторов проектируются и изготавливаются полыми (двигатель E<sup>3</sup>) или полыми с наполнителем сотовой конструкции (двигатели RB211-535E4 и RB211-600). В первом случае лопатки изготавливаются с использованием технологий изотермической штамповки и диффузионной сварки, во втором – путем штамповки в сверхпластическом состоянии, а в качестве метода соединения применяется диффузионная пайка твердым припоем [12].

Как отмечалось выше, повышение температуры газа перед турбиной ( $T_r^*$ ) является важнейшим признаком совершенствования авиационных ГТД. Однако стремление к созданию ГТД со все более высокоэффективным термодинамическим процессом ведет к увеличению разности между потребными  $T_r^*$  и рабочими температурами, приемлемыми для постоянно улучшаемых материалов, идущих на изготовление наиболее нагруженных рабочих лопаток, а также сопловых лопаток и дисков. Эта разность компенсируется непрерывным совершенствованием интенсивности охлаждения этих деталей. Перспективным способом повышения эффективности охлаждения лопаток является изготовление их из двух половинок. Благодаря такому решению, в частности, упрощается технология литья и, как следствие, уменьшается литейный брак; появляется возможность изготовления лопаток из наиболее жаропрочных материалов, включая композиционные, из материалов, полученных

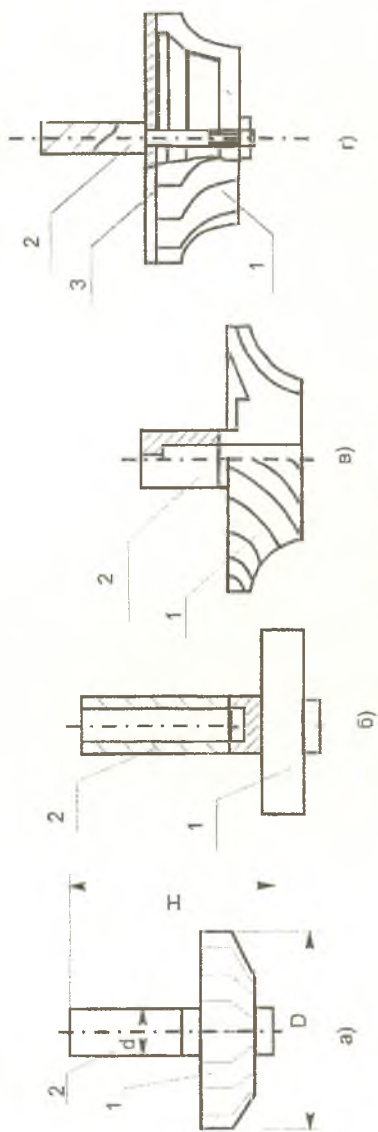


Рис.1.б. Конструкция биметаллических роторов турбин и компрессоров малоразмерных авиационных ГТД, изготавливаемых с помощью диффузионной сварки: а, б - роторы турбин; в - ротор компрессора; г - пустотелый ротор компрессора; 1 - рабочее колесо турбины (ЖС6К, ЖСЗДК, ВЖЛ12У и др.), компрессора (ВТ3-1, ВТ-20 и др.); 2 - вал ротора (Ст.40Х, 45Х, ВНС-2 и др.); 3 - крышка пустотелого ротора компрессора (ВТ-20, В-95 и др.)

методом порошковой металлургии. Так, в процессе модификаций для ТРДД F-100 фирма “Пратт-Уитни” разработала составную лопатку со сложной системой каналов, наличием различных интенсификаторов охлаждения, изготавливаемую из двух половин, соединяемых с помощью диффузионной сварки с переходной жидкой фазой.

Технологический процесс изготовления лопаток компрессоров низкого давления из титановых сплавов методом бесприпускового вальцевания пера с использованием диффузионной сварки, разработанный и внедренный в АО “Пермские Моторы”, позволил получить значительную экономию за счет снижения металлоемкости и трудоемкости [13].

Применение диффузионной сварки при изготовлении биметаллических роторов турбин и компрессоров малоразмерных авиационных ГТД позволяет отказаться от механических способов соединения их деталей, недостаточно надежных и увеличивающих их массогабаритные параметры (рис.1.6). Проведенные предварительные испытания экспериментальных сварных роторов свидетельствуют о высоком качестве диффузионных соединений.

Как показывает проведенный анализ применения диффузионной сварки в авиадвигателестроении, то она чаще используется для соединения разнородных материалов, в первую очередь – материалов с резко различающимися свойствами.

Проведенный литературный обзор позволяет сделать вывод о перспективности применения метода диффузионного соединения для решения такой важной и актуальной задачи производства летательных аппаратов, как изготовление неразъемных соединений элементов их конструкций.



## 2. ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ БАРЬЕРНЫХ ПРОСЛОЕК ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Хорошо известно, что при всех способах сварки давлением прочность и пластичность соединений резко снижаются, если в переходной зоне формируются хрупкие прослойки толщиной более 3...5 мкм. Особенно ярко это выражается при сварке металлов, имеющих ограниченную растворимость, в том числе высоколегированных сплавов и сталей. Из этого со всей очевидностью следует, что невысокая прочность сварных соединений обусловлена, главным образом, их охрупчиванием в результате диффузионного взаимодействия.

Такая проблема имеет место при диффузионной сварке титановых сплавов со сталями. Указанные сочетания материалов широко используются при изготовлении элементов авиационных конструкций.

В соответствии с диаграммой состояния титан-железо предельная растворимость железа в титане составляет всего 0,05...0,1%. При концентрациях более 0,1% в сплаве этих материалов образуются интерметаллические соединения типов  $TiFe$ ,  $TiFe_2$ ,  $Ti_2Fe$ . В системе титан-железо имеются три эвтектики:  $\beta + TiFe$ ,  $TiFe + TiFe_2$ ,  $TiFe_2 + \alpha$ , кристаллизующиеся при температурах соответственно 1373, 1553 и 1571 К. Кроме того, титан является сильным карбидообразователем (растворимость углерода в  $\alpha$ -титане до 1,1% (ат.), а в  $\beta$ -титане - до 0,2 % (ат)). В силу этого практически при всех способах сварки, в том числе и при диффузионной, соединение титана непосредственно со сталью происходит с образованием твердой и хрупкой прослойки сложного состава, обуславливающей его низкую прочность и пластичность [14].

Еще более сложную задачу представляет сварка титана с хромоникелевыми сталями. Титан обладает ограниченной взаимной растворимостью с основными легирующими элементами нержавеющей сталей (железом, хромом и никелем) и при взаимодействии с ними образует интерметаллиды и низкотемпературные эвтектики. Так, температура образования эвтектики титан-никель - 1228 К. Вследствие этих причин сварные соединения титана с хромоникелевыми сталями еще менее прочны, чем соединения с углеродистыми сталями.

Попытка получить качественное соединение титанового сплава ВТЗ-1 напрямую со сталью ВНС-2 по методу диффузионной сварки также не дала положительных результатов [15]. Прочность таких соединений не превышала 100...120 МПа. С помощью оптической микроскопии и посредством измерения микротвердости в переходной зоне соединений были выявлены интерметаллические прослойки ( $H_{\mu} > 10000$  МПа), ширина которых, в зависимости от режима сварки, составила 8...15 мкм (рис.2.1). Наличие хрупких прослоек в околосшовных зонах соединений титана и его сплавов со сталями, выполненных напрямую с помощью диффузионной сварки, отмечается рядом исследователей [16].

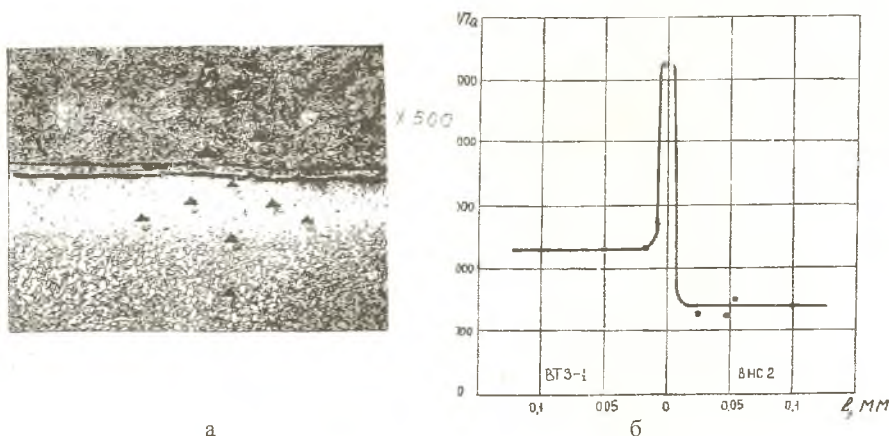


Рис. 2.1 Структура (а) и микротвердость (б) в переходной зоне соединения ВТЗ-1 с ВНС-2 без прослоя

В целях предупреждения образования в зоне соединений титана со сталями интерметаллидов сварку их осуществляют через барьерные прослойки. Титан удовлетворительно сваривается с очень ограниченным количеством металлов: цирконием, гафнием, ниобием, танталом, ванадием. Сталь не сваривается непосредственно ни с одним из перечисленных металлов, за исключением ванадия.

Как показали исследования, применение одной барьерной прослойки - фольги из ванадия - не решает задачу диффузионной



сварки титанового сплава ВТЗ-1 со сталью ВНС-2. В переходной зоне соединения ванадия со сталью ВНС-2, имеющей в своем составе хром и никель, образуются хрупкие фазы типа NiV и  $\sigma$ -фаза, а также карбид ванадия VC. Предотвратить указанное негативное явление на границе ванадия со сталью помогло введение между ними второй барьерной прослойки. На основании анализа диаграмм двойных сплавов металлов материалом для нее была выбрана медь. В системах Cu-V и Cu-Fe интерметаллические соединения не образуются, а углерод не растворяется в меди. При сварке сплава ВТЗ-1 со сталью ВНС-2 через двойной прослой - фольги из ванадия и меди - было зафиксировано резкое увеличение прочности соединений. Обоснованность выбора материалов барьерных прослоев подтверждается также литературными данными по диффузионной сварке других сочетаний марок титановых сплавов со сталями [17].

Очередным и важным этапом исследований является выбор толщин барьерных прослоев. С одной стороны, основное назначение барьерной прослойки - предотвращение сквозной диффузии компонентов разделяемых ею материалов. В связи с этим она должна иметь достаточную толщину с тем, чтобы в процессе сварки и, поскольку сварное соединение работает при повышенной температуре, в последующий период эксплуатации не происходило бы охрупчивания соединения. С другой стороны, в диапазоне эксплуатационных температур натурального узла (до 673 К) ванадий и медь имеют существенно более низкие механические характеристики, чем основные материалы. При наличии в сварном соединении мягкой прослойки наблюдается эффект контактного упрочнения, выражающийся во влиянии толщины прослойки на прочность соединения при растяжении [18]. С уменьшением толщины прослойки прочность соединения возрастает и теоретически может достигнуть прочности основного материала; поэтому при сварке необходимо стремиться к уменьшению толщины прослойки. Из этих полярно противоположных требований вытекает, что прослойка должна иметь минимально возможную толщину, которую необходимо определять с учетом температурно-временных условий сварки и последующей эксплуатации сварного соединения.

Интервал оптимальных температур диффузионной сварки композиции ВТЗ-1 + V + Cu + ВНС-2 находили на основании анализа

экспериментальных зависимостей коэффициентов трения покоя контактирующих материалов от температуры [11] Как видно из приведенных графиков (рис.2.2), положение экстремумов на кривых  $f = F(T_{к}, P)$  соответствует температурам:

BT3-I + V - 1193...1253 К,

V + Cu - 1183...1233 К,

Cu + ВНС-2 - 1173...1223 К.

Предполагаемая оптимальная температура сварки всего соединяемого пакета составляет 1193...1223 К.

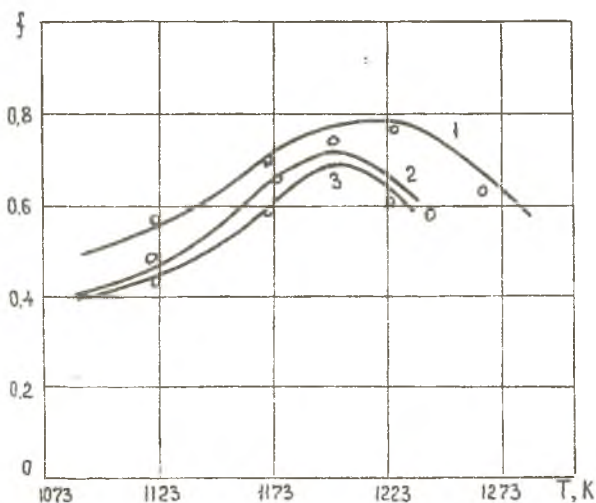


Рис. 2.2. Зависимость коэффициента трения покоя от температуры ( $P = 5$  МПа): 1 – BT3-1+V; 2 – V + Cu; 3 – Cu + ВНС-2

С целью определения минимальных толщин барьерных прослоев была использована методика, основанная на том, что прослойки выполнялись с изменяющейся по границе соединения толщиной (имели в сечении форму клина) (рис.2.3).

Эксперименты по выбору толщин прослойки ванадия осуществлялись в такой последовательности. К торцевой поверхности образца из титанового сплава BT3-I по методу диффузионной сварки приваривалась фольга из ванадия толщиной 0,12 мм; причем сварку

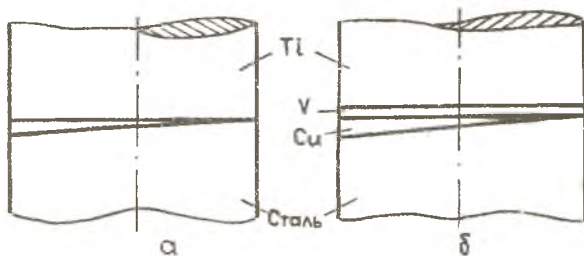


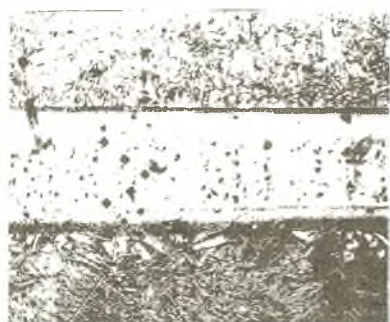
Рис. 2.3. Схема сварки через изменяющиеся по толщине (“на клин”) барьерные прослойки: а – прослойки из ванадия; б – прослойки из ванадия и меди

выполняли при более низкой температуре. Приваренную фольгу сошлифовывали под углом  $1,5^\circ$ , в результате чего толщина ее изменялась в пределах  $0 \dots 0,1$  мм. Торцы образца из стали ВНС-2 сошлифовывали под таким же углом. После этого образцы - титановый и стальной - сваривались при температурах, превышающих предполагаемую оптимальную температуру диффузионной сварки композиции ВТЗ-1 + V + Cu - + ВНС-2:  $1248 \text{ K}$  ( $P=5 \text{ МПа}$ ,  $\tau=30 \text{ мин}$ ).

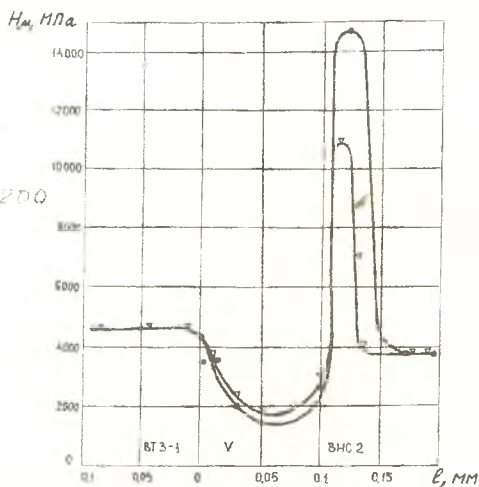
Измерение микротвердости и металлографический анализ зоны соединения показали, что при толщине ванадиевой прослойки, примерно равной  $0,05$  мм и более, микротвердость на границе титан-ванадий находится на уровне микротвердости титанового сплава ВТЗ-1  $\sim 4500 \text{ МПа}$  (рис.2.4). При меньших толщинах прослойка становится проницаемой для диффундирующих элементов основных соединяемых материалов. В переходной зоне ванадий - сталь микротвердость высока:  $\sim 14800 \text{ МПа}$ , что можно объяснить образованием в этой зоне карбидов ванадия VC и интерметаллидов Ni.

Прочность сварных соединений, выполненных через прослойку ванадия толщиной  $0,05$  мм на режиме:  $T=1248 \text{ K}$ ,  $P=5 \text{ МПа}$ ,  $\tau=30 \text{ мин}$ , составило в среднем  $380 \text{ МПа}$ . Фрактографические исследования поверхностей разрыва показали, что во всех случаях разрушение происходило по границе ванадий - сталь.

По вышеизложенной методике была определена и минимальная толщина медной прослойки. Только теперь уже к титановому образцу приваривали двойную прослойку - сначала ванадиевую фольгу уже известной минимальной толщины ( $0,05$  мм), затем медную толщиной



а

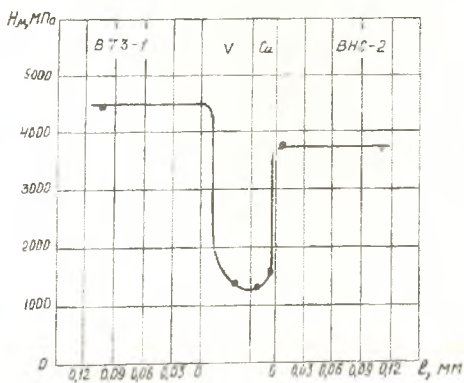


б

Рис. 2.4. Структура (а) и микротвердость (б) переходной зоны сварного соединения титанового сплава ВТЗ-1 + V + ВНС-2 в зависимости от температуры сварки



а



б

Рис. 2.5. Микроструктура (а) и микротвердость (б) в переходной зоне соединения ВТЗ-1 с ВНС-2 через прослойки ванадия и меди

0,1 мм, которую и сошлифовывали “на клин”. Снижение толщины прослойки меди до 0,025 мм не приводит к появлению хрупких фаз ни на границе ванадий - медь, ни в зоне медь - сталь (рис. 2.5).

Необходимо сказать, что, как показали исследования механических свойств сваренной на оптимальных режимах композиции ВТЗ-1 + V + Cu + ВНС-2, ее кратковременная прочность при нагреве выше 573К быстро падает. Это можно объяснить тем, что при этих температурах достаточно интенсивно происходит диффузия меди в сталь по границам зерен. Повышение концентрации меди на границах стали, по-видимому, способствует охрупчиванию и появлению трещин в переходных зонах соединения, что в конечном счете сказывается на прочностных характеристиках.

Повышение жаропрочности сварного соединения ВТЗ-1 со сталью ВНС-2 можно осуществить путем помещения между медной прослойкой и стальной деталью третьей барьерной прослойки.

Анализ диаграмм состояния бинарных систем позволяет прогнозировать, что хорошей свариваемостью с железом и медью обладают Au, Co, Cr, Pb, Mn, Ni, Pt и др. металлы. Выбор был остановлен на никеле. Никель хорошо соединяется диффузионной сваркой и с медью, и со сталями.

Минимальная толщина барьерной никелевой прослойки (фольга) определялась по той же методике, что и ванадиевой и медной; ее величина оказалась равной 0,05 мм (рис. 2.6).

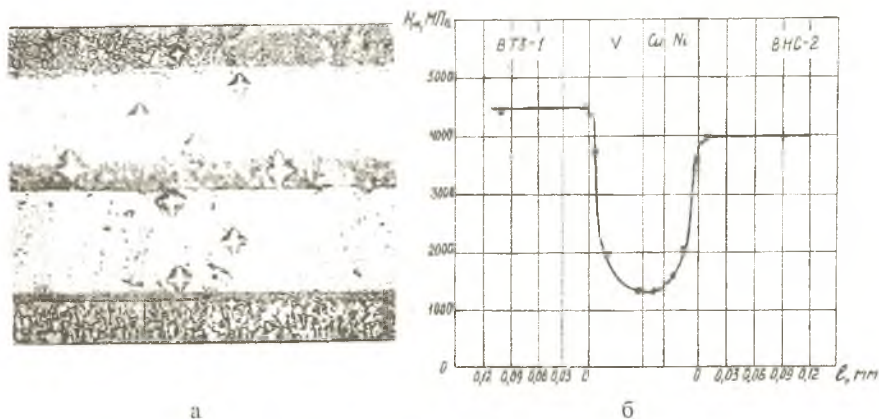


Рис. 2.6. Структура (а) и микротвердость (б) переходной зоны соединения ВТЗ-1 с ВНС-2 через прослойку ванадия, меди и никеля

Сварка сплава ВТЗ-1 со сталью ВНС-2 через двойную и тройную прослойки с компонентами различной толщины (табл.2.1) показала, что максимальную прочность имеют соединения с прослойками минимально возможных толщин. Падение прочности соединений с увеличением толщин прослоев обусловлено, очевидно, снижением эффекта контактного упрочнения. Таким образом, результаты, представленные в табл.2.1, позволяют заключить, что оптимальные толщины ( $\delta$ ) барьерных прослоев равны:

$$\delta_v = 0,05; \delta_{Cu} = 0,025 \text{ и } \delta_{Ni} = 0,05 \text{ мм.}$$

Таблица 2.1

*Влияние толщин барьерных прослоев и режимов диффузионной сварки на прочность ( $\sigma_e$ ) соединения сплава ВТЗ-1 со сталью ВНС-2*

Толщина прослойки, мм			Режим сварки			$\sigma_e$ , МПа
Ванадий	Медь	Никель	$T$ , К	$P$ , МПа	$\tau$ , мин	
0.05	0.12	–	1173–1273	5–10	30	390...570
0.05	0.05	–	1173–1273	5–10	30	560...680
0.05	0.25	–	1173–1273	10	30	750...920
0.05	0.05	0.10	1173–1273	5–10	30	270...600
0.05	0.05	0.05	1223	10	30	670...780
0.05	0.25	0.05	1173–1223	10	30	750...900

При оптимизации параметров режимов диффузионной сварки сплава ВТЗ-1 со сталью ВНС-2 через двойную и тройную прослойки выбранных толщин температура сварки ( $T$ ) назначалась из полученного ранее интервала оптимальных температур сварки композиции. Время сварки составляло 30 мин. При указанных значениях температурно-временных параметров процесса был отмечен быстрый рост прочности соединений ( $\sigma_e$ ) - как с двойной, так и с тройной прослойками - при увеличении  $P$  от 5 до 8...10 МПа; величина макропластической деформации соединений ( $\varepsilon_R$ ) при  $P = 8...10$  МПа не превышала 9...11%.

Прочность обеих рассматриваемых композиций снижается при  $T \leq 1223$  К. Разрушение сварных образцов с двойной прослойкой



происходило по границе медь-сталь, а с тройной - по границе никель-сталь, что указывает на незавершенность процессов развития физического контакта и диффузии в зоне сварки. При температурах выше 1273К прочность соединений практически не возрастала (рис.2.7), но в то же время  $\varepsilon_R$  соединений достигала 15...18%.

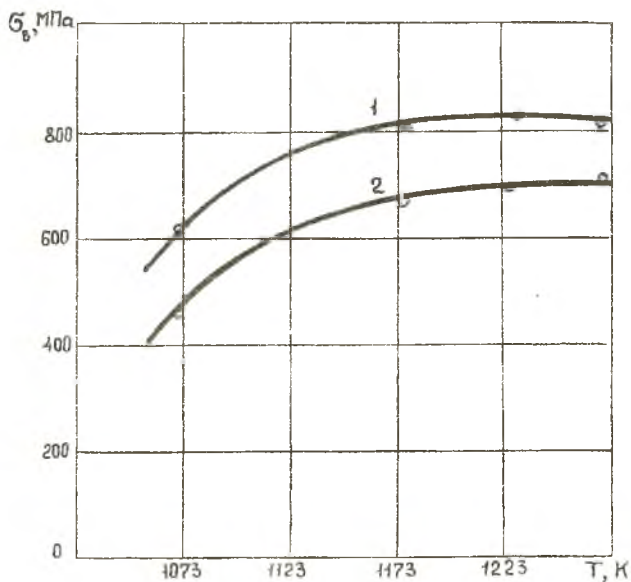


Рис. 2.7. Зависимость прочности ( $\sigma_b$ ) сварного соединения титанового сплава VT3-1 со сталью ВНС-2 от температуры сварки: 1 – соединение с двойной прослойкой (V + Cu); 2 – соединение с тройной прослойкой (V + Cu + Ni)

Таким образом, диапазоны допустимых отклонений параметров процесса диффузионной сварки для обеих композиций целесообразно выбрать равными:

$$1223\text{K} \leq T \leq 1248\text{K},$$

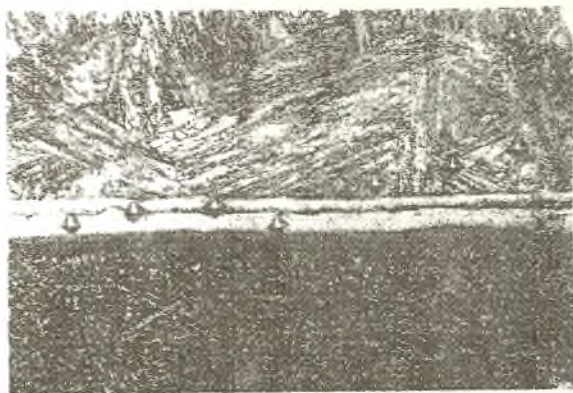
$$8 \text{ МПа} \leq P \leq 10 \text{ МПа},$$

$$25 \text{ мин} \leq \tau \leq 35 \text{ мин}.$$

Результаты легли в основу разработки технологии диффузионной сварки других сочетаний титановых сплавов со сталями (OT4-1 + 12X18H10T и BT-20 + ЭИ961) применительно к роторам турбин и модулей уплотнений турбоагрегатов.

В авиастроении широкое распространение получили элементы конструкций, изготавливаемые методом диффузионной сварки из жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ12У, ЖС6К, ЖС-3ДК, АНВ-300, ЭИ-968, ЛЖ-3 и сталей ЭИ961, 45Х, 40Х, ст.45. Указанные сплавы и стали в различных сочетаниях используются при соединении рабочих колес с валами турбин малоразмерных ГТД, турбоагрегатов и других узлов авиационных конструкций.

Диффузионная сварка биметаллов ВЖЛ12У + ЭИ961, ЖС6К + 45Х и АНВ-300 показывает, что прочность ( $\sigma_g$ ) таких соединений невысока: менее  $0,5\sigma_g$  жаропрочных сплавов (менее прочных при температуре 293 К, чем стали). Металлографические исследования сварных соединений ВЖЛ12У + ЭИ961, ЖС6К + ст.45Х и АНВ-300 показали, что они имеют развитые - шириной 12...15 мкм - переходные зоны сложного строения (микроструктура одного из этих соединений - ВЖЛ12У + ЭИ961 - показана на рис.2.8). Микротвердость в переходных зонах выше микротвердости основных материалов.



×500

Рис. 2.8. Микроструктура переходной зоны сварного соединения жаропрочного сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 (без прослоя)

Образование хрупкой структуры в околошовных зонах соединений жаропрочных никелевых литейных сплавов со сталями, по-видимому, объясняется наличием в составе первых карбидообразующих легирующих элементов (хрома, вольфрама, титана и др.) и диффузией



углерода из вторых. Так, рентгеноспектральный анализ с помощью прибора "Камебакс" диффузионного соединения материалов рассматриваемых классов (жаропрочного литейного сплава АНВ-300 со сталью 40Х) позволил авторам работы [19] установить, что причина его низкой прочности кроется в образовании объемной сетки карбидов титана, вольфрама, хрома в сплаве АНВ-300 вблизи зоны контакта со сталью 40Х (рис.2.9).

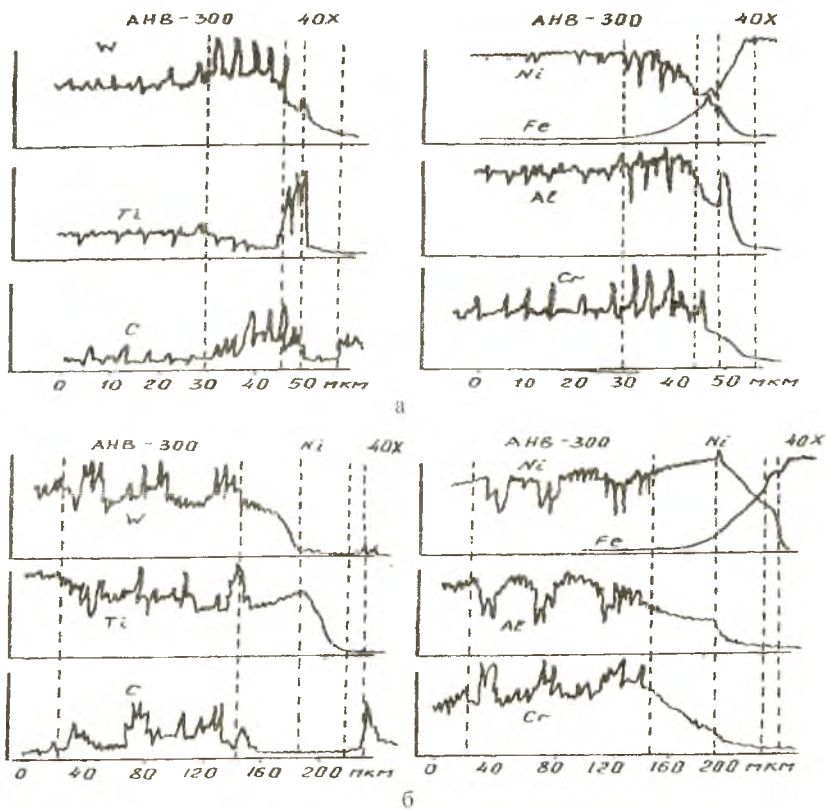


Рис.2.9. Распределение легирующих элементов в зоне соединения сплава АНВ-300 со сталью 40Х: а - без прослоя; б - с никелевым прослоем

Одним из основных и наиболее радикальных способов борьбы с выявленным вредным явлением в технологии диффузионной сварки, как известно, является введение в стык соединяемых деталей третьих металлов, выполняющих барьерные функции.

В полной мере всем требованиям, предъявляемым к материалам барьерных прослоев, отвечает, например, никель. Никель является основой жаропрочных сплавов ВЖЛ12У и ЖС6К и обладает неограниченной взаимной растворимостью с железом - основным компонентом сталей.

Большое влияние на прочность и работоспособность диффузионных соединений оказывает толщина барьерных прослоев. Выбор толщины барьерных прослоев производится, в частности, с учетом температуры сварки.

В соответствии с выводами работы [6] оптимальная температура диффузионной сварки ( $T_{\text{опт}}$ ) равна температуре, при которой коэффициент трения покоя свариваемых материалов достигает максимальной величины.

Температурные зависимости коэффициентов трения покоя ( $f_n$ ) никеля в паре с жаропрочными сплавами ЖС6К и ВЖЛ12У практически идентичны (кривые 1 и 2 на рис.2.10 совпадают), а в сочетании со сталями несколько различаются (рис.2.10,б). При величине контактного давления ( $P$ ), равной 5 МПа,  $f_n$  рассматриваемых сочетаний материалов достигают максимальной величины приблизительно при следующих температурах:

- жаропрочные сплавы (ЖС6К, ВЖЛ12У) + Ni - 1373...1445 К;
- сталь ЭИ961 – Ni- 1343...1403 К;
- сталь 45Х – Ni - 1313...1393 К.

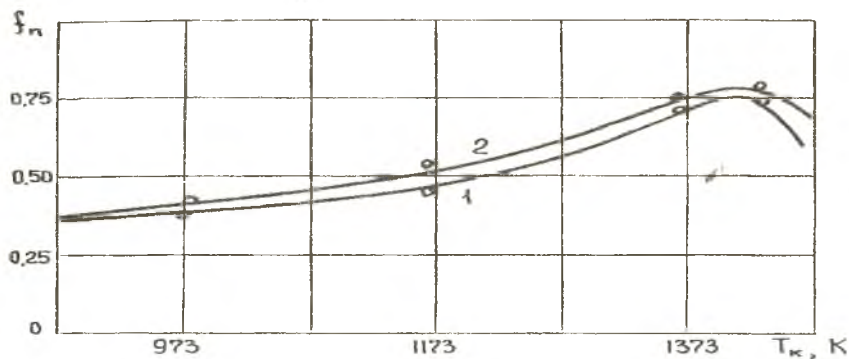
Увеличение  $P$  до 10 МПа приводит к росту  $f_n$  всех испытанных сочетаний материалов и не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на положение экстремумов на оси температур.

Поскольку диапазоны “благоприятных температур” для жаропрочных сплавов и сталей в паре с никелем близко расположены и перекрываются, можно предположить, что оптимальными температурами диффузионной сварки рассматриваемых композиций будут температуры, заключенные в следующих интервалах:

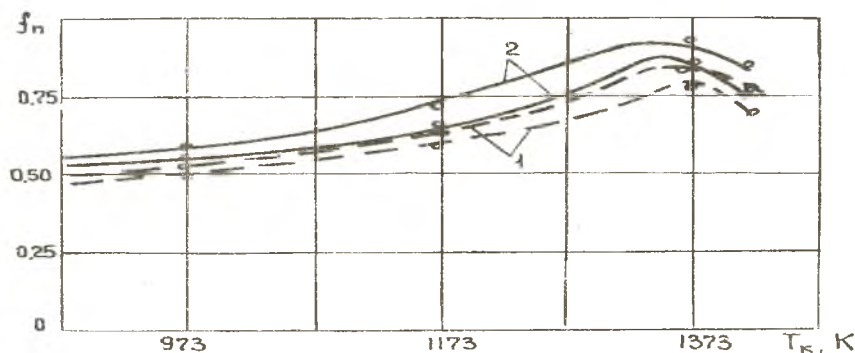
ВЖЛ12У + Ni + ЭИ961 - 1373...1403 К;

ЖС6К + Ni + ст.45Х - 1353...1393 К.

При температуре сварки 1393К (верхняя граница), сварочном давлении 10 МПа и времени сварки 30 мин никелевая прослойка толщиной 100 мкм непроницаема для сквозной диффузии карбидо-



а

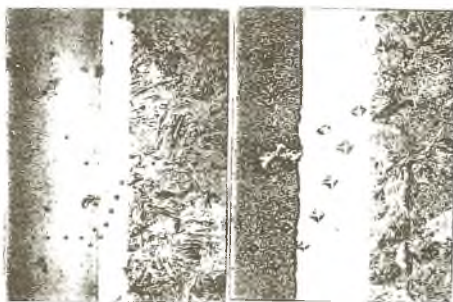


б

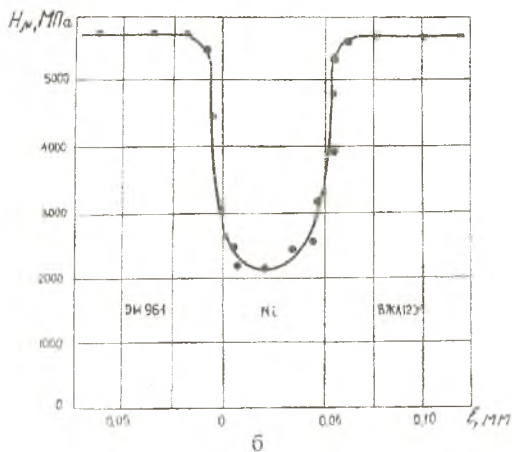
Рис.2.10 Зависимость коэффициентов трения покоя ( $f_n$ ) материалов сварного соединения “жаропрочный сплав + никель + сталь” от температуры ( $T_k$ ) и контактного давления ( $P$ ): а) сочетание (ЖС6К; ВЖЛ12У) – никель: 1 -  $P=5$  МПа; 2 -  $P=10$  МПа; б) — ст. 45 – Ni; - - - ст. ЭИ961 + Ni: 1 -  $P=5$  МПа; 2 -  $P=10$  МПа

образующих элементов соединяемых материалов (рис 2.11). Аналогичный результат подтверждается исследованиями переходной зоны в сочетании АНВ-300 + 40Х (рис. 2.9,б).

При сварочном давлении  $10 \pm 2$  МПа величина макропластической деформации ( $\epsilon_R$ ) составляет 8 – 10 %. Механические испытания на



а



б

Рис. 2.11. Структура (а) и микротвердость (б) переходной зоны соединения ВЖЛ12У – ЭИ961 через прослойку никеля

растяжение позволили оценить прочность соединения, которая составила 0,8 – 0,9 прочности основного материала.

Однако выбор состава “барьерных” прослоек и оценка оптимальных режимов их соединения с основными материалами является только одной из задач, решаемых при разработке технологии диффузионной сварки. Второй очень важной задачей является определение толщины “барьерной” прослойки. Выбор толщины прослойки производится из следующих соображений: во-первых, она должна обеспечивать исключение образования хрупких соединений (барьерные функции) и, во-вторых, не должна значительно снижать механические свойства (прочность) соединения в целом.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОСЛОЙКОЙ

Необходимо отметить, что оптимизация толщины “барьерных” прослоек и режимов сварки является достаточно сложной и трудоемкой задачей. В связи с этим весьма актуальной и важной проблемой является математическое моделирование процесса массопереноса в многослойных системах. Математические модели позволяют прогнозировать глубину взаимной диффузии элементов соединяемых материалов как в условиях сварки, так и в условиях термообработки и эксплуатации при высоких температурах. При этом имеется возможность научно обоснованной оценки толщины прослойки с точки зрения ее “барьерных” свойств при изготовлении и эксплуатации диффузионных соединений.

Для теоретической оценки процесса взаимной диффузии в соединениях с прослойкой (были выбраны системы Fe-Ni, Fe-Ni-V и ЖС6К-Ni-45X) использована физическая модель массопереноса в пластически деформированных материалах. Математически задача может быть сформулирована следующим образом.

Рассматривается одномерная система, состоящая из двух различных материалов и прослойки из третьего материала толщиной  $h$  между ними. Исследование взаимной диффузии материалов производится в условиях пластической деформации во всех компонентах (материалах) системы, которая задается таблицами относительных деформаций. Учитывается концентрационная зависимость компонента 1 (материал прослойки) в компонентах 2,3, задающихся таблицами значений коэффициентов активности компонента 1 в сплавах с компонентами 2 и 3. Предполагается, что “хвосты” концентрационных распределений компонент 2 и 3 в прослойке компонента 1 пространственно не достигают друг друга (не перекрываются), и поэтому для описания процессов будет использован аппарат теории диффузии в двухкомпонентных сплавах.

Введем следующие обозначения:

1, 2, 3 - номера компонент(материалов);  $c_1^0$ ,  $c_{12}^0$ ,  $c_{13}^0$  - начальные уровни концентраций компонента 1 в компонентах 2 и 3 соответст-

венно;  $D_{12}$ ,  $D_{13}$  - коэффициенты взаимной диффузии (КВД) компонентов 1 и 2, 1 и 3 соответственно;  $\gamma_{12}(c_1)$ ,  $\gamma_{21}(c_2)$ ,  $\gamma_{13}(c_1)$  и  $\gamma_{31}(c_1)$  - коэффициенты активности 1-го компонента во 2-м, 2-го в 1-м, 1-го в 3-м, 3-го в 1-м (заданы таблицами);  $\varepsilon_1 = \Delta l_1 / l_{01}$ ,  $\varepsilon_2 = \Delta l_2 / l_{02}$ ,  $\varepsilon_3 = \Delta l_3 / l_{03}$  - относительные деформации компонент (заданы таблицами зависимости экспериментальных значений деформаций от времени).

Процесс взаимной диффузии описывается дифференциальным уравнением относительно концентрации  $c_1(x, t)$  компонента 1:

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c_1}{\partial x} \right), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t < t_0 \quad (3.1)$$

при следующих условиях:

$$c_1(x, 0) = \begin{cases} c_{12}^0, & -\infty < x < -\frac{h}{2}, \\ c_1^0, & |x| \leq \frac{h}{2}, \\ c_{13}^0, & \frac{h}{2} < x < \infty, \end{cases} \quad (3.2)$$

$$c_1(x, t)_{x \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0, \quad 0 < t < t_0.$$

Коэффициенты диффузии (КД) определяются соотношениями:

$$D = \begin{cases} D_{12}(c_1, \dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, t), & -\infty < x \leq 0, \\ D_{13}(c_1, \dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_3, t), & 0 < x < \infty, \end{cases}$$

где

$$D_{12}(c_1, \dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, t) = D_{01} \left( 1 + \frac{\partial \ln \gamma_{12}}{\partial \ln c_1} \right) (1 + k_2 \dot{\varepsilon}_2(t)) (1 - c_1) +$$

$$+ D_{02} \left( 1 + \frac{\partial \ln \gamma_{21}}{\partial \ln (1 - c_1)} \right) (1 + \dot{\varepsilon}_1(t)) c_2, \quad (3.3)$$

$$D_{13}(c_1, \dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_3, t) = D_{01} \left( 1 + \frac{\partial \ln \gamma_{13}}{\partial \ln c_1} \right) (1 + k_3 \dot{\varepsilon}_3(t)) (1 - c_1) +$$

$$+ D_{03} \left( 1 + \frac{\partial \ln \gamma_{31}}{\partial \ln (1 - c_1)} \right) (1 + \dot{\varepsilon}_1(t)) c_2;$$



$D_{01}=D_{01}^* \exp(-Q_1^*/RT)$ ,  $D_{02}=D_{02}^* \exp(-Q_2^*/RT)$  и  $D_{03}=D_{03}^* \exp(-Q_3^*/RT)$  - коэффициенты самодиффузии компонент 1, 2 и 3 без приложенного извне механического напряжения;  $D_{01}^*$ ,  $D_{02}^*$ ,  $D_{03}^*$  и  $Q_1^*$ ,  $Q_2^*$ ,  $Q_3^*$  - их предэкспоненциальные множители и энергии активации;  $k_1$ ,  $k_2$ , и  $k_3$  - постоянные, характеризующие пластические

деформационные свойства материалов, равные  $k_1 = \frac{\eta_{1v}\tau_1}{\tau_{0v1}}$ ,  $k_2 = \frac{\eta_{2v}\tau_2}{\tau_{0v2}}$ ,

$$k_3 = \frac{\eta_{3v}\tau_3}{\tau_{0v3}}; \eta_{0v1} = \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right), \eta_{0v2} = \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right), \eta_{0v3} = \exp\left(-\frac{Q_3}{RT}\right) -$$

равновесные концентрации вакансий материалов, а  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  - энергии их образования; концентрации вакансий материалов, возникших в результате пластической деформации, берутся в виде

$$h_{jv} = a_j + b_j \varepsilon_j^{n_j} \quad (j=1,2,3), \quad (3.4)$$

где  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $n_j$  - эмпирические константы эксперимента;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  - время жизни вакансий в соответствующих компонентах.

Для решения поставленной задачи использовался численный метод решения.

При численном решении задачи (3.2), (3.3), (3.4) бесконечная область изменения переменной  $x$  заменяется конечным интервалом

$[-x_0, x_0]$ , где  $x_0 = \frac{h}{2} + l_D$ . Величина  $l_D$  является условной шириной

диффузионной зоны, которая пропорциональна  $\beta\sqrt{Dt_0}$ , где  $\beta$  - задаваемый параметр. При этом условия на бесконечности (3.3) заменяются "мягкими" условиями при  $x = \pm x_0$ :

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = 0, \quad x = x_0, \quad 0 \leq t \leq t_0. \quad (3.5)$$

Перейдем к безразмерным переменным

$$x^* = \frac{x}{x_0}, \quad t^* = t/t_0, \quad D^* = \frac{D}{D_{01}^*}.$$

Задачи (3.1), (3.2), (3.5) в безразмерных переменных примут вид (штрихи опущены):

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c_1}{\partial x} \right), \quad -1 < x < 1, 0 < t \leq 1, \quad (3.6)$$

$$c_1(x, 0) = \begin{cases} c_{12}^0, & -1 \leq x \leq -\frac{h}{2}, \\ c_1^0, & |x| \leq \frac{\bar{h}}{2}, \\ c_{13}^0, & \frac{h}{2} \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = 0, \quad x = \pm 1, 0 < t \leq 1. \quad (3.8)$$

Здесь  $\alpha = D_{01}^* \cdot \frac{t_0}{x_0^2}$ ,  $\bar{h} = \frac{h}{x_0}$ . Ввиду того, что начальное распределение концентраций  $c_1$  в начальный момент времени имеет разрыв при  $x = \pm \frac{\bar{h}}{2}$ , в расчетах использовалась неравномерная разностная сетка, сгущающаяся вблизи точек  $x = \pm \frac{\bar{h}}{2}$ .

Узлы сетки  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, i_{\max}$  вычислялись по формулам

$$x_i = -x_{i_{\max}-(i+1)}, \quad i = 1, 2, \dots, i_0 - 1,$$

$$x_i = \frac{\bar{h}}{2} \left( 1 + \frac{sh(\tau(\bar{x}_{i-i_0} - B))}{sh(\tau B)} \right), \quad i = i_0, i_0 + 1, \dots, i_{\max},$$

где

$$\bar{x}_{i-i_0} = (i - i_0)d, \quad i = i_0, \dots, i_{\max}, \quad d = \frac{1}{(i_{\max} - i_0)}, \quad i_0 = \frac{1 + i_{\max}}{2},$$

$$B = \frac{1}{2\tau} \ln \left( \frac{1 + (e^\tau - 1) \frac{\bar{h}}{2d}}{1 + (e^{-\tau} - 1) \frac{\bar{h}}{2d}} \right),$$

$i_{\max}$  – нечетное,  $0 < \tau < \infty$  – параметр растяжения.



Узлы сетки по времени  $t$  также выбирались со сгущением при  $t = 0$ .

Задача (3.6), (3.8) аппроксимируется неявной разностной схемой [20]:

$$\frac{(c_1)_i^{n+1} - (c_1)_i^n}{\tau^n} = \alpha \frac{2}{h_{i-1} + h_i} (D_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{(c_1)_{i+1}^{n+1} - (c_1)_i^{n+1}}{h_i} - D_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{(c_1)_i^{n+1} - (c_1)_{i-1}^{n+1}}{h_i}), \quad (3.9)$$

$$i = 2, 3, \dots, i_{\max} + 1, n = 0, \dots, n_{\max} - 1,$$

$$(c_1)_i^0 = \begin{cases} c_{12}^0, & -1 \leq i \leq i_1, \\ c_1^0, & i_1 \leq i \leq i_2, \\ c_{13}^0, & i_2 \leq i \leq i_{\max}, \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\alpha D_{3/2}^{n+1} \frac{(c_1)_{i_2}^{n+1} - (c_1)_{i_1}^{n+1}}{\delta_{i_1}} - \frac{h_{i_1}}{2\tau^n} ((c_1)_{i_1}^{n+1} - (c_1)_{i_1}^n) = 0, \quad (3.11)$$

$$\alpha D_{i_{\max} - \frac{1}{2}}^{n+1} \frac{(c_1)_{i_{\max}+1}^{n+1} - (c_1)_{i_{\max}}^{n+1}}{\delta_{i_{\max}-1}} - \frac{h_{i_{\max}-1}}{2\tau^n} ((c_1)_{i_{\max}}^{n+1} - (c_1)_{i_{\max}}^n) = 0. \quad (3.12)$$

В предыдущих соотношениях  $(c_1)_i^n$  - приближенное значение концентрации  $c_1$  в узле двумерной сетки с координатами  $(x_i, t^n)$ ,  $\tau^n = t^{n+1} - t^n$  - шаг сетки по времени,  $h_i = x_{i+1} - x_i, (i = 1, \dots, i_{\max-1})$  - шаг сетки по  $x$ ,  $D_{i+1/2}^{n+1} = (D_i^{n+1} + D_{i+1}^{n+1})/2, i = 1, \dots, i_{\max-1}$ . Номера узлов  $i_1, i_2$  определяются условиями:

$$X_{i_1} < -\frac{\bar{h}}{2} \leq X_{i_1+1}, X_{i_2-1} < \frac{\bar{h}}{2} \leq X_{i_2}.$$

Разностное уравнение (3.10) аппроксимирует уравнение (3.6) с первым порядком по  $x$  и  $t$ , соотношения (3.11), (3.12) аппроксимируют граничные условия (3.8) со вторым порядком.

Коэффициенты разностных уравнений содержат значения коэффициента диффузии  $D$  в узлах сетки, который определяется с помощью таблично заданных величин  $\gamma_{12}, \gamma_{21}, \gamma_{13}, \gamma_{31}, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ . Эти величины приближенно заменяются интерполяционными кубическими сплайнами [20, 21], а значения величин

$$\frac{\partial \ln \gamma_{12}}{\partial \ln c_1}, \frac{\partial \ln \gamma_{21}}{\partial \ln(1-c_1)}, \frac{\partial \ln \gamma_{13}}{\partial \ln c_1}, \frac{\partial \ln \gamma_{31}}{\partial \ln(1-c_1)}, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3,$$

участвующие в формуле для  $D$ , вычисляются путем дифференцирования соответствующих сплайнов.

Алгоритм решения разностной задачи (3.9)- (3.12) заключается в следующем.

В начале расчета вычисляются постоянные задачи, строится разностная сетка по  $x$ , вычисляются шаги сетки и вспомогательные величины. Затем задаются начальные условия (3.10).

Для нахождения приближенного решения на каждом шаге по времени решается система нелинейных алгебраических уравнений (3.10), (3.11), (3.12) относительно неизвестных  $(c_i)_1^{n+1}, (c_i)_2^{n+1},$

$(c_i)_{\max}^{n+1}$ . Для решения этой системы используется метод простой итерации, т.е. такой способ построения итераций, при котором коэффициенты в уравнениях вычисляются по значениям решения, полученного на предыдущей итерации. В качестве нулевого приближения на каждом новом шаге по времени берутся уже известные значения решения на предыдущем шаге. Получающаяся в итоге на каждой итерации линейная система уравнений решается методом прогонки [20, 21]. Итерации проводятся до тех пор, пока величина

$$\max \left| \frac{(c_i^{n+1})^{k+1} - c_i^{n+1})^k}{(c_i^{n+1})^{k+1}} \right|,$$

где  $1 \leq i \leq i_{\max}$ ,  $k$  – номер итерации, не будет достаточно мала.

Расчет всей задачи заканчивается при достижении конечного момента времени.

Пакет прикладных программ DIFEXLAY-MD представляет собой программную реализацию математической модели диффузии в одномерной системе из различных компонентов при наличии прослойки между компонентами из другого материала. Пакет основан на численной методике и алгоритме, описанных выше, и предназначен для проведения вычислительных экспериментов при моделировании процесса диффузии. Исходная информация физического характера, необходимая для осуществления численного моделирования с помощью данного пакета, следует из характера решаемой задачи. Требуемые данные, а также параметры, определяемые численным методом, вводятся пользователем в режиме диалога. Численное моделирование с использованием пакета начинается с определения физических параметров моделируемого процесса диффузии. Следующие этапы – использование вычислительной части пакета, программ обработки результатов счета и графической визуализации.

Непосредственной выходной информацией счетной части пакета является распределение концентрации  $c_1$  компонента 1 в системе в момент времени  $t_0$  в графической и табличной формах. Предусмотрена возможность многовариантного счета при различных значениях параметров, определяющих физический процесс. При этом выходная информация выводится в виде нескольких графиков, помещаемых на одном рисунке.

При создании пакета использовался модульный принцип. Программа для решаемой задачи состоит из отдельных подпрограмм – модулей, предназначенных для реализации различных функций. Все модули данного пакета делятся по назначению на следующие группы: 1. Модуль ввода исходной информации. 2. Группа вычислительных модулей, реализующих численное решение задачи. Сюда входят подпрограмма для организации многовариантного счета, подпрограмма решения задачи (один вариант), подпрограмма построения кубического интерполяционного сплайна, вычисления значения сплайна и значения его производной в заданной точке, подпрограмма решения системы разностных уравнений. 3. Группа модулей для вывода результатов в графическом и табличном видах. 4. Группа вспомогательных модулей для организации диалога с пользователем.

Связь между отдельными модулями осуществляется через основную программу, которая содержит следующие элементы: 1. Описание массивов и общих блоков. 2. Вызов модуля для ввода исходной информации. 3. Вызов модуля, управляющего счетной частью. 4. Вызов модуля, управляющего обработкой и выводом результатов. 5. Вызовы модулей для диалога с пользователем.

Кроме того, отдельные модули связаны между собой через общие блоки.

В качестве примера рассмотрим математическое моделирование процессов диффузионного соединения, выполненного с помощью прикладных программ DIFEXLAY-MD применительно к диффузионному соединению сплавов 45X, ЖС6К (с никелевой прослойкой) и их модельных аналогов - никеля и железа. Никель и железо являются основой многих технических сплавов; кроме того, для этих металлов имеются довольно обширные литературные данные по их физико-механическим свойствам. По этим причинам никель и железо были выбраны в данной работе в качестве модельных. Основные значения констант и характеристик этих материалов заданы в самих пакетах; при этом предусмотрена возможность задания серии новых значений некоторых из них. Там, где это было возможно, в расчетах использованы значения физических величин реальных сплавов 45X, ЖС6К; в случаях, когда таковые не были найдены, использованы данные сплавов, близких к ним по составу или, в крайнем случае, характеристики чистых железа или никеля. Приведем их основные значения:

- температурная зависимость коэффициентов самодиффузии никеля принималась равной  $D_{Ni}^*(T) = 1.27 \exp(-66\,800 \text{ кал/моль}/(RT))$  см<sup>2</sup>/с; железа ( $\gamma$ -фаза) -  $D_{Fe}^*(T) = 1.05 \exp(-67\,800 \text{ кал/моль}/(RT))$  см<sup>2</sup>/с [193, 172]; согласно данным работы [172] в сплаве железо - 4,5% Cr (в стали 45X  $\approx$  1% Cr); коэффициент самодиффузии железа равен  $D(T) = 25 \exp(-75000 \text{ кал/моль}/(RT))$ ; коэффициент взаимной диффузии в сплаве Ni + 10%Cr  $D(T) = 1.4 \exp(-64000 \text{ кал/моль}/(RT))$ ;

- температурная зависимость коэффициента диффузии никеля в  $\gamma$ -железе принималась равной  $D_{Ni \rightarrow Fe}^* = 1.25 \exp(-67700 \text{ кал/моль}/(RT))$  см<sup>2</sup>/с [22];

- сведения о коэффициентах активности никеля и железа взяты из монографии [23];

- данные по деформированию образцов из железа и никеля получены в настоящей работе экспериментально;
- начальная длина образцов составляла 3,0 см (в расчетах использована длина “вылета” образца, равная 20 мм);
- временной интервал между отдельными измерениями величины абсолютной деформации образцов составлял 1 минуту;
- температура процесса диффузионного соединения никеля и железа равна 1393К и 1423К;
- энергия образования вакансий в никеле принималась равной для никеля 39190 кал/моль (1,7 eV), для  $\gamma$ -железа 39190 кал/моль (1,7 eV) [22] либо 34575 кал/моль (1,5 eV) и для сплава 45Х - 26000 кал/моль (1,13 eV);
- время жизни неравновесных вакансий принималось равным от  $10^3$  с до  $10^7$  с; оценка  $t$  производилась по формуле  $t \cong L_0^2/D_v$ , где  $L_0$  - расстояние до вакансионного стока (принималось равным размеру зерна),  $D_v$  - коэффициент диффузии вакансий (по порядку величины приблизительно равен коэффициенту самодиффузии);
- отношение концентраций неравновесных и равновесных вакансий составляло 0,05-20.

Остальные параметры представлены в табл. 2.6. Параметры деформирования определялись экспериментальным путем.

Для приготовления образцов из массивных материалов 45Х и ЖС6К вырезались заготовки в виде цилиндров диаметром 12 мм и длиной 30 мм. Химический состав материалов был следующий:

- 45Х (углерод - 0,41-0,49%, кремний - 0,17-0,37%, марганец - 0,50-0,80%, хром - 0,80-1,10%, железо - остальное);
- ЖС6К (углерод - 0,18-0,20%, хром - 9,5-12%, кобальт - 4-5%, молибден - 3,5-4,8%, алюминий - 5-6%, вольфрам - 4,5-5,5%, железо - 2%, остальное - никель);
- Ni (марка НП: марганец - 0,001%, железо - 0,002%, медь - 0,001%).

Сварка проводилась на рекомендуемых выше режимах сварки: температура - 1393К и 1423К, время сварки - 30 мин, давление сжатия - 12 МПа. Поскольку параметры диффузии никеля в этих сплавах в литературе отсутствуют, для теоретических расчетов использовались некоторые характеристики для его сплавов с армко-железом и никелем и данные по деформированию работы [24].

Наложение давления в процессе сварки приводит к деформации образцов. Величина абсолютной деформации  $\Delta l = l - l_0$ , где  $l_0$  - начальная длина образца, а  $l$  - длина образца в момент времени  $t$ , регистрируется индикатором перемещения в течение всего промежутка времени сварки. Для выяснения характера деформирования для каждого образца необходимо построить зависимость абсолютной деформации  $\Delta l$  от времени сварки  $t$ .

Результаты эксперимента представляли в виде таблиц, показывающих зависимость абсолютной деформации (в миллиметрах) от времени  $t$ . По данным таблиц были построены графики, один из которых в качестве примера приведен на рис. 3.1.

Полученные данные были использованы при численном решении теоретической задачи.

Число узлов разностной сетки по оси X составляло 100, по оси времени - 100. Результаты расчетов выводились на экран дисплея в графической форме в виде зависимости концентрационных распределений никеля в зависимости от параметров задачи. В случае необходимости численные значения концентрации в узлах пространственной сетки могут быть также выведены в численной форме.

Для обеспечения контроля и удобства анализа влияния различных факторов на концентрационное распределение никеля в сплавах производилось сравнение решения с соответствующим решением диффузионного уравнения для взаимной диффузии исследуемых элементов (Ni, V, Fe) при  $\tau_{\text{св}} = 1800$  с и  $T_{\text{св}} = 1393, 1423$  К без деформирования.

На рис. 3.2 и 3.3 приведены концентрационные кривые распределения исследуемых элементов в зоне диффузионного соединения. Как видно из рис. 3.3, глубина взаимного проникновения никеля и железа увеличивается с ростом температуры, что позволяет рекомендовать сохранить стандартную температуру диффузионной сварки в ее технологии.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что оптимальным профилем концентрации никеля в диффузионном соединении является профиль, соответствующий стандартной технологии диффузионной сварки.

Значения параметров численного моделирования диффузионной сварки  
45X-Ni-ЖС6К с помощью ППП "DIFEXLAY-MD"

Номер параметра в ППП "DIFEXLAY-MD"	Значение параметра
1	1,27
2	25,0
3	1,4
4	66800
5	75000
6	64000
7	39100
8	26000
9	39100
10	$a_1=1,8e-7; b_1=1,8e-5; n_1=1$
11	$a_2=3,2e-5; b_2=3,2e-3; n_2=1$
12	$a_3=1,8e-7; b_3=1,8e-5; n_3=1$
13	1e4
14	1e7
15	1e5
16	1373,1403
17	50
18	1.0
19	0.0
20	0,75
21	18,0
22	10
23	10
24	10
25	1
26	$\gamma$
27	${}^{\circ}\text{Ni}^{(1)}$
28	${}^{\circ}\text{45X}^{(1)}$
29	${}^{\circ}\text{ЖС6К}^{(1)}$

Как показывает численное моделирование, зоны взаимной диффузии достаточно малы и не превышают 10 мкм, что хорошо согласуется с данными других работ.

Таким образом, теоретически показано, что для сохранения "барьерных" свойств толщина прослойки 0,05 – 0,1 мм вполне достаточна.



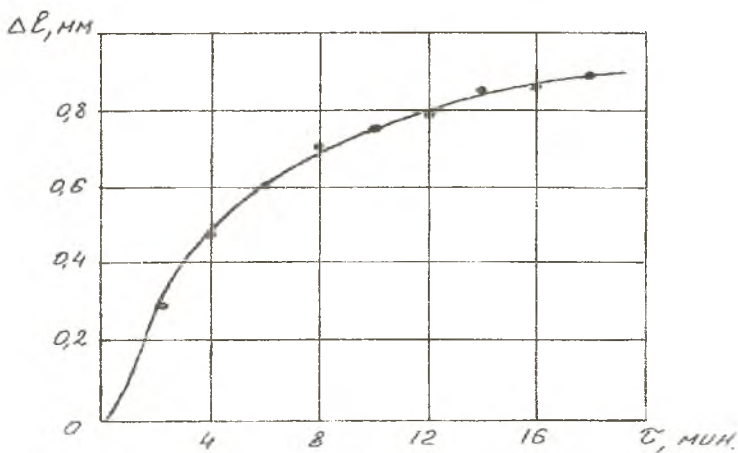


Рис. 3.1. Характерная зависимость абсолютной деформации зоны соединения от времени

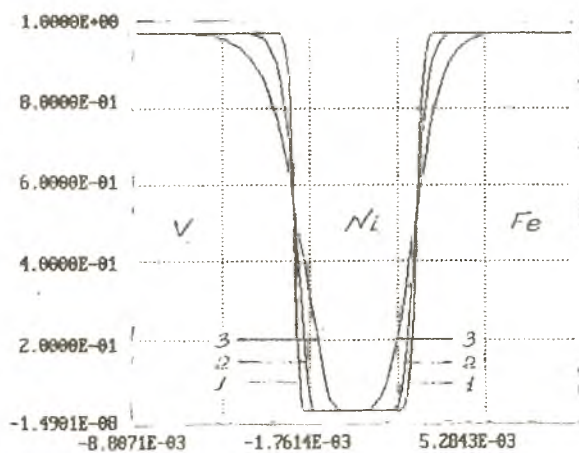
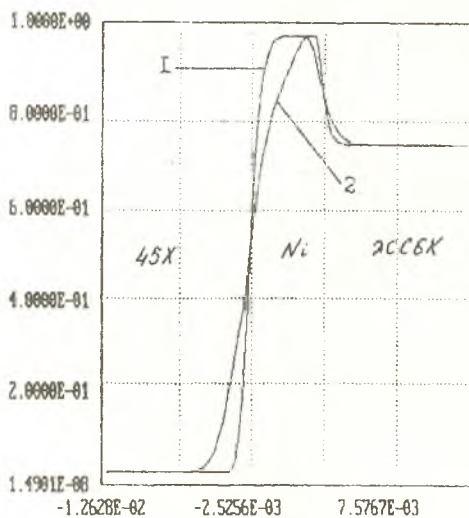
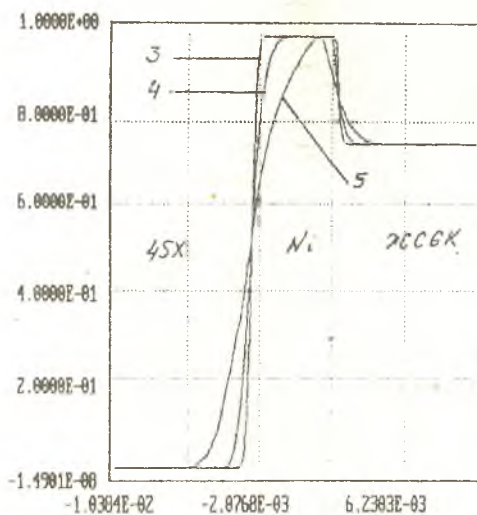


Рис. 3.2. Концентрационное распределение ванадия и железа в прослойке никеля в зависимости от сварочного давления ( $P_{св}$ ):  
 1 -  $P_{св} = 0$ ; 2 -  $P_{св} = 6 \text{ МПа}$ ; 3 -  $P_{св} = 15 \text{ МПа}$





a



б

Рис. 3.3. Концентрационное распределение никеля в зоне диффузионного взаимодействия 45X-Ni-ZhC6K при  $T_{CB} = 1393K$  (а) и  $T_{CB} = 1423K$  (б):  
 1 и 3 -  $P_{CB} = 0$ ; 2 и 5  $P_{CB} = 10$  МПа; 4 -  $P_{CB} = 5$  МПа

Прослойка никеля является не только барьером для диффузионного массопереноса на стадии формирования соединения, но и активирующим фактором на стадии физического взаимодействия – начальной стадии диффузионной сварки. Никель является материалом более пластичным, чем свариваемые, что облегчает формирование физического контакта поверхностей. Кроме того, мягкая прослойка никеля является своеобразным демпфером, который при термоударах, вибрационных, циклических и ударных нагрузках в условиях эксплуатации позволяет снизить уровень напряженного состояния в сварном соединении. Изменение механических свойств чистого никеля в зависимости от температуры представлено на рис. 3.4.

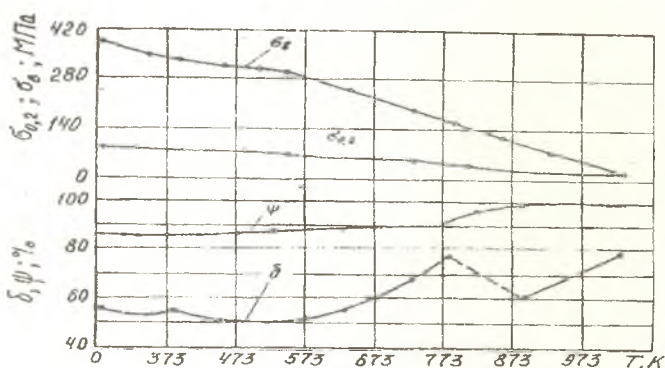


Рис. 3.4. Механические свойства никеля в зависимости от температуры

Однако использование прослоек, у которых механические свойства значительно ниже свойств свариваемых материалов, может привести к снижению прочности всего соединения в целом.

#### 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛЩИН БАРЬЕРНЫХ ПРОСЛОЕК С УЧЕТОМ ИХ КОНТАКТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Работоспособность неразъемных механических неоднородных соединений в значительной степени определяется размерами и свойствами мягкой прослойки. Совместная работа разнородных частей соединения приводит при нагружении составного образца к возникновению в прослойке стесненной деформации и сложного напряженного состояния, что отражается на прочностных свойствах прослойки, а следовательно и всего соединения. Стесненность деформации и жесткость напряженного состояния в прослойке в первую очередь зависят от относительной толщины прослойки.

Прочность соединения с мягкой прослойкой может быть близка к прочности менее прочного из соединяемых материалов. Это связано с эффектом контактного упрочнения тонкой мягкой прослойки, детально изученным в работах Качанова, Бакши и их сотрудников [25]. Свойства соединений с мягкой прослойкой существенно зависят от относительной толщины мягкой прослойки  $\chi$  и соотношения прочностных свойств металла прослойки и прилегающих более твердых металлов:

$$K_v = \frac{\sigma_v^M}{\sigma_v^{пр}}$$

При растяжении развитие пластических деформаций мягкого металла прослойки сдерживается вблизи граничных поверхностей более прочным материалом. По мере сближения граничных поверхностей (уменьшения  $\chi$ ) течение прослойки все более затрудняется, что проявляется в увеличении деформирующего и разрушающего усилий.

Для цилиндрических образцов с поперечной прослойкой относительная ее толщина определяется отношением ее толщины  $h$

к начальному диаметру образца  $d$  ( $\chi = \frac{h}{d}$ ). При этом, естественно,

для любых величин  $\chi$  нижней границей механических свойств будут свойства мягкого материала – прослойки, а верхней границей – прочностные характеристики основного “твердого” материала.

Существующая теоретическая оценка прочности составных образцов [6] приводит к зависимости, дающей наилучшее совпадение расчетных данных с экспериментальными:

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_{\sigma}^{np} \cdot K_P,$$

где  $\sigma_{\sigma}^{np}$  – предел прочности “мягкого” материала прослойки,

$K_P$  – коэффициент контактного упрочнения.

Коэффициент контактного упрочнения является согласно экспериментальным данным [6] функцией не только относительной толщины “мягкой” прослойки, но и степени механической неоднородности соединения, определяемой коэффициентом

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{\sigma}^M}{\sigma_{\sigma}^{np}}$$

( $\sigma_{\sigma}^{np}$  – предел прочности менее прочного из соединяемых материалов).

В случае осесимметричной деформации действительный коэффициент контактного упрочнения, как установлено [26]:

$$K_P = \frac{\pi}{4} + \frac{K_{\sigma} - \frac{\pi}{4}}{3\sqrt{3}(K_{\sigma} - \frac{\pi}{4})\chi + \frac{\exp(c(\chi_M - \chi)) - 1}{\exp(c \cdot \chi_M) - 1}}.$$

Здесь  $\chi_M = \frac{1}{3\sqrt{3}(1 - \frac{\pi}{4})} = 0.895$  – относительная толщина

“мягкой” прослойки, при которой начинает проявляться эффект контактного упрочнения:

$C$  – параметр, определяемый интенсивностью вовлечения “твердого” металла в пластическое деформирование, зависящий от  $K_{\sigma}$  и от способности металла к упрочнению в ходе его деформирования.

Случай  $C = 0$  соответствует деформированию неупрочняющегося материала, что позволяет рассчитывать нижнюю границу реальной прочности составных образцов:

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_{\sigma}^M \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{K_{\sigma} - \frac{\pi}{4}}{1 + 3\sqrt{3}(K_{\sigma} - \frac{\pi}{4})\chi} \right]$$

Верхней границе реальной прочности соответствует расчет при экстремальном значении

$$C = C_{\kappa} = 3\sqrt{3}(K_{\sigma} - \frac{\pi}{4}).$$

Для изучаемого сочетания верхняя граница реальной прочности равна  $\sigma_{\sigma}^T$ , то есть является и верхней границей теоретической прочности.

Равнопрочность сварного соединения с мягкой поперечной прослойкой и основного металла может быть достигнута при

$$\chi_{\kappa p}^{\sigma} = \frac{1}{3\sqrt{3}(1 - \frac{\pi}{4})}.$$

На основании предположения о равнопрочности сварного соединения и основного металла может быть рассчитана предельно допустимая толщина прослойки. Для устранения влияния масштабного фактора на оценку толщины прослойки с учетом эффекта контактного упрочнения расчет должен быть произведен для минимального из диаметров соединения, который соответствует диаметру образца, используемого для механических испытаний на растяжение ( $d = 6$  мм).

Следовательно, для сочетания ЖС6К + 45Х при 293К  $\sigma_{\sigma}^M = \sigma_{\sigma}$  (ЖС6К) = 900 МПа,  $\sigma_{\sigma}^{np} = \sigma_{\sigma}$  (Ni) = 400 МПа, значения  $K_{\sigma} = 2,25$ , а  $\chi_{\kappa p} = 0,135$ . При этом критическое значение относительной толщины прослойки равно

$$h = \chi_{\kappa p} \cdot d = 0,81 \text{ мм.}$$

При комнатной температуре соединение теоретически должно быть равнопрочно сплаву ЖС6К при толщине никелевой прослойки менее 0,81 мм. Однако в неидеализированных условиях наблюдается неполная реализация контактного эффекта. Объясняется это тем, что

при значениях средних напряжений, приближающихся к  $\sigma_B^M$ , в твердом металле происходит быстрое нарастание деформаций с нагрузкой, что ослабляет сдерживание им деформаций прослойки.

Прочность соединения при значении параметра  $\chi$  меньше  $\chi_{кр}^B$  может быть определена по формуле

$$\sigma_B = \sigma_B^{IP} \cdot K_p,$$

где  $K_p = 1,00 - 0,25$  – коэффициент реализации теоретической прочности, полученный на основании статистической обработки [11].

Например, для широко распространенного сочетания ВЖЛ12У + ЭИ961 результаты расчета зависимости прочности соединения от температуры испытаний при толщине прослойки 0,05 мм и диаметре образца 6 мм приведены на рис. 4.1.

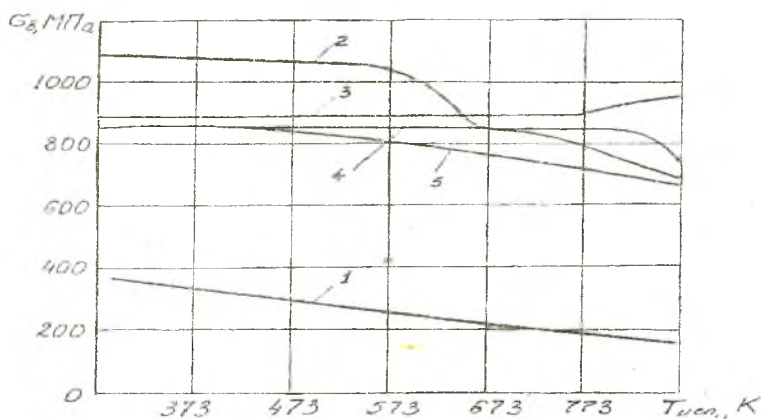


Рис. 4.1. Зависимость предела кратковременной прочности от температуры: 1 – никель ИИ-2; 2 – сталь ЭИ961; 3 – сплав ВЖЛ12У; 4 – сварное соединение (эксперимент); 5 – сварное соединение (расчет)

Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о возможности использования предложенной методики для расчета прочностных характеристик соединения легированная сталь - жаропрочный сплав, сваренных через никелевую

прослойку. Подтверждается также и вязкий характер разрушения, в предположении которого проводилась расчетная оценка.

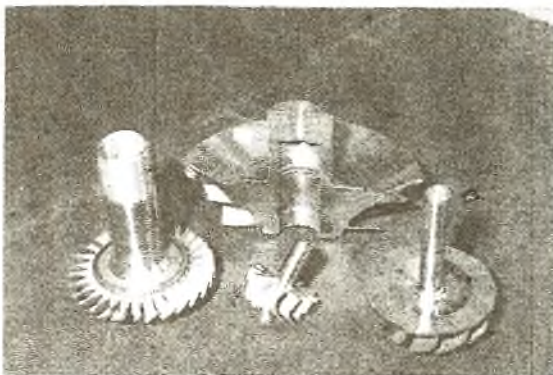
Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований показывает, что никелевые “барьерные” прослойки в сочетаниях жаропрочных никелевых сплавов со сталями толщиной 0,05 – 1,0 мм вполне работоспособны и могут быть рекомендованы для сварки натуральных узлов. На рис. 4.1 представлена микроструктура и микротвердость в переходной зоне сплава ВЖЛ12У и стали ЭИ961. Свойства переходной зоны изменяются по ее ширине достаточно плавно, что указывает на отсутствие нежелательных химических соединений и других дефектов.

Проведенные исследования позволяют оптимизировать характеристики используемых прослоек и параметры режимов диффузионного соединения ( $T_{\text{св}}$ ,  $P_{\text{св}}$ ,  $\tau_{\text{св}}$ ) исследуемых сочетаний разнородных материалов. Результаты оптимизации основных параметров диффузионной сварки вполне обоснованно можно использовать для разработки промышленных технологий.

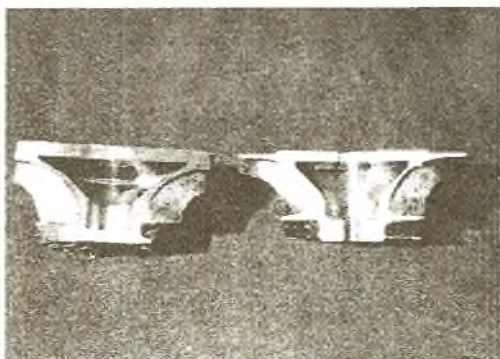


## 5. ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Роторы турбин ГТД и турбоагрегатов представляют собой рабочее колесо из жаропрочного сплава с лопатками по всему периметру, приваренное к цельному или полному стальному валу (рис.5.1).



а



б

Рис. 5.1. Роторы малоразмерных турбин ГТД и турбоагрегатов:  
а – биметаллические роторы, б – полос рабочее колесо ротора

Сочетание материалов, форма и размеры сварного стыка оказывают существенное влияние как на формирование соединения при диффузионной сварке, так и на работоспособность натурального узла в условиях эксплуатации.

Например, по данным одного из разработчиков роторов турбин, этими условиями являются:

- среда-воздух с продуктами сгорания топлива;
- температура - до 773 К;
- число оборотов - от 36000 до 65000 об/мин;
- усилия, действующие на сварное соединение:

$$\sigma_{изг} = 20 \text{ МПа}, \tau_{кр} = 340 \text{ МПа};$$

- количество термоциклов - от 50 до 3000 цикл.

Для роторов турбин допускается динамическая неуравновешенность  $5000 \frac{\text{Н}}{\text{М}} \left( 5 \frac{\text{кг}}{\text{см}} \right)$ .

В некоторых случаях рабочее колесо ротора турбины целесообразно изготавливать полым (рис.5.1, б), что улучшает его эксплуатационные характеристики (снижает массу, момент инерции и т.п.).

Технологии сварки роторов турбин рассчитаны на применение серийных установок для диффузионной сварки в вакууме (АЗ06.08, УДС-2, МДВ-301У и др.), укомплектованных генераторами токов высокой частоты ЛЗ-67В (мощность 60 кВт, частота 70 кГц), ИО-60 (мощность 25 кВт, частота 440 кГц) и др. Для осуществления диффузионной сварки роторов турбин используется сборочная оснастка и нагреватели - индукторы ТВЧ.

Разнообразие существующих роторов турбин обуславливает конструктивные отличия спроектированной для них сварочной оснастки. Однако вне зависимости от конструктивного исполнения она решает один и тот же круг задач:

1. Сборку деталей узла с требуемой точностью.
2. Установку и фиксацию их в вакуумных камерах сварочных установок.
3. Обеспечение равномерного распределения сварочного усилия по площади свариваемого контакта.
4. Обеспечение требуемого температурного поля в свариваемом стыке.

В качестве примеров приведены варианты спроектированной сборочной оснастки для двух роторов турбин различной конструкции: с валом сплошного сечения (рис.5.2, а) и с полым валом (рис.5.2, б).

Рабочее колесо турбины 4 (рис.5.2, а) монтируется в вакуумной камере на штоке силового привода 8 с помощью установочных деталей сборочного приспособления - опорной втулки 5 и центрирующего стакана 6, обеспечивающих его соосность со штоком 8 и индуктором 3, а также размещение свариваемого стыка в рабочей зоне индуктора 3. Вал ротора 1 устанавливается на свариваемый торец колеса ротора 4 через никелевую прокладку 2; центровка его относительно свариваемого торца колеса 4 контролируется визуально. Равномерная передача усилия сжатия на свариваемый контакт достигается за счет надетаго на вал ротора 1 сферического наконечника 10. Положение свариваемого стыка относительно индуктора регулируется путем изменения толщины пакета сменных прокладок 7.

Для сборки деталей ротора с полым валом применяются технологическая центрирующая втулка 11 (рис.5.2, б). Она вставляется по посадке с зазором в отверстие вала 1 и колеса 4. Благодаря выполненной на ее боковой поверхности проточке при сварке обеспечивается свободное пластическое формоизменение внутренней приконтактной зоны соединения.

Несколько отличное конструктивное решение сборочной оснастки использовано для сварки полых рабочих колес роторов турбин из титановых сплавов ВТ-20 и ВТ-6 (рис.5.3). Рабочее колесо 4 центрируется относительно индуктора 2 и закрепляется на верхнем упоре 9 вакуумной камеры. Крышка рабочего колеса 12 устанавливается на центрирующий стакан 6 штока силового привода 8.

Сборочная оснастка изготавливается из нержавеющей стали Х18Н10Т, сохраняющей в условиях сварки высокие механические показатели и не склонной к газовыделению при нагреве в вакууме. Для предотвращения схватывания свариваемых деталей с деталями сборочной оснастки в контакты между ними помещаются прокладки из пластинок слюды.

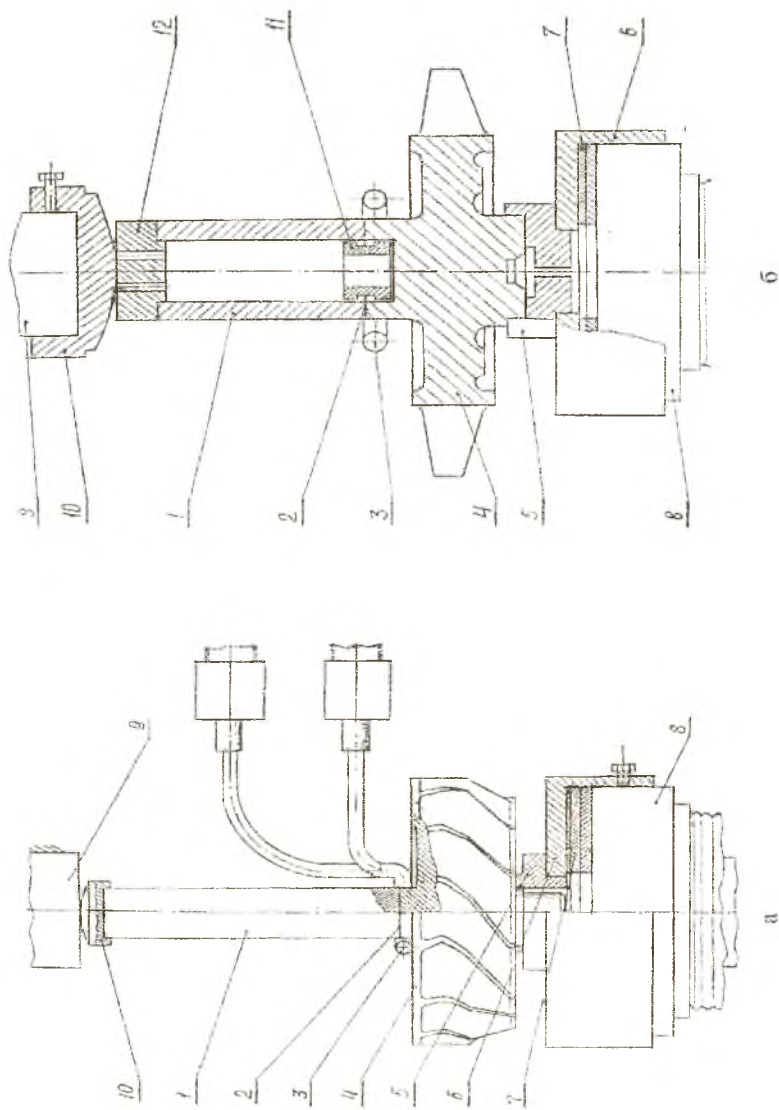


Рис. 5.2. Оснастка для диффузионной сварки рабочих колес роторов турбин с валами сплошного сечения (а) и полого исполнения (б)

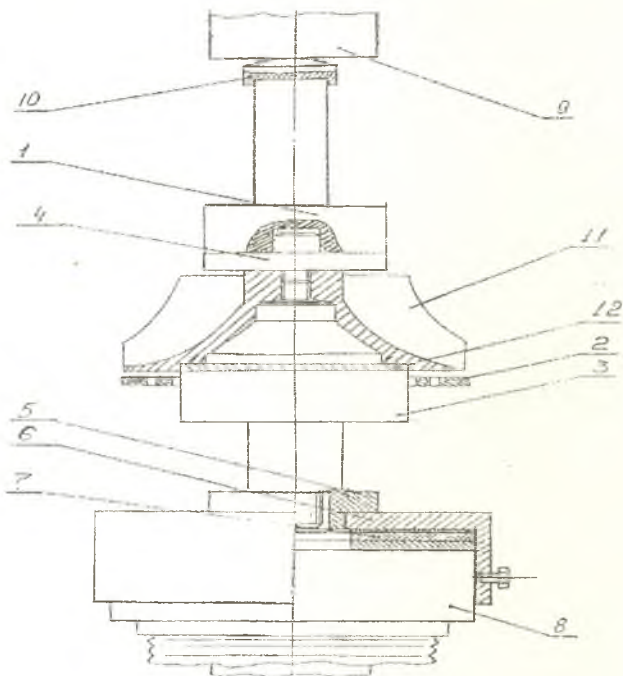


Рис. 5.3. Оснастка для диффузионной сварки полых рабочих колес роторов турбин

Для сварки узлов применяется серия индукторов различной конструкции - цилиндрического, плоского и смешанного типов с одним, двумя и большим количеством витков. Индукторы изготовлены из медных трубок диаметром 6...12 мм, в процессе работы они охлаждаются проточной водой.

Свариваемые поверхности рабочих колес турбин и валов обрабатываются чистовым шлифованием. К поступающим на сварку после механической обработки деталям узлов предъявляется ряд технических требований по форме и расположению их свариваемых и базовых поверхностей, чистоте обработки свариваемых поверхностей (см., например, рис. 5.4).

Непосредственно перед проведением сварки соединяемые поверхности деталей, применяемые прокладки (прослойки) и технологические центрирующие втулки (используемые при сварке

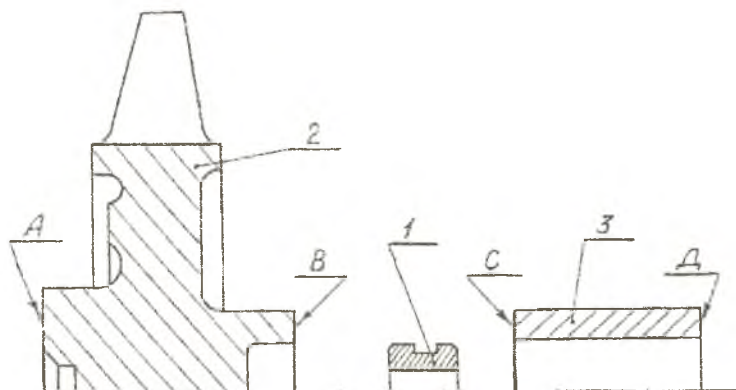


Рис. 5.4. Технические требования к механической обработке свариваемых поверхностей деталей турбин (1 – технологическая центрирующая втулка; 2 – рабочее колесо турбины; 3 – вал турбины):

1. Неперпендикулярность поверхностей А, В, С, Д к оси симметрии деталей не более 0,02 мм.
2. Отклонение от плоскостности поверхностей В, С не более 5 мкм.
3. На поверхностях В, С не допускаются риски, забоины, завал (притупление) кромок, прижоги.
4. Шероховатость поверхностей В, С не более  $Ra = 0,63$

рабочих колес с валами полого исполнения) тщательно промываются в растворителях с целью удаления с них различного рода загрязнений (пыли, жировых пленок и др.). Предварительная промывка деталей и прокладок осуществляется в бензине марок Б-70 или БР-1 в течение не менее 10...15 минут, окончательная - в ацетоне. Затем свариваемые детали высушиваются до полного удаления с них следов растворителя.

Технологический цикл сварки роторов турбин состоит из следующих последовательно выполняемых операций: сборки и установки свариваемых деталей узла в вакуумной камере, вакуумирования, нагрева соединения до заданной температуры и изотермической выдержки, сварки и охлаждения узла до температуры, исключающей окисления его на воздухе.

Детали роторов турбин - рабочие колеса из жаропрочных сплавов и валы из сталей свариваются через прокладки, вырезанные по форме и размерам свариваемых контактов из фольги никеля.



Для сварки роторов турбин применяются индукторы, обеспечивающие возможность достижения заданной температуры нагрева соединяемых стыков с достаточно высокими скоростями при минимальной эффективной ширине нагреваемой зоны. При наладке сборочных приспособлений соединяемые ступицы колес турбин смещаются в сторону индукторов на 1...2 мм. Применяемый индуктор в выбранном положении относительно свариваемого стыка не должен допускать локального перегрева колеса турбины.

В процессе сварки контролируются температуры нагрева как колес турбин, так и валов. Спаи термопар закрепляются на боковых поверхностях ступиц колес турбин на расстоянии 1.5...2 мм от свариваемых стыков. К стальным валам термопары крепятся механически, к ступицам колес привариваются.

Нагрев до сварочных температур узлов с валами полого исполнения производится со скоростью 60...80 К в минуту, а узлов с валами сплошного сечения - 50...60 К в минуту. По достижении заданной температуры выполняется изотермическая выдержка с целью выравнивания температуры по сечению соединения.

Сварка узлов проводится на режимах, оптимальных для каждого отдельного сочетания материалов. Например, режимы сварки роторов турбин из ВЖЛ12У + ЭИ961 и ЖС6К + 45Х приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

*Режимы диффузионной сварки роторов компрессоров турбин из жаропрочных сплавов и сталей*

Наименование параметра режима сварки	Свариваемое сочетание материалов	
	ВЖЛ12У+ст.ЭИ961	ЖС6К + ст.45Х
Глубина вакуума, Па	$10^{-2} \dots 10^{-3}$	$10^{-2} \dots 10^{-3}$
Температура сварки, К:		
- вал	$1373 \pm 10$ (ЭИ961)	$1383 \pm 10$ (45Х)
- рабочее колесо	$1403 \pm 10$ (ВЖЛ12У)	$1403 \pm 10$ (ЖС6К)
Время изотермической выдержки, мин	3...5	4...5
Время сварки, мин	17...20	18...22
Сварочное давление, МПа	10...15	9...12.5



В процессе сварки регистрируется величина осадки (продольной деформации) сварных соединений. Поскольку кинетика процесса осадки соединений функционально зависит от параметров режима сварки, контролирование ее позволяет судить о соответствии протекающего сварочного процесса заданному режимом сварки.

Качество сварных соединений роторов турбин обеспечивается строгим соблюдением разработанной технологии, проведением пооперационного контроля на всех стадиях изготовления узлов - от получения исходных материалов до окончательных приемосдаточных испытаний.

Для оценки качества сварных соединений роторов турбин применяются следующие методы:

- а) внешнего осмотра и измерений;
- б) нагружения узла контрольным растягивающим усилием;
- в) неразрушающего контроля (люминесцентный);
- г) разрушающего контроля (выборочные механические испытания узлов до их разрушения, испытания образцов технологических проб).

При внешнем осмотре узлов выявляются их наружные дефекты. Возможные наружные дефекты сварных роторов турбин - подплавления и трещины. К числу косвенных свидетельств удовлетворительного качества сварных соединений роторов турбин относятся:

- а) достаточно широкая зона поверхности, прошедшей термовакуумную очистку;
- б) некоторая остаточная деформация приконтактного участка стального вала.

На ступицах рабочих колес протяженность указанной зоны должна быть не менее 5...7 мм, на валах - не менее 10...15 мм. Величины относительной радиальной макропластической деформации сварных узлов должны составлять:

- \* для валов диаметром до 30 мм - 5...10%,
- \* для валов диаметром до 35...60 мм - 3...6%.

Каждый сварной узел подвергается механическому испытанию - нагружению контрольным растягивающим усилием (180...220 МПа, в зависимости от типоразмера), составляющим часть полной расчетной эксплуатационной нагрузки. Такого рода испытания

применяются в практике изготовления сварных изделий в том случае, когда затруднен неразрушающий контроль сварной зоны.

Люминесцентный контроль сварных узлов осуществляется до и после их механической обработки.

Металлографические исследования сварных узлов свидетельствуют об отсутствии в приконтактных зонах соединений таких дефектов, как непровары, микронесплошности, трещины.

Создание высоконадежного изделия, обеспечение его безотказной работы неразрывно связано с постоянным и разносторонним контролем качества выполненных работ и технического состояния элементов, узлов или изделия в целом.

Большой практический интерес представляет технология изготовления роторов компрессоров из титановых сплавов и сталей.

Биметаллический ротор турбокомпрессора состоит из рабочего колеса, изготовленного из титанового сплава ВТЗ-1, и втулки лабиринтного уплотнения из стали ВНС-2, соединяемых между собой диффузионной сваркой в вакууме.

Технологии диффузионной сварки биметаллических роторов компрессоров включают в себя два варианта: с применением двухслойной и трехслойной прокладок (барьерных прослоек). Состав прокладок: ванадий ( $\delta = 50$  мкм) и медь ( $\delta = 25$  мкм); ванадий ( $\delta = 50$  мкм), медь ( $\delta = 25$  мкм) и никель ( $\delta = 50$  мкм) соответственно. Прокладки из ванадия помещаются со стороны поверхности из титанового сплава.

Непосредственно перед осуществлением сварки соединяемые поверхности деталей этих узлов, применяемые прокладки и технологические центрирующие втулки (используемые для сборки узлов) тщательно промываются в бензине и ацетоне. После этого свариваемые поверхности подвергаются дополнительной химической обработке. Соединяемые поверхности деталей из титанового сплава ВТЗ-1 протравливаются во фтористой кислоте комнатной температуры (293 К) в течение 20 секунд, свариваемые поверхности деталей из стали ВНС-2 - в смеси соляной и азотной кислот, нагретой до 333 К в течение 30 секунд, прокладки из ванадия и меди - в 50% азотной кислоте (293 К) в течение 10 секунд. После травления поверхности промываются проточной водой и высушиваются.

Последовательность этапов разработанного технологического цикла диффузионной сварки биметаллических роторов компрессоров такая же, как и в технологии сварки биметаллических роторов турбин из жаропрочных сплавов и сталей.

Сварка узлов осуществляется с помощью разработанной технологической оснастки (рис.5.5), принципиально не отличающейся от описанной выше сборочно-сварочной оснастки для роторов турбин. Нагрев узлов до сварочных температур производится со скоростью 40...60 К в минуту. В процессе сварки контролируется величина осадки соединений. Режимы сварки имеют следующие значения: глубина вакуума  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  Па, температура сварки  $1223 \pm 5$  К, время изотермической выдержки без приложения давления сжатия 10-15 минут, сварочное давление 10-15 МПа и время сварки 30 минут.

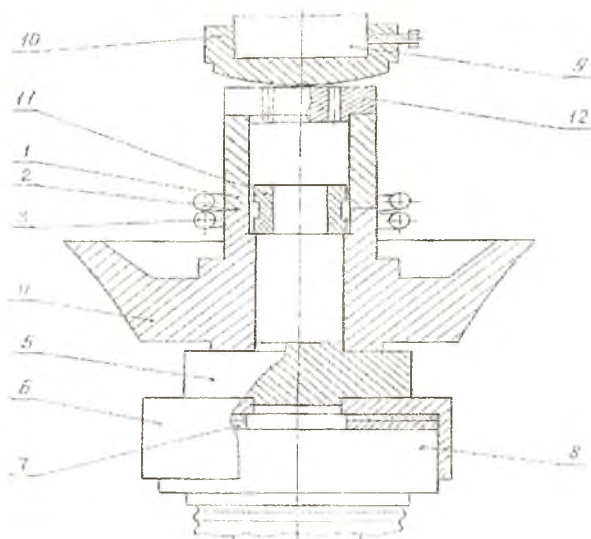


Рис. 5.5. Оснастка для диффузионной сварки деталей биметаллических роторов компрессоров: 1 – втулка лабиринтного уплотнения, 2 – сварной стык, 3 – индуктор, 4 – рабочее колесо, 5 – подставка, 6 – центрирующий стакан, 7 – регулировочные прокладки, 8 – шток силового привода, 9 – упор вакуумной камеры, 10 – сферическая пята, 11 – технологическая центрирующая втулка, 12 – сухарь

В основе программы контроля качества сварных соединений роторов компрессоров лежат метод внешнего осмотра и измерений, люминесцентный и металлографический методы; кроме того, применяется метод испытания сварного узла контрольным растягивающим усилием и метод механического испытания (на статическое растяжение).

На первом этапе, этапе визуального контроля, выявляются наружные дефекты сварных узлов (трещины, подплавления). Измеряется величина относительной радиальной макропластической деформации сварных стыков ( $\varepsilon_R$ ). Значение  $\varepsilon_R$  для узлов кондиционного качества составляет 5...6%.

Сварные роторы компрессоров подвергаются испытанию на растяжение усилием, составляющим 50% от полной расчетной эксплуатационной нагрузки.

Сварные роторы компрессоров проходят люминесцентный контроль дважды - после предварительной и после окончательной мех-обработки.

Натурные роторы турбокомпрессора эксплуатируются в составе малогабаритных авиационных ГТД. Как показал опыт эксплуатации, сварные роторы полностью отвечают предъявляемым к ним техническим требованиям.

Метод диффузионной сварки в вакууме позволил существенно улучшить технологию изготовления роторов малоразмерных турбоэнергоагрегатов (рис.5.6). Ротор турбоэнергоагрегата представляет собой цилиндр из "магнитной" стали 30ХГСА мартенситно-ферритного класса, разделенный под углом  $48^\circ$  к оси проставкой из немагнитной стали аустенитного класса ДИ-8.

Изготовление ротора осуществлялось методом электронно-лучевой сварки сегментов из сталей 30ХГСА и ДИ-8 в диски, которые соединялись посредством ободных швов в единый пакет (рис 5.7,а). Применяемый способ имел целый ряд недостатков: низкая технологическая и конструкционная прочность сварных швов, отличие геометрии немагнитной проставки от оптимальной, большое количество сварных швов и, как следствие, увеличение брака и уменьшение производительности процесса.

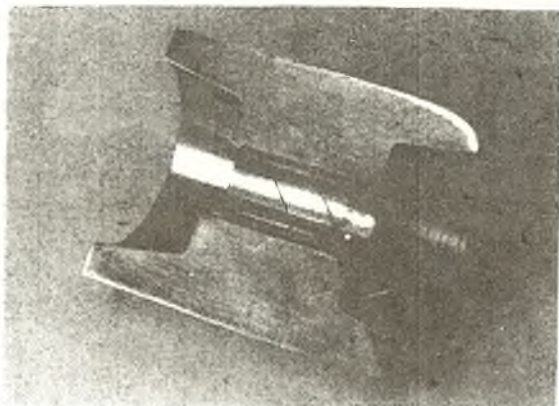


Рис. 5.6. Ротор малоразмерного турбоагрегата

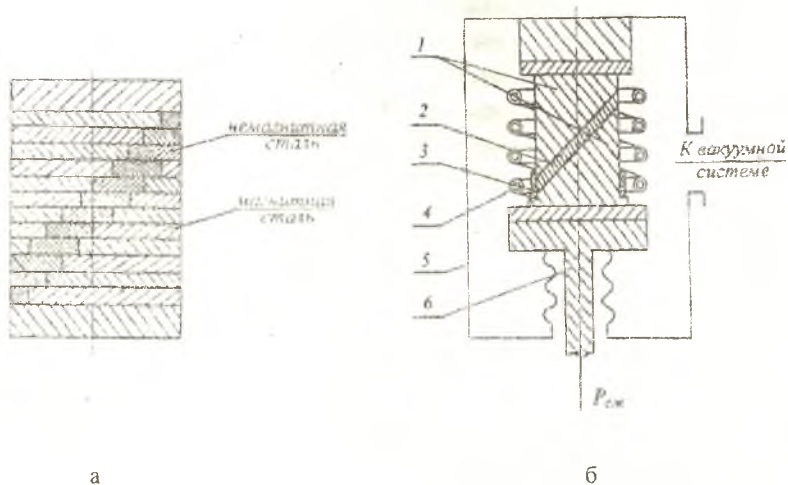


Рис. 5.7. Эскиз биметаллического ротора, изготовленного электронно-лучевой сваркой (а), и схема диффузионной сварки ротора (б): 1 – детали из магнитной стали, 2 – детали из немагнитной стали, 3 – технологическое кольцо, 4 – индуктор, 5 – вакуумная камера, 6 – шток гидроцилиндра

Для изготовления биметаллического ротора целесообразно применить способ диффузионной сварки в вакууме. Причем приложение на начальной стадии сварки сдвигающих усилий позволяет снизить температуру сварки без изменения конструкционной прочности сварных узлов. При этом снижается влияние нагрева на структуру. Прочность сварных соединений находится на уровне прочности стали ДИ-8. Диффузионная сварка роторов осуществлялась на серийной установке А306.08 с индукционным нагревом (рис. 5.7, б). Оптимальные режимы сварки: глубина вакуума  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  Па, температура сварки 1123 К, время изотермической выдержки без приложения давления сжатия 10-15 минут, сварочное давление 25 - 30 МПа, осадка узла по высоте 3-4 мм и время сварки 20 минут. Свариваемые поверхности деталей шлифуются до  $R_a = 0,63$  и менее. Перед сваркой тщательно промываются в бензине и ацетоне.

Испытания роторов и опыт эксплуатации в составе двигателей в условиях действующих градиентов температур и нагрузок указывают на хорошую работоспособность полученных сварных соединений.

Таким образом, технология диффузионной сварки со сдвигом позволяет получить высокопрочные, надежные сварные соединения роторов турбоэнергоагрегатов, выгодно отличающиеся от соединений, полученных электронно-лучевой сваркой.

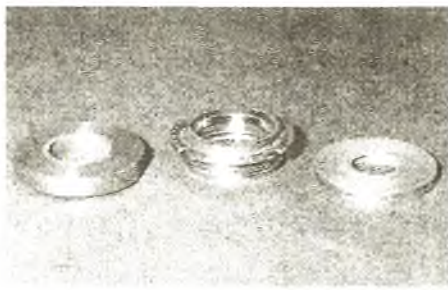
Модули уплотнения валов авиационных двигателей (рис. 5.8, а) состоят из двух элементов. Первый элемент – графитотитаностальная обойма, и второй элемент – составное кольцо из стали 40ХН2МА с системой каналов охлаждения с жестко регламентированными размерами проходного сечения (рис. 5.8, б).

Биметаллический элемент (титаностальной) модуля уплотнения изготавливается из двух деталей – заготовок в виде шайб толщиной 8 мм из титанового сплава ОТ4-1 и 4 мм из стали 12Х18Н10Т. Наружный диаметр обеих шайб равен 70 мм, внутренний 38 мм.

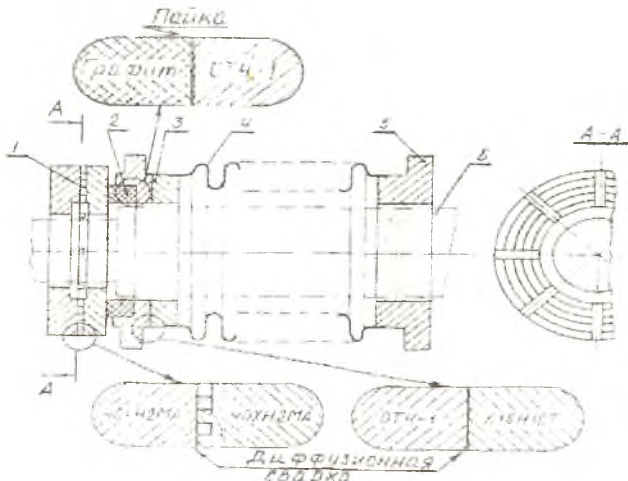
Составное кольцо изготавливается из двух шайб из стали 40ХН2МА с внешним диаметром 60 мм и внутренним 38 мм. На одной из шайб фрезерованием нанесены каналы охлаждения шириной 3 мм и высотой  $0,4 \pm 0,05$  мм.

Модуль уплотнения работает в среде агрессивных нагретых до 423 К газов в условиях перепада температур от 293 К до эксплуа-





а



б

Рис. 5.8. Общий вид (а) и схема модуля уплотнения вала (б):

- 1 - составное кольцо, 2 - графитовое кольцо, 3 - обойма,  
4 - сильфон, 5 - фланец, 6 - вал

тационной (количество циклов – до 500). Основные требования к соединению деталей элемента модуля уплотнения:

- прочность соединения при температуре 423К должна быть не менее 60 % от прочности основных материалов;
- соединение должно быть герметичным по всей площади контактирования.



Подготовка свариваемых деталей и прослоек титаностального элемента выполняется по методике, аналогичной для сочетания титановый сплав ВТЗ-1 и сталь ВНС-2 .

В разработанной технологии диффузионной сварки элемента модуля уплотнения использовался вариант с двухслойной прослойкой: первая прослойка – ванадиевая фольга толщиной 50 мкм, вторая – медная фольга толщиной 25 мкм.

Подготовка свариваемых деталей из стали 40ХН2МА выполнялась по методике, аналогичной подготовке сталей ЭИ961, 40Х, 45Х, 30ХГСА и ДИ-8.

Графитовое кольцо 2 (рис. 5.8, б) и титаностальная обойма 3 перед пайкой тщательно промываются в бензине и ацетоне. Для пайки графитотитаностальной обоймы используется припой ВПР-16.

Диффузионная сварка элементов модуля уплотнения осуществляется с помощью разработанной технологической оснастки (рис. 5.9), принципиально не отличающейся от описанной выше сборочно-сварочной оснастки для роторов турбин (рис. 5.2).

При оценке качества сварных соединений элементов модуля уплотнений используется ряд методов: внешний осмотр и измерения основных геометрических размеров, особенно размеров сечения каналов охлаждения составного кольца; люминисцентный и металлографические методы. В процессе исследований использовался и ультразвуковой метод контроля.

Для оценки качества сварных соединений осуществляется выборочный контроль по 3 узла из партии. Исследуется структура переходной зоны и проводятся разрушающие испытания образцов, вырезанных из натуральных узлов, для определения механических свойств сварных швов.

Режимы диффузионной сварки и пайки приведены в табл. 5.2

Опыт эксплуатации модулей уплотнений показывает их высокую работоспособность, а сварные соединения отвечают техническим требованиям разработчика.

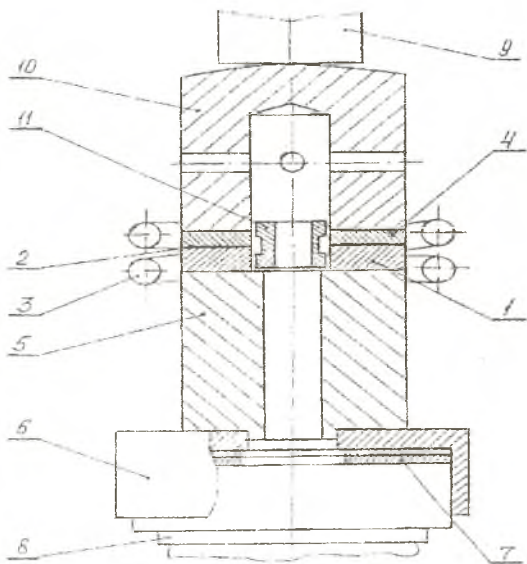


Рис. 5.9. Оснастка для диффузионной сварки деталей биметаллического элемента модуля уплотнения: 1 – свариваемая деталь из титана, 2 – пакет прокладок (прослоек), 3 – индуктор, 4 – свариваемая деталь из стали, 5 – опорная втулка, 6 – центрирующий стакан, 7 – регулировочные прокладки, 8 – шток силового привода, 9 – упор вакуумной камеры, 10 – сферический колпак, 11 – технологическая центрирующая втулка

Таблица 5.2

Режимы диффузионной сварки и пайки элементов модуля уплотнения

№ п/п	Параметр режима сварки (пайки)	Свариваемое сочетание материалов		
		ОТ4-1 - ВНС-2	40ХН2МА-40ХН2МА	графит - ОТ4-1
1	Глубина вакуума, Па	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-3}$
2	Температура, К	1218 – 1228	1253 – 1273	1273 – 1293
3	Время выдержки без сварочного давления, мин	8 – 10	8 – 10	–
4	Давление, МПа	7,5 – 10	8 – 10	4 – 5
5	Время, мин	30	18 – 20	10 – 15

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред. Н.Ф.Казакова. - М.: Машиностроение, 1981. - 271с.
2. Строение и свойства авиационных материалов: Учебник для вузов / А.Ф.Белов, Г.П.Бенедиктова, А.С.Висков и др. Под ред. акад. Белова А.Ф., д-ра техн. наук, проф. Никоненко В.В. - М.: Металлургия, 1989. - 368с.
3. Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД / Под ред. С.И. Яцыка. М.: Машиностроение, 1995.- 256 с.
4. Барвинок В.А., Бордаков П.А., Любимов В.И., Самородов Д.В. Опыт применения диффузионных соединений разнородных материалов для основных элементов летательных аппаратов, работающих в экстремальных условиях // Тез. докл. III Китайско-Российско-Украинского симпозиума по аэрокосмической технике и технологиям, 16-20 сентября 1994 г. Китай, г. Сиань.
5. Большаков М.В. Современное состояние и перспективы применения сварки давлением при производстве изделий из тугоплавких металлов / 100-летие изобретения сварки по методу Н.Г. Славянова и современные проблемы развития сварочного производства: Сб. науч. трудов Всесоюзной научно-технической конференции, часть I. 1989. г. Пермь. - 162 с.
6. Барвинок В.А., Бордаков П.А., Демичев С.Ф. Закономерности статического трения в условиях формирования сварных соединений из разнородных материалов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1994. № 3-4. - С. 46-49.
7. Материалы и технологии в аэрокосмической промышленности / Materials and manufacturing in aerospace / clementson DrA / Adv. Mater. Mtechnol. Jut. 1990 г. – London, 1989 - С.115-120.
8. Применение диффузионных соединений в промышленности Японии. Сообщение 2. Applications of diffusion joning in industries in Japan. 2<sup>nd</sup> rept / Techn. Comm. Diffus. Join and Braz. Jap. Weld SOc. – S.l., 1990. - 53с.
9. Браун А.Г., Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка за рубежом // Автоматическая сварка. – 1984. № 11. – С. 50-54.

10. Фетисов Г.П. Сварка и пайка в авиационной промышленности: Учеб. пособие для авиационных вузов. - М.: Машиностроение, 1983. - 216с.

11. Гельман А.А. Диффузионная сварка титана (Обзор зарубежной литературы за 1981-1986 гг.) // Сварочное производство. 1987. № 12. С. 39-41.

12. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки" / С.А.Вьюнов, Ю.И.Гусев, А.В.Карпов и др.; Под общ. ред. Д.В.Хроница. - М.: Машиностроение, 1989. - 368 с.

13. Диффузионная сварка титановых лопаток авиадвигателей / Г.К.Харченко, В.П.Гуриенко, Ю.Н.Коваленко, А.Н.Аржакин, В.П.Каменев // Всес. конф. по сварке цветных металлов, Мариуполь, 4-7 сентября, 1990 г.: Тез. докл. - Киев, 1990. - 23с..

14. Рабкин Д.М., Рябов В.Р., Гуревич С.М. Сварка разнородных металлов. - Киев: Техника, 1975.- 208с.

15. Демичев С.Ф., Гришин И.С., Самородов Д.В., Любимов В.И. Выбор промежуточных прослоек при диффузионной сварке титановых сплавов со сталями // Прогрессивные процессы сварки и нанесения покрытий в производстве летательных аппаратов: Сб. науч. работ. - Куйбышев: КуАИ, 1987. С. 95-100.

16. Биметаллические соединения / К.Е. Чарухина, С.А. Голованенко, В.А. Мастеров, Н.Ф. Казаков. - М.: Металлургия, 1970. - 280 с.

17. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. - 2-е изд., доп. и перераб. - Киев: Наук. Думка, 1986. - 240 с.

18. Бакши О.А., Шрон Р.З. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой // Сварочное производство. 1971. № 3.

19. Машкова Н.А., Щепетина Г.А., Лазарев С.Д. Применение никелевой прокладки при диффузионной сварке жаропрочного сплава АНВ-300 с конструкционной сталью 40Х // Автоматическая сварка. 1985. № 6. - С. 55-57.

20. Бордаков П. А., Самородов Д. В., Гришин И. С., Прохоров А. А. Выбор режимов сварки вала из стали ЭИ961 с ротором газотурбинного двигателя из сплава ВЖЛ12У // Автоматическая сварка. 1979. № 7. - С. 54-56.

21. Бордаков П. А., Самородов Д. В., Гришин И. С., Прохоров А. А. Физико-механические свойства соединения жаропрочного сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 // Автоматическая сварка. 1979. № 11. - С. 46-49.

22. Бордаков П.А. Исследование схватывания металлов при статическом трении в вакууме // В кн.: Механика и физика контактного взаимодействия. – Калинин: КГУ, 1982. - С. 66-67.

23. Метелкин Н.В., Павлова М.А., Поздеева Н.В. Сварка керамики с металлами. - М.: Металлургия, 1977 - 160с.

24. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1962. Т.4. -982 с.

25. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. - М.: Наука, 1969. - 420 с.

26. Бакши О.А., Шрон Р.З. Прочность при статическом растяжении сварного соединения с мягкой прослойкой // Сварочное производство . 1962. № 5.