

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Тольяттинский государственный университет

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные
процессы»

(наименование кафедры)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических
материалов»

(наименование (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Влияние остаточных напряжений на сварные соединения из
разнородных материалов, выполненные диффузионной сваркой в вакууме

Студент	<u>С.А. Серегин</u>	_____
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>О.В. Шашкин</u>	_____
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Консультанты	<u>Т.А. Варенцова</u>	_____
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)

Руководитель магистерской
программы д.т.н., профессор, А.И. Ковтунов _____

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., доцент, В.В. Ельцов _____

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Состояние и перспективы применения диффузионной сварки в двигателестроении	8
2 Проблемы обеспечения заданных свойств диффузионных соединений.....	15
3 Деформации и напряжения, возникающие во время сварки и их влияние на сварные соединения	19
3.1 Природа и классификация остаточных напряжений	21
3.2 Влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства деталей и изделий в целом.....	36
3.3 Методы оценки работоспособности элементов конструкции ГТД с позиции механики остаточных напряжений	37
4 Общие выводы и формулировка задач	41
5 Основные закономерности и особенности деформирования деталей из разнородных материалов при диффузионной сварке.....	44
6 Выбор и оптимизация барьерных прослоек при диффузионной сварке элементов конструкции ГТД из разнородных материалов.....	48
7 Разработка математической модели для теоретической оценки взаимной диффузии в разнородных соединениях с прослойкой	56
8 Разработка технологии диффузионного соединения через расплавляющиеся прослойки элементов конструкции ГТД	74
8.1 Применяемое оборудование и приборы	75
8.2 Технологическая оснастка для сварки узлов.....	78
8.3 Подготовка соединяемых поверхностей деталей узлов к сварке.....	81
8.4 Сварка роторов турбин из жаропрочных сплавов и сталей.....	82
8.5 Контроль качества сварного соединения.....	85
9 Общие выводы по результатам работы	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	90
--------------------------------------	----

ВВЕДЕНИЕ

Современные турбоагрегаты, установки и газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в различных отраслях машиностроения Российской Федерации, таких как судостроение, нефтяное, нефтехимическое, взрывопожароопасное и газовое оборудование, аэрокосмической, авиационной, автомобильной и других (например, рисунок 1 [47]).

Повышение эксплуатационных характеристик и экономической эффективности современных ГТД, установок и турбоагрегатов является одной из важнейших проблем в двигателестроении. В настоящее время в работе ГТД применяется топливо, которое сгорает при более высоких температурах, нежели его предшественники, что приводит к повышению мощности и коэффициента полезного действия, ресурса работы и экологичности двигателей. Поэтому металлургической промышленности стало необходимо начать разработки над созданием новых материалов со специальными свойствами, например, новых конструкционных сталей и сплавов на различной основе, твердых сплавов, композиционных сплавов, а также металлокерамик и других современных материалов. Возможность реализации специальных свойств металлов и сплавов, к которым можно отнести электромагнитные, прочностные, химические, эрозионные, коррозионные и многие другие, предназначенные для использования в довольно экстремальных условиях эксплуатации, таких как максимальные и минимальные температуры с резкими температурными скачками, вакуум, целый ряд знакопеременных нагрузок и т.п., предполагает разработку новых комбинированных конструкций узлов и деталей с надежными и отвечающими эксплуатационным требованиям неразъемными соединениями, обладающими высокой прочностью [1].

В современном двигателестроении применению современных материалов со специальными свойствами, такими как – жаропрочность,

жаростойкость, коррозионная стойкость, а также высокими механическими свойствами, отведено особое внимание, и они занимают лидирующие позиции по сравнению с более «простыми» металлами. Среди таких материалов можно особо выделить современные жаропрочные и жаростойкие никель-кобальтовые сплавы, а также сплавы, полученные на основе титана и алюминия, высокопрочные жаростойкие стали и сплавы, новейшие композиционные материалы и различные виды керамик.

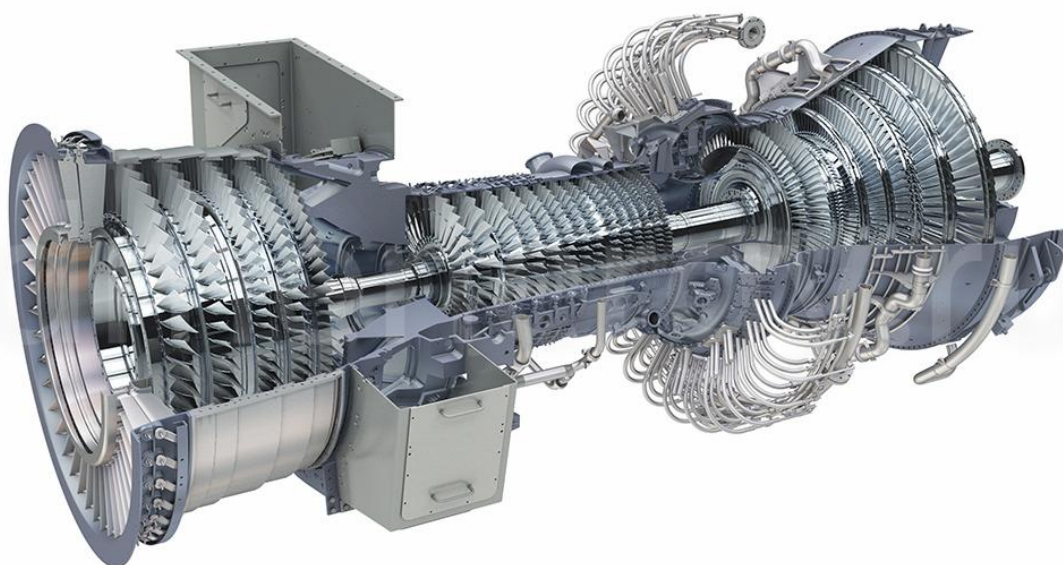


Рисунок 1 – Двухвальная газовая турбина GeneralElectricLM6000 на базе авиационного двигателя CF6-80C2

Вышеупомянутые материалы для обеспечения своих специальных свойств содержат очень сложный состав и строение. И чтобы в полной мере раскрыть все свойства и преимущества данных материалов при изготовлении узлов и агрегатов современных газотурбинных двигателей, необходимо увеличивать их процентное содержание, в элементах конструкции применяя как в однородном, так и разнородном сочетании. В связи с этим появляется возможность реализовать ряд достоинств каждого материала и решить

большой круг современных задач в области конструкторских и технологических разработок и инноваций [1, 50].

Но встает проблема в получении высокопрочных соединений из таких материалов, так как возникают определенные трудности, а именно, например, при сварке плавлением таких материалов возникают как горячие, так и холодные трещины, связанные с необратимыми структурными изменениями и фазовыми превращениями в металле, а также происходит выгорание основных легирующих элементов, что плохо сказывается на физико-механических свойствах сварного соединения. В связи с этим следует обратить внимание на такой способ сварки давлением, как диффузионная сварка в вакууме, которая является перспективной, а иногда и единственной при соединении элементов узлов конструкций газотурбинных двигателей и турбоагрегатов.

В настоящее время показана принципиальная возможность использования для соединения таких материалов способов диффузионной сварки. Однако, несмотря на достаточно широкое их распространение общих подходов по выбору той или иной технологии, оптимизации основных факторов процесса для конкретных составных конструкций нет.

Так как во многих случаях при соединении материалов со специальными свойствами необходимо ограничение теплового воздействия, что требует разработки способов сварки с большой локальностью нагрева и с оптимальными значениями температуры с точки зрения их минимизации. При этом, многие способы сварки давлением неэффективны, так как необходимы большие объемные деформации. В то время как рассматриваемые материалы, как правило обладают малой пластичностью [1, 50]. Использование диффузионной сварки в вакууме через «барьерные» и «мягкие» прослойки позволяет решать указанные выше технические трудности. Этот способ позволяет достаточно хорошо регулировать процессы деформирования и массопереноса в зоне сварного соединения.

Для многих элементов конструкций ГТД и турбоагрегатов предъявляются очень жесткие требования по их форме и размерам, что возможно обеспечить только при минимальных деформациях в зоне соединения. При этом перспективными технологиями являются диффузионная сварка через расплавляющиеся прослойки, при которой в контакте материалов протекают процессы образования химических связей на свариваемых поверхностях диффузионные процессы возникновения и роста химических соединений (интерметаллидов, карбидов, боридов и т.п.) в переходной зоне как однородных, так и при разнородных сочетаниях материалов.

Перечисленные преимущества способов диффузионного соединения материалов со специальными свойствами создают предпосылки их успешного применения для получения работоспособных, прецизионных элементов конструкций ГТД и турбоагрегатов. В данной работе предпринята попытка провести исследования по разработке научных основ для повышения эффективности, существующих технологий диффузионного соединения для различных сочетаний современных и перспективных материалов применительно к элементам конструкций газотурбинных двигателей и агрегатов.

1 Состояние и перспективы применения диффузионной сварки в двигателестроении

Развитие техники в современной машиностроительной отрасли тесно связано с достижениями, которые происходят 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, методы механического крепления, пайки, клепки и склеивания.

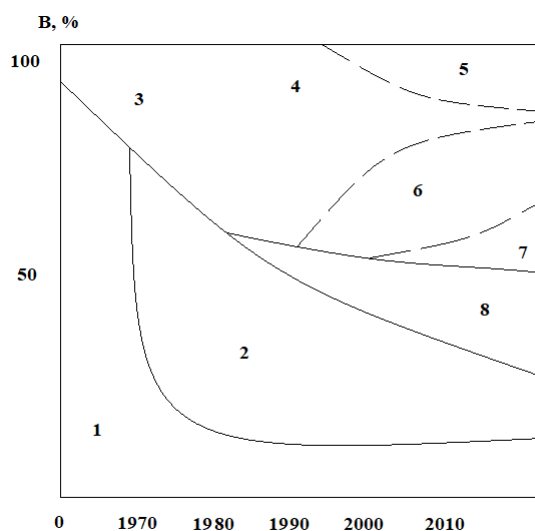
С помощью применения технологического процесса сварки можно добиться существенного снижения массы и габаритных размеров неразъемного соединения, достичь высокой прочности в широком интервале температур, а также герметичности сварных соединений и других положительных характеристик, что и определяет применение сварочных процессов в большом объеме в машиностроительной отрасли [1, 2, 3].

Сварные соединения нашли широкое применение во всех типах двигателей, в частности авиационные двигатели современного поколения работают в сложных условиях. Если рассмотреть детали авиационных газотурбинных двигателей то они подвергаются большим механическим нагрузкам, испытывают постоянную вибрацию; подвергаются воздействию высоких температур и газовой коррозии, испытывают малоцикловую усталость из-за постоянного повторения циклов работ при взлете и посадке и многие другие [1, 2, 3, 4, 50]. И в связи с со сложными условиями работы и для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик в конструкции газотурбинных двигателей обширно применяются жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы различных классов, в том числе и жаропрочные никелевые и титановые сплавы, тугоплавкие металлы, такие как хром,

молибден, вольфрам, ниобий, а также керамика и графит, и стали и сплавы со специальными свойствами [2, 4, 5, 50].

Разработка качественных, обладающих высокой надежностью и прочностью в интервале заданных эксплуатационных температур, соединений материалов, приведенных выше, как в однородных сочетаниях, так и в различных комбинациях между собой, относится к числу важных задач современного двигателестроения. Одной из наиболее актуальных на данный момент из этих задач является получение разнородных соединений из основных применяемых в газовых трактах газотурбинных двигателей и агрегатов, материалов (рисунок 2): жаропрочных никелевых, титановых сплавов и сталей [1, 47].

Использование традиционных способов сварки плавлением и давлением для соединения перечисленных жаропрочных материалов не обеспечивает получения требуемых результатов. Решить эти задачи удастся только лишь с помощью метода диффузионной сварки в вакууме [6, 7, 8].



1 - стали; 2 - титан; 3 - никель; 4 жаропрочные сплавы; 5 - керамика; 6 - порошковые сплавы; 7 - сплавы с направленной кристаллизацией; 8 - композиционные материалы.

Рисунок 2 – Материалы, применяемые в высокотемпературных трактах двигателей

Диффузионная сварка в вакууме находится в числе первых, среди способов сварки, которыми изготавливаются неразъемные соединения для высокотехнологичных отраслей промышленности и будет сохранять данные позиции ещё долгое время. С её помощью можно получать особо качественные соединения среди различных металлических и неметаллических материалов в одном сочетании, так и в самых разных комбинациях, например сталь и стекло, алюминий и медь, титан и сталь, и многие другие.

Однако к недостаткам диффузионной сварки в вакууме можно отнести довольно продолжительный цикл сварочного процесса, дорогостоящее и как следствие довольно высокотехнологичное оборудование. В связи с этим в самом начале данный способ сварки применялся лишь для сварки в случае, когда применение других способов было технически невозможно осуществить, либо для сварки деталей с очень плохой свариваемостью.

Современное развитие теории в области диффузионной сварки в вакууме, а также её практическое применение позволило достичь значительного сдвига, а именно были получены совершенно новые соединения, выполненные диффузионной сваркой разнообразных сочетаний металлических материалов, неметаллических материалов, таких как стекло, керамика, графит и др., а также их сочетания между собой и с металлическими материалами; стало возможным соединять жаропрочные и тугоплавкие материалы, пористые, порошковые и многие другие.

Диффузионная сварка в вакууме может применяться и при изготовлении современных композиционных материалов имеющих металлическую матрицу, а также для непосредственного их соединения между собой [6, 7, 9, 10].

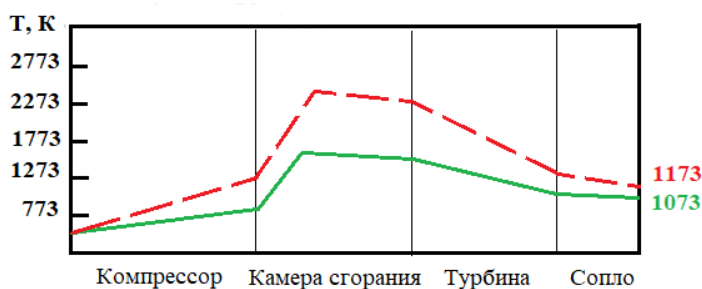
К перспективам диффузионной сварки в вакууме, касательно современного двигателестроения, можно отнести её применение в связи с применением современных конструкционных материалов, различных

жаропрочных сплавов и сталей, а также более передовых технологических процессов.

На основании мониторинга и прогнозов, в ближайшем будущем в конструкциях современных двигателей всё в большей мере будут применяться композиционные материалы с металлической матрицей [11, 12] и довольно широкое применение должны получить технологии изготовления деталей узлов и агрегатов при помощи порошкового метода [4].

Основной направленностью в актуальных вопросах двигателестроения будет применение двигателей, которые смогут работать в диапазоне более высоких температур и давлений. Здесь основным моментом станет повышение рабочей температуры газа газотурбинного двигателя находящегося перед турбиной, так как она является основным параметром, определяющим коэффициент полезного действия газотурбинного двигателя. Увеличение температуры газа перед турбиной позволит в несколько раз увеличить экономичную эффективность двигателей, а также даст возможность применения более дешевых видов топлива.

Увеличение температуры и давления газа перед турбиной в двигателях можно достичь путем приумножения доли жаропрочных сталей и сплавов в их конструкции. Причем по прогнозам, такое свойство материалов как – жаропрочность неукоснительно возрастает, о чем можно проследить по рисункам 3 и 4) [2, 4, 11, 12].

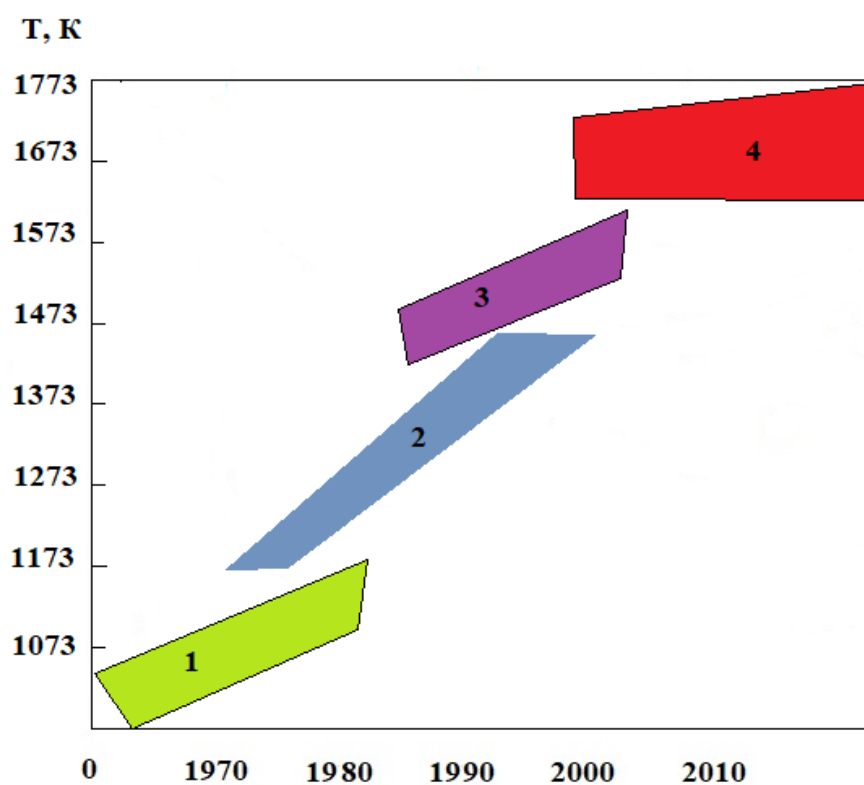


1 – современного поколения 2 – двигатели будущих поколений

Рисунок 3 – Прогнозирование роста температур газотурбинных двигателей

К наиболее перспективным разработкам в сфере материалов и сплавов, обладающих высокой жаропрочностью, можно отнести применение современных эвтектоидных сплавов, уникальность которых состоит в том, что все их составляющие застывают при одной и той же температуре путем добавления в них небольшого количества керамических оксидов.

Следует также отметить применение современных композиционных материалов, в состав которых входит металлическая матрица и композиционных материалов, матрица которых имеет никелевую основу, данные матрицы могут быть армированы как вольфрамовыми волокнами, так и волокнами на основе карбидов ниобия, а также могут применяться специальные защитные покрытия [4, 13].



- 1 – традиционные жаропрочные сплавы; 2 – металл со структурой, упрочненной направленной кристаллизацией; 3 – термозащитные покрытия; 4 – композиционные материалы с керамической матрицей

Рисунок 4 – Прогноз применения материалов с повышенной жаропрочностью

Исходя из литературного анализа и судя по прогнозам, в скором времени основными материалами, применяемыми в трактах газотурбинных двигателей, все же будут жаропрочные сплавы и стали на основе никеля и титана [1, 4, 13]. В связи с этим усовершенствование существующих и внедрение новых технологий по сварке этих сплавов с другими металлическими и неметаллическими материалами, является многообещающим направлением.

Многообразие применения способов диффузионной сварки в вакууме, а также использование родственных с ней процессов нашли обширное применение при изготовлении ряда узлов и деталей в машиностроении и довольно таки конкурентно способны с традиционными технологиями сварки.

Весьма серьезное значение диффузионной сварки в вакууме, касательно двигателестроения придает за границей. Так она нашла свое применение у широко известных фирм США, Японии, Великобритании, Германии и других стран. Опираясь на литературные данные, различные компании США («RockwellInternational», «Mc. DonnellAircraft» и др.), Великобритании («BritishAerospase»), Японии («MitsubishiCorporation») с помощью процесса диффузионной сварки в вакууме в разное время произвели различные узлы для экспериментальных продуктов для судостроения, авиационной, космической и автомобильной техники [9].

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

Как показывает проделанный анализ материала, диффузионная сварка в вакууме в разрезе такой отрасли, как двигателестроение, используется в основном, когда используется соединение разнородных материалов, у которых резко отличаются свойства. «Львиная» доля узлов и деталей, которые изготавливаются с помощью диффузионной сваркой в вакууме имеет составную конструкцию и осесимметричную форму, а также и

относительно незначительные массогабаритные размеры. К таким узлам можно отнести, например, роторы турбоэнергогенераторов, биметаллические трубчатые переходники, пластинчатые теплообменник и др.

Проведенный литературный обзор позволяет сделать вывод о перспективности применения метода диффузионного соединения для решения одной из важной и современной задачи в производстве газотурбинных двигателях, как изготовление неразъемных соединений их элементов конструкций. Поэтому необходимо разобрать закономерности, касаемые диффузионного соединения.

2 Проблемы обеспечения заданных свойств диффузионных соединений

В процессе установлении определенных заданных свойств для диффузионного соединения, полученного в результате диффузионной сварке в вакууме, степень критериев, по которым оценивается надежность, эксплуатационный ресурс, механические, потребительские и другие свойства, указывается в техническом задании заказчика продукции, и решение этих задач, относится к основным при разработке и внедрении современных технологий сварки.

Диффузионная сварка в вакууме, которая происходит в условиях корректируемых или ограниченных тепловложений (индукционный нагрев) и деформаций (плавность хода привода) в материал, с заданным качеством поверхностей соединяемых деталей, а также вакуум или контролируемая среда (аргон, гелий), позволяет получать и принимать участие в процессах ответственных за формирование соединения, контролировать и сохранять исходные свойства свариваемых материалов.

При совместном использовании диффузионной сварки в вакууме с термической обработкой, применением ультразвуковых колебаний, с применением рекристаллизации, а также с применением расплавляющихся «барьерных» прослоек или напыленных слоев на поверхность свариваемых деталей и другие технологические процессы, позволяют целенаправленно формировать и управлять свойствами диффузионного соединения.

Получение требуемого набора свойств сварного соединения, полученного диффузионной сваркой в вакууме, формируется путем оптимизации различных характеристик, таких как технологические режимы сварки, термическим и/или деформационным воздействием, совмещение операций, регулированием степенью вакуумирования камеры, нагревом деталей до разных температур, использованием «барьерных» прослоек,

специальной обработкой контактируемых поверхностей свариваемых деталей и другими.

При формировании комплекса заданных свойств целесообразно проводить графоаналитический анализ исследуемых свойств, который заключается в графическом совмещении заранее определенных зависимостей параметров оптимизации от наиболее важных контролируемых, а также изменяемых параметров. Перед началом анализа, необходимо произвести подбор основных материалов для сварки, определить перечень параметров для оптимизации и изменяемых факторов, введение границ изменения условия [14].

В роли границ при графоаналитическом анализе назначаются следующие границы: постоянные значения параметров, а также сумма погрешностей измерения и объем установленной зоны изменяемого параметра.

В работе [14] приводится пример оптимизации температуры диффузионной сварки стали 12Х18Н10Т и магнитно-мягкого сплава 49К2Ф (рисунок 5).

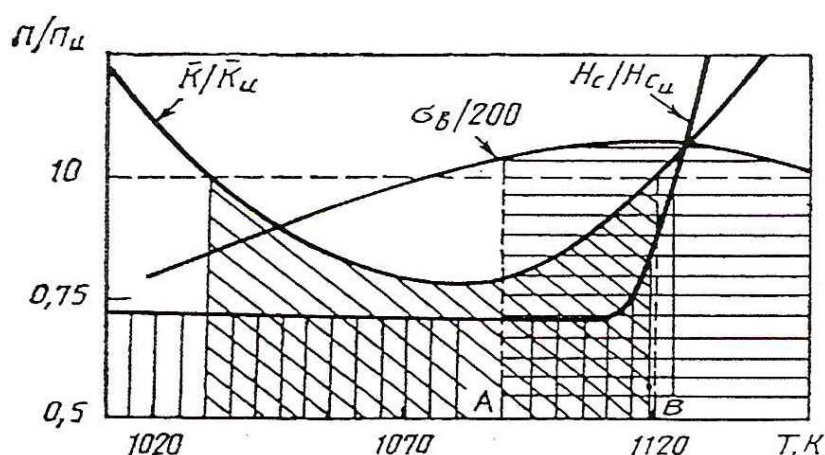


Рисунок 5 – Оптимизация технологических параметров при диффузионной сварке магнитопровод (12Х18Н10Т+Cu+49К2Ф)

Анализ экспериментальных данных показывает, что такой технологический прием как применение специальных прослоек, например, прослойка меди позволяет оптимизировать температуру сварки. Причем, прочность на растяжение и коррозионная стойкость соединения удовлетворяют заданным значениям.

При разработке новых технологий изготовления сварных элементов конструкций ГТД приходится решать ряд специфических проблем, связанных с используемыми материалами и условиями эксплуатации. Так, используемые материалы очень чувствительны к высокотемпературным воздействиям (алюминиевые, титановые, жаропрочные никелевые и др.). При нагреве выше определенных температур материалы могут необратимо терять наиболее важные свойства, например, жаропрочность и т.п. В связи с этим при выборе способов соединения элементов конструкции необходимо в значительной мере ограничивать тепловое воздействие на материалы, либо учитывать технологические приемы восстановления их свойств после сварки.

На рисунке 6 представлена блок-схема основных этапов, на которых обеспечиваются, контролируются и сравниваются фактические свойства диффузионных соединений с заданными.

На этапе конструкторско-технологического анализа узла разрабатывается техническое задание и определяются заданные свойства для диффузионных соединений.

Для выбора способа соединения важнейшими данными являются во-первых, сочетание свариваемых материалов и их физико-механические свойства, во-вторых, форма и размеры сварного соединения.

Для обеспечения заданных свойств соединений с учетом выше указанных факторов для соединения целесообразно выбирать наиболее рациональные способы, к которым можно отнести диффузионную сварку в твердом состоянии и через расплавляющиеся прослойки. В технической литературе целый ряд способов диффузионного соединения имеет и другие

названия, например, диффузионная сварка, контактно-реактивная пайка, сварка-пайка, диффузионная пайка и т.п.

Несмотря на особенности каждого из указанных способов очевидно, что с энергетической точки зрения энергия формирования сварного или паяного шва для всех методов соединения должна быть примерно одного порядка.



Рисунок 6 – Блок-схема этапов обеспечения заданных свойств соединений

3 Деформации и напряжения, возникающие во время сварки и их влияние на сварные соединения

При таком технологическом процессе как сварка, обязательно возникают внутренние напряжения, которые в свою очередь очень часто приводят к деформациям (изменение формы и размеров тела), которые в своем большинстве оказывают негативное влияние на качество сваренных узлов и конструкции в целом. При монтаже, ремонте, изготовлении или реконструкции узлы и детали, которые были сварены, способны изменять форму и размеры всей конструкции, что приводит к восстановительным работам, несущим дополнительные материальные и трудовые ресурсы. Однако, рациональная организация сборочно-сварочных процессов со строгим соблюдением режимов сварки, способствуют снижению, а зачастую и приводят к отсутствию сварочных деформаций. Следуют также учитывать и выбор рационального расположения сварных швов, основных и сварочных материалов на этапе конструирования и проектирования конструкции.

При эксплуатации изделия, сварочные напряжения, возникшие после сварки (называемые остаточными) и пластическая деформация металла приводят к изменениям механических свойств (прочность, твердость, ударная вязкость и другие) в отрицательную сторону. Разумное и квалифицированное использование различных средств предотвращения появления остаточных напряжений после сварки решает сразу две задачи: во-первых, позволит снизить затраты на изготовление сварных конструкций, а во-вторых, повысит качество и надежность сварных конструкций.

Теоретические основы, касаемые сварочных напряжений и деформаций – один из наиболее сложных разделов в науке о сварочном производстве, который включает в себя такие дисциплины как теплопроводность, упругость, пластичность и ползучесть металлов. Термические и механические процессы, происходящие в металле во время

сварочного процесса и остывания сварной конструкции еще не в полной мере изучены и не могут быть точно описаны и приведены к какой либо зависимости. Из-за того, что в неполной мере в современной науке изучены тела с переменным модулем упругости и пределом текучести металлов в теории пластичности, получить точные, количественные зависимости не представляется возможным [36].

Теория сварочных напряжений и деформаций развивается как приближенная прикладная наука, призванная ответить на некоторые практические вопросы технологии изготовления и эксплуатации сварных конструкций. Расширение и сокращение металла в процессе нагрева и остывания при сварке сопровождается образованием деформаций. При этом вследствие неравномерного нагрева деформации, как правило, не протекают легко. В соединениях, выполненных сваркой, образуются напряжения, которые равны или превышают предел текучести металлов. Процесс, когда металл испытывает нагрузки обязательно сопровождается пластической деформацией металла. Деформации металла в отдельных точках конструкции обязательно приводит к перемещению всей сварной конструкции, что в свою очередь нарушает её форму и размеры [36].

Принято считать, что в большинстве случаев под названием «сварочные деформации» понимают перемещения отдельных точек конструкции, полученной при помощи технологического процесса – сварка, а не деформация металла, как это трактуется в теории прочности и сопротивления материалов (включая в себе теорию как упругости, так и пластичности материалов). Несмотря на то, что деформации, напряжения и перемещения между собой связаны, изучение их зачастую производилось обособленно. Это обстоятельство отразилось и на расположении материала в различных научных изданиях: вначале предлагается рассмотреть деформации и напряжения в металле, а уже после перемещения, возникающие изделиях.

Деформации и напряжения в металле сварных конструкции влияют главным образом на их прочность, в то время как перемещения – на

технологический процесс изготовления и на искажение геометрических форм сварной конструкции. Следует отметить, что проведенный литературный анализ показал, что влияние деформаций и напряжений, в конструкциях, полученных при помощи сварки, на прочностные характеристики освещен еще слабо [36].

3.1 Природа и классификация остаточных напряжений

Впервые классифицировал остаточные напряжения Н.Н. Давиденков [37]: классифицируя их по протяженности силового поля и разделив на III рода:

1) Напряжения I рода (зональные или как их еще называют макронапряжения), те напряжения, которые уравниваются в пределах областей, размеры которых одного порядка (соизмеримы) с размерами тела (в макрообъемах);

2) Напряжения II рода (микронапряжения), те напряжения, которые уравниваются в объемах, размеры которых одного порядка с размерами зерна или группой зерен (в микрообъемах).

3) Напряжения III рода (субмикроскопические), те напряжения, которые уравниваются в объемах одного порядка с размерами элементарной кристаллической ячейки (в субмикрообъеме).

Сам автор, предложивший данную классификацию, уже в 1959 году в своей работе [38] решил отказаться от такой классификации остаточных напряжений по рентгеновским проявлениям, к которым он в свое время отнес напряжения II и III родов.

На том момент не было работ, описывающих в которой была бы представлена, как минимум упрощенно, схема баланса выделенного компонента под нагружением остаточных напряжений II или III рода.

Авторы Щапов и др. [39], согласились с Н. Н. Давиденковым относительно того, что признаком, по которому можно классифицировать

остаточные напряжения, может принимать только размер области, в рамках которой уравниваются напряжения I рода и порекомендовали слово «напряжение» заменить на «искажение».

В отдельных случаях возникают напряжения, которые называют остаточными напряжениями IV рода, получившие название «безнагрузочные». По определению – это напряжения, которые получаются в следствии неравенства КТР в различных фазах, которые происходят в ходе остывания металла после термообработки или сварке давлением, и они эквивалентны напряжениям II рода [38].

Остаточные напряжения I рода появляются в следствии многократной термической обработки, которая вызывает фазовые и структурные превращения в металле. Они существенно влияют на металл под действием внешних сил и практически на все его механические свойства.

Также о напряжениях II рода рассуждал ученый Г. Ф. Косолапов [40]. Он утверждал, что: «Два кристалла поликристаллического образца, находящиеся рядом, всегда различно ориентированы по отношению друг к другу и к направлению действующих сил. При пластической деформации образца и после его разгрузки эти кристаллы из-за анизотропии будут иметь и различную остаточную деформацию» [40].

«Так как между кристаллами существует взаимная связь, то один из них будет упруго растянут, а другой сжат. Следовательно, между ними возникнут внутренние напряжения, которые приведут к изменению межплоскостных расстояний в атомной решетке. Но деформация может быть неоднородной не только в отдельных кристаллах, но и в отдельных блоках и даже в различных участках одного и того же блока, если он упруго изогнут» [40, 43].

В процессе экспериментального исследования начальной стадии зарождения пластической деформации, а также при проведении испытаний на статический изгиб или ударную вязкость было установлено, что деформации размещены в металле отнюдь не равномерно. В

подповерхностных областях металла при возникновении большого вектора напряжений с постоянством наблюдается развивающаяся пластическая деформация при постоянном значении деформации, а в пограничных областях металл находится в состоянии упругой деформации.

Соотношение разницы значений относительного удлинения к относительному сдвигу отличается на порядок [41].

Концентрация пластических деформаций обычно зависит от угла плоскостей скольжения по отношению к направлению максимального касательного напряжения, и выражается выражением:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sigma_{max}, \quad (3.1)$$

«Однако, если бы различие в величине деформаций объяснялось одной только разницей в ориентировке кристаллографических плоскостей, то точки возникновения первых пластических деформаций были бы произвольным образом распределены по поверхности образца, в котором во всех точках поверхности действует одинаковое максимальное макронапряжение σ_{max} . Фактически это наблюдается только в начальной стадии процесса, когда возникают первые признаки пластической деформации» [42, 43].

В дальнейшем при развитии деформации образца наблюдается известная степень упрочнения зон пластической деформации, связанная со взаимодействием расширяющихся зон деформации и распределением энергии в объеме образца. Это взаимодействие реализуется при проявлении внутренних напряжений II рода, действующих в пределах отдельных зерен и их групп в окрестностях деформированной зоны. В соответствии с этим общая макродеформация рассматриваемого слоя металла выражается формулой:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{пл} i \delta + \varepsilon_{упр} (1 - i \delta), \quad (3.2)$$

где i — число зон пластичности на 1 см длины поверхности;

δ — размер этих зон в направлении действующего напряжения.

«Механизм возникновения остаточных напряжений Я. Немец, анализирует по аналогии с системой из соединенных в одной точке стержней, нагруженных общей внешней нагрузкой» [42, 43].

По утверждению Немеца, усилия при растяжении в стержнях неодинаковы. Все три зоны, рассматриваемые в зоне поликристаллического металла, совершат работу при одном и том же нагружении, но имеют совершенно разное сопротивление пластической деформации. Все образцы изготовлены из одного и того же металла и имеют одинаковый предел текучести σ_t .

Во всяком случае, при рассмотрении внутренних напряжений, которые действуют в малых объемах, т.е. остаточных напряжений Прода, вышеуказанная модель в достаточной степени правильно показывает соотношение сил, имеющее место в реальном металле. Так стержень установленные по середине будет нести самую большую нагрузку и в нем в первом возникнет пластическая деформация, а в других стержнях будет только упругая деформация.

Как только мы уберем приложение внешней нагрузки, стержни, расположенные по бокам, будут сокращаться до своей первоначальной длины и начнут сжимать стержень, находящийся посередине. В связи с этим в них судя по всему появится растягивающее напряжение, которое можно принять за остаточное напряжение в этой простой системе стержней.

В реальном теле, состоящем из разных зон, обладает различным сопротивлением к деформации, остаточные напряжения будут распределены аналогично. Что касемо напряжений, возникающих после приложения внешней нагрузки, то они распределятся таким же образом, как и остаточные напряжения, но с противоположным знаком. Причем каждая зона

пластической деформации будет стремиться противодействовать пластической деформации в граничных зонах.

С увеличением внешней нагрузки указанная разница в остаточных напряжениях будет постепенно уменьшаться, что приведет к более равномерному распределению пластической деформации. При деформации твердость отдельных зерен и/или их групп будет увеличиваться, причем будет увеличиваться и сопротивление дальнейшей деформации.

Из вышесказанного следует, что вначале пластической деформации распределение макронапряжений равномерное, но с перераспределением деформации довольно неравномерное.

Все изложенные выше, относится к исследованию остаточных напряжений II рода. Как уже было сказано, направления этих напряжений определяются лишь деформациями зерен и/или их групп.

Немецкий инженер-механик Баушингер, в свое время проводил исследования металлических образцов, которые нагружал попеременно то растягивающей силой, то сжимающей, и в ходе эксперимента установил, что с изменением «знака» приложения нагрузки предел упругости металла σ_y сильно снижается. Это явление получило название «эффект Баушингера», который также можно отнести к анализу роли остаточных напряжений II рода.

Если возвратиться к системе, состоящей из трех стержней, можно констатировать, что в среднем стержне, будет действовать остаточное напряжение сжатия, после удаления внешней нагрузки. И если к системе применить «эффект Баушингера», т.е. приложить нагрузку «обратного» знака, то напряжение в среднем стержне будет суммироваться с остаточным сжимающим напряжением, оставшимся после предыдущего цикла нагружения.

В связи с этим, получается, что небольшая нагрузка, приложенная извне, которая вызывает минимальные дополнительные напряжения,

становится достаточной для появления в среднем стержне целой системы макродеформаций.

Как видим, в следствии развития пластической деформации в металле возникает концентрация напряжений разнообразных типов в микрообъемах. После того, как «снимают» внешнюю нагрузку, в металле возникают остаточные напряжения, которые в случае применения «эффекта Баушингера» будут оказывать отрицательное влияние на сопротивление металла.

Получается, что чем выше пластичность металла, тем меньше в нем концентрация остаточных напряжений в различных зонах его объема и «эффект Баушингера» в случае весомых деформаций не заметен.

В качестве примера, можно рассмотреть аустенитную сталь, обладающей большой пластичностью, из за которой появление зон пластической деформации, а также их распространение в металле, проявляется не так отчетливо, по сравнению со сталями, обладающими меньшей пластичностью.

В трудах Косолапова Г. Ф., можно увидеть, что напряжения Шрода возникают при перемещении атомов на определенные расстояния [40], тем самым они нарушают кристаллическую структуру и несут непоправимый характер в пластической деформации металлов, при которой энергия повышается на величину, приведенную в следующем выражении:

$$\Delta U = \delta A - \delta Q, \quad (3.3)$$

где δA – работа внешних сил при деформировании;

δQ – теплота, выделяющаяся в пластически деформированном теле.

Предложенная Н. Н. Давиденковым классификация остаточных напряжений используется и по сей день.

Другие классификации, которые предлагались не нашли своего применения в силу своей полноты и точности определения, так как они

делили остаточные напряжения всего на две группы микро и макронапряжения [43].

Главной причиной по которой возникают остаточные напряжения в металле, является неоднородность пластической деформации, которая образуется из-за неравномерного распределения температур при термической обработке, сварке, а также фазовых превращений в деталях и узлах, после определенных технологических операций.

Практически любой технологический процесс в котором металл подвергается тепловому или механическому воздействию, будь то штамповка, прокатка, волочение, либо сварка плавлением или давлением, будут сопрягаться с неравномерной пластической деформацией. Одни слои металла будут растягиваться или сжиматься, больше, чем другие, и в следствие снятия нагрузки в них возникнут остаточные напряжения тех или иных знаков.

Если рассмотреть группу сварки давлением, а в частности диффузионную сварку в вакууме, то получается, что на деформации еще накладывается и температурное поле, которое возникает из-за нагрева и охлаждения деталей.

«Из-за неравномерного распределения температур, происходит неравномерное протекание фазовых превращений в металле, что приводит к возникновению высоких остаточных напряжений.

Вследствие чего после диффузионной сварки в вакууме возникает неоднородная система остаточных напряжений. Определить такие остаточные напряжения, то есть те, которые зарождаются в процессе фазовых превращений, очень сложно, так как они зачастую связаны с наличием неравномерности температурного поля при сварке» [43, 52].

Зарождение и развитие остаточных напряжений в металле, при осуществлении разных технологических процессов, происходит различными способами, но причиной их возникновения как правило являются необратимые изменения в металле.

Самый типичный процесс появления остаточных напряжений происходит, в результате предварительной пластической деформации, к которой можно отнести термическую обработку металла.

«С точки зрения физики, остаточные напряжения образуются после пластической деформации, которая происходит в следствии остаточными изменениями объема металла. Вот эти изменения, которые, остаются и после снятия нагрузки, и вызывают остаточные напряжения.

Например, в диске (смотри рисунок 7, а) при вращении с большой угловой скоростью возле отверстия напряжения превышают предел текучести и возникает остаточная деформация растяжения. После остановки все частицы диска стремятся вернуться на первоначальные окружности (свойства упругого материала) и в области отверстия возникают сжимающие остаточные напряжения (смотри рисунок 7, б).

В основе определения остаточных напряжений после пластических деформаций лежит «теорема о разгрузке». В соответствии с этой теоремой, впервые указанной Генки, остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости материала» [43].

Теорема о разгрузке основана на следующих постулатах, приведенных в [44], а именно: «Пусть к телу приложена система внешних сил и в нем возникли упругопластические деформации в процессе простого нагружения (напряжения в данной точке возрастают пропорционально одному параметру)» [44].

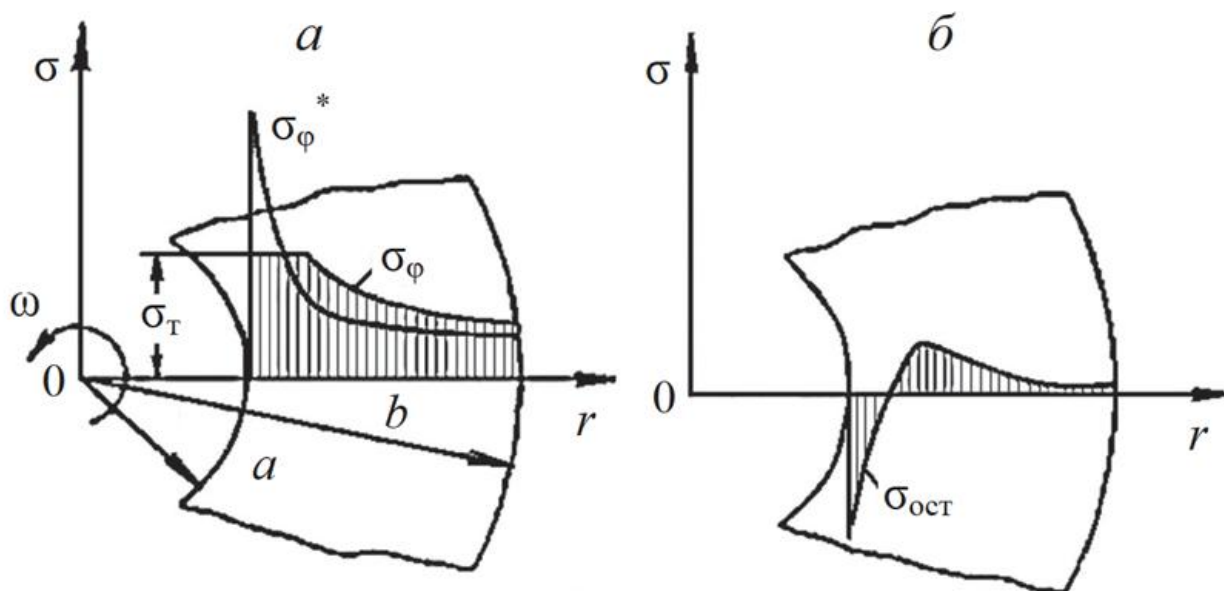


Рисунок 7 – Эпюры остаточных напряжений после пластической деформации в диске

В продолжении сказанного: «После разгрузки можно представить процесс как нагружение усилиями противоположного направления. При этом нагружении тело ведет себя как упругое. Остаточные напряжения (после двух процессов нагружения – в прямом и обратном направлениях) будут равны разности между напряжениями в упругопластическом теле и в упругом теле при одних и тех же нагрузках. Теорема справедлива в том случае, если в процессе разгрузки не наступают повторные пластические деформации» [43, 44].

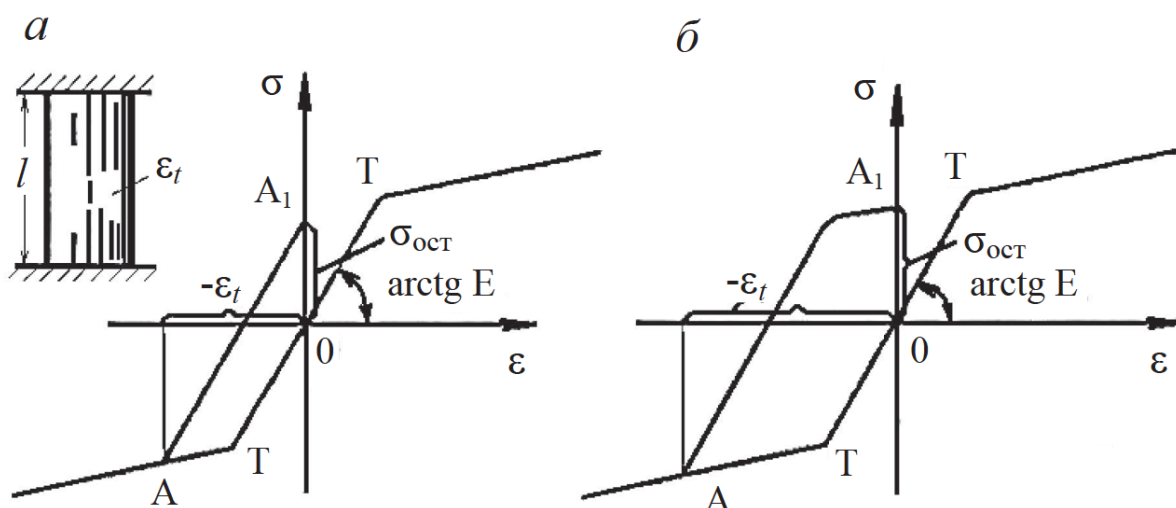
Из «теоремы о разгрузке» можно сделать вывод о том, что эпюра остаточных напряжений будет всегда самоуравновешенной для тела любой формы.

Как показано в работах [43, 44] «если распределение напряжений в упругопластическом и в упругом теле одинаково (что имеет место в статически определимых системах), то остаточные напряжения после пластической деформации не возникают» [43, 44].

«Где на примере показано растяжение стержня осевой силой или растяжение тонкостенного цилиндра под действием внутреннего давления» [43, 44].

«Пластическая деформация также возникает и при больших температурных напряжениях в случае интенсивного нагрева или охлаждения деталей, и в дальнейшем мы рассмотрим процесс образования остаточных напряжений после нагрева или охлаждения» [43, 44].

Главные особенности образования остаточных напряжений при нагревании или охлаждении, можно наблюдать на примере стержня, жестко защемленного концами (смотри рисунок 8).



a – при упругих деформациях; *б* – при вторичных пластических деформациях

Рисунок 8 – Остаточные напряжения при нагреве стержня:

«Расстояние между плоскостями остается неизменным. Эти плоскости отражают части конструкции, подвергающиеся температурному воздействию» [43, 44].

«Если нагреть стержень на температуру t , то в нем возникнут температурные напряжения

$$\sigma = -E\varepsilon_t, \quad (3.4)$$

где ε_t – температурная деформация

$$\varepsilon_t = \alpha^*(t_1)d_{t_1} \quad (3.5)$$

В равенстве $\alpha^*(t_1)$ – истинный коэффициент линейного расширения при температуре t_1 – текущая температура, $0 \leq t_1 \leq t$.

Если температурные напряжения в процессе нагрева будут выше предела текучести материала, то после снятия нагрева в стержне останутся остаточные напряжения» [43, 44].

На рисунке 8 приведен «графический метод определения остаточных напряжений после нагрева, в случае если механические свойства в процессе нагрева остаются const. По оси абсцисс откладывается значение температурной деформации, с обратным знаком точка А характеризует напряжение стержня в конце нагрева. При снятии нагрева деформации и напряжения изменяются по прямой AA₁; отрезок OA₁ выражает остаточные напряжения. При больших значениях температурная деформация ε_t в процессе разгрузки образуются повторные пластические деформации» [43, 44].

Представляет интерес определение остаточных напряжений после значительного нагрева, когда в процессе нагрева и охлаждения механические свойства материала изменяются. Пусть нагрев осуществляется в интервале от t_1 до t_k . На рисунке 9 даны кривые деформирования для указанных температур и двух промежуточных.

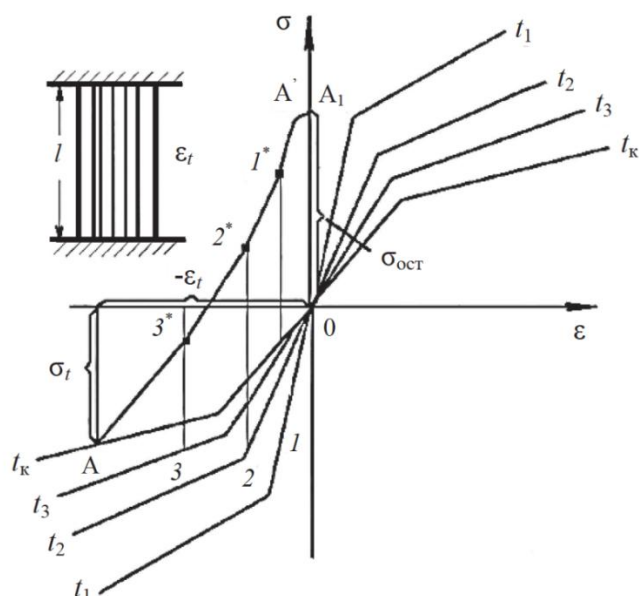


Рисунок 9 – Определение температурных напряжений в процессе нагрева с учетом изменения механических свойств материала

«Вначале рост температурных напряжений идет вдоль кривой 01, при дальнейшем повышении температуры осуществляется «перескок» на кривую 02 (предполагается, что свойства материала изменяются скачкообразно). Температурное напряжение после нагрева численно равноординате точки А» [43].

«Рассматривается процесс охлаждения. При уменьшении температуры от t_k до t_3 температурные напряжения будут уменьшаться по прямой АЗ*, параллельной начальному участку кривой 0А. При понижении температуры от t_3 до t_2 напряжения изменяются по прямой 3*2*, параллельной начальному участку кривой 03. В точке А' остаточные напряжения достигают предела текучести и дальнейший рост остаточных напряжений становится небольшим.

В изложенном методе определения остаточных напряжений используется простейшее предположение о том, что для каждого этапа нагрева или охлаждения справедлива зависимость

$$\sigma = f(\varepsilon), \quad (3.6)$$

свойственная данной температуре, причем переход от одной кривой деформирования к другой осуществляется при постоянстве общей деформации.

Отметим важную особенность в образовании остаточных напряжений после интенсивного нагрева. В процессе нагрева создаются температурные напряжения сжатия, превосходящие предел текучести материала (температурная деформация, превышающая упругую)» [43, 44].

«В результате в материале образуется остаточная пластическая деформация сжатия. После снятия нагрева размеры детали возвращаются к прежним, но наличие остаточной деформации сжатия вызывает появление остаточных напряжений растяжения.

Выше при рассмотрении вопроса об остаточных напряжениях после нагрева или охлаждения учитывалась только обобщенная «температурная» деформация.

Во многих случаях оказывается необходимым учесть специфические объемные изменения в материале, связанные с фазовыми и структурными превращениями, которые определяются не только температурой, но и другими параметрами процесса, например, временем» [43, 44].

При расчете реальных процессов нагрева или охлаждения следует также иметь в виду, что распределение температур сильно изменяется во времени.

В некоторых случаях нагрева (или охлаждения) процессы нагружения и разгрузки (в данной точке) могут повторяться. Следует также учитывать изменение кривых деформирования в связи с изменением температуры. С подобными вопросами приходится сталкиваться при определении остаточных напряжений, вызванных термической обработкой металлов и сварки.

В результате локального нагрева и неравномерного расширения металла возникают сварочные напряжения и деформации при сварке. Напряжения, которые находятся в сварном изделии относятся к разряду

собственных напряжений, так как существуют без приложения внешних нагрузок.

При сварке одной из причин появления остаточных напряжений и в следствии них также и деформаций, являются литейная усадка металла, а также различные изменения структуры металла в шве и околошовной зоне. Литейная усадка металла возникает в следствии уменьшением объема металла при остывании с последующей кристаллизацией сварочной ванны, и создает силы как в продольном, так и поперечном направлениях. Такое влияние структурных изменений металла и рост внутренних напряжений особенно сильно проявляется при сварке высокопрочных закаливающих сплавов [43, 44, 45].

В соответствии с теорией, все напряжения и деформации можно разделить на временные, которые вызваны неравномерным нагревом в процессе сварки и остаточные, которые проявляются сразу или через длительный промежуток времени после окончания сварки.

При сварке металла разной толщины, можно проследить все три типа остаточных напряжений: одноосное – характерно для малых толщин металла, двухосное – наблюдается при сварке металла средней толщины, трехосное или как его еще называют объемное – встречающееся в основном при сварке металла имеющего большую толщину.

Так же остаточные напряжения можно разделить в зависимости от направления действия этих напряжений, а именно продольные, те которые направлены параллельно оси шва и поперечные, которые расположены перпендикулярно оси шва.

Еще одно разделение остаточных напряжений – это растягивающие или сжимающие и из-за того, какой знак «+» или «-» будут иметь напряжения можно судить и о деформациях сварной конструкции, которая проявится в виде продольного или поперечного, по отношению к оси шва, укорочения или изгиба, или кручения, что в приведет к потере устойчивости сварного соединения и всей конструкции в целом.

При осуществлении любой пластической деформации металла, будь она холодной, горячей или теплой все равно после разгрузки возникнут остаточные напряжения. Основной причиной возникновения остаточных напряжений является неоднородное распределение деформаций и температур.

При термическом сжатии и расширении во время кристаллизации расплава меняется удельный объем металла, происходят фазовые превращения, приводящие к изменению химического состава поверхностных слоев в твердо, но пластичном состоянии. Предположим идеальную ситуацию, при которой кристаллизация расплава и фазовые превращения в твердом состоянии проходили бы одновременно, да и еще в одинаковой степени по всему объему, тогда внутренние напряжения и не возникали бы вовсе. Но к сожалению, при нагреве и охлаждении всегда присутствует градиент температур по всему сечению тела, который приводит к изменению удельного объема металла по-разному в совершенно разных точках, что и способствует появлению внутренних напряжений [1, 43, 44].

Принято различать температурные и структурные остаточные напряжения, которые возникают в результате температурного воздействия, либо при фазовых превращениях в твердом состоянии, соответственно.

Независимо от способа обработки металлов, остаточные напряжения возникнут, причем одна технологическая операция может привести к нескольким видам по своему происхождению напряжений, как термических, так и от фазовых превращений, а так же от неоднородной пластической деформации.

Например, при обработке металла давлением в горячем состоянии, кроме напряжений, возникших из-за неоднородной пластической деформации, обязательно появятся и термические, а возможно и появление фазовых напряжений, при условии, что металл будет быстро охлаждаться.

Если рассмотреть технологический процесс сварки, то при нем образуются как термические, так и фазовые остаточные напряжения, которые

могут алгебраически складываться [43, 44], что приводит к сложному напряженному состоянию.

3.2 Влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства деталей и изделий в целом

Остаточные напряжения могут складываться с напряжениями, приложенными извне, и в зависимости от знака могут усиливать или ослаблять их. Более опасными являются растягивающие остаточные напряжения, так как они могут привести к разрушению несмотря на то, что значения их не велики.

Наибольшую опасность представляют растягивающие напряжения при трехосном растяжении, потому что они могут приводить к хрупкому разрушению в следствии малых касательных напряжений.

Остаточные напряжения также опасны и в конструкциях изготовленных из малопластичных металлов, а также из материалов, теряющих свою пластичность при отрицательных температурах, вследствие малой ударной вязкости металла.

Влияние остаточных напряжений в сварных конструкциях зачастую приводят к серьезным разрушениям деталей, а растягивающие остаточные напряжения, которые работают при знакопеременной нагрузке, которая является постоянным фактором при работе газотурбинных двигателей и турбоагрегатов, может способствовать усталостному разрушению.

Металл, который «заражен» остаточными напряжениями имеет в своей структуре области, содержащие упругие деформации разных знаков, и если при помощи механической обработки «срезать» верхний слой, то таким образом можно «снять» макронапряжения.

При обработке металла или во время эксплуатации изделия присутствие остаточных напряжений может привести к изменению формы или размеров. Самопроизвольное изменения размеров и формы во время

эксплуатации происходят из-за равномерного перераспределения остаточных напряжений при их уменьшении, причем скорость с которой происходит уменьшение напряжений зависит от их начального уровня [43, 44].

Можно создавать и заведомо контролируемые остаточные напряжения, которые по знаку будут отличаться от рабочих напряжений и при их суммировании свести на нет напряженное состояние. С этой целью применяют различные методы поверхностной обработки металлов [43, 44].

При сварке высокопрочных сплавов, а также металлов обладающих особо плохой свариваемостью как в однородном, так и при разнородных сочетаниях, остаточные напряжения оказывают отрицательное влияние на механические свойства сварных соединений. Остаточные напряжения влияют не только на сварной шов, но и на околошовную зону и зону термического влияния, приводя к возникновению трещин и иногда к разрушению конструкции.

В случае наличия в шве или околошовной зоне поры, шлаковых включений и других несплошностей, они будут являться концентраторами напряжений, что усилит пагубное влияние остаточных напряжений, особенно если конструкция будет работать при динамической нагрузке.

Остаточные напряжения могут снизить жесткость конструкции и привести к медленному разрушению даже при отсутствии внешних факторов, а также понизить коррозионную стойкость сварных соединений [43, 44].

3.3 Методы оценки работоспособности элементов конструкции ГТД с позиции механики остаточных напряжений

Важным этапом разработки технологии диффузионного соединения элементов конструкции ГТД является оценка их работоспособности. Большое количество элементов конструкций ГТД эксплуатируются в условиях циклических нагрузок. В связи с этим особое значение приобретают

вопросы прогнозирования сопротивления усталости элементов конструкции с позиции механики остаточных напряжений.

В большинстве работ [15, 16, 17, 18], а также рассмотренном выше разделе 3 данной работы были освещены и изучены процессы влияния циклической нагрузки на остаточное напряженно – деформированное состояние поверхностных слоев при низкотемпературном уменьшении остаточных напряжений, наведенных упрочняющей обработкой. В связи с этим становится ясно, что формированию остаточных напряжений при циклических нагрузках не уделили должного внимания.

Рассмотрев работы [19, 20] можно сделать вывод, что авторы занимались исследованиями остаточных напряжений с концентраторами напряжений, наведенных циклической нагрузкой. Знак «+» или «-» от внешней нагрузки задавал и знак соответствующим остаточным напряжениям. Они установили, что остаточные напряжения, зарождаются на первых циклах нагружения и они возрастают с увеличением номинальных напряжений, при этом никаких граничных условий не было задано. Также авторы отметили, что интенсивность зарождения остаточных напряжений напрямую зависит от степени их концентрации. В результате исследований использовали ультразвуковой метод контроля остаточных напряжений, который позволил неоднократно использовать один и тот же образец. Недостатком этого исследования является низкая точность измерения из-за применения УЗК, так как он имеет косвенный характер измерения, а также авторы упустили требования по предварительной подготовке образцов, которая может существенно повлиять на результаты исследования. Авторы также теоретически не описали изменения, происходящие в образцах и не рассмотрели симметричный цикл приложения нагрузки.

Хотя данные работы имеют недостатки, авторам удалось определить некоторые закономерности зарождения остаточных напряжений в образцах под действием внешней силы.

В работе [21] и показано большое различие между величинами теоретического и эффективного коэффициентов концентрации напряжений в образцах, которые имеют концентраторы напряжений в виде проточек, пропилов и т.п. Отличия этих коэффициентов тесно связаны с проблемами прогнозирования предела выносливости для деталей, которые сначала рассматриваются как свободные от остаточных напряжений. Данный прогноз основан на общепринятых методиках определения предела выносливости путем экспериментальных и расчетных оценок, а также и гипотез накопления повреждения в металлах.

Авторы работ [23, 24] подробно классифицировали и провели сравнительный анализ этих методов, и в ходе исследований разделили на 4 группы:

К 1-ой группе они отнесли те методы, которые требуют проведение испытаний без разрушения образцов. Такие методы можно использовать, только для оценки предела выносливости гладких образцов.

Ко 2-ой группе отнесли методы, которые при выполнении испытаний требуют разрушение образца. Данные методы довольно трудоемки и требуют проведение испытаний для большого количества образцов. К достоинствам этих методов можно отнести, возможность учесть влияние на предел выносливости различных технологических и эксплуатационных факторов.

К 3-ей группе относят методы, которые используют результат увеличения частоты испытаний, что позволит вывести кривые усталости. Минусом этих методов является большое выделение тепла в металле и в связи с этим сложно поддерживать заданную температуру. Данные методы в основном необходимы для получения баз испытаний, что другие методы пока не в силах дать.

4-ая группа методов опирается на результаты проведенных испытаний образцов при заданном изменении нагрузки. К недостаткам данной группы методов можно отнести то, что они не учитывают историю нагружений и последовательность чередования ступеней нагружения.

Если рассмотреть все представленные методы в целом, то общим слабым местом является формальный подход к решению поставленной задачи, и этот признак не дает возможности четко выделить области применения методов, что в свою очередь отражается на большой разнице между расчетными и экспериментальными данными.

Разумным итогом и последующим шагом вперед касаясь идей прогнозирования, являются исследования, проведенные авторами работ [24, 25], где предложена математическая модель. В основу предлагаемой модели были положены основные принципы механики остаточных напряжений, исследования аномальных свойств ослабленного поверхностного слоя, обобщенная циклическая диаграмма деформирования материала. Была использована теория пластического течения в конечно-элементной реализации с пошаговым методом Ямада. Выявленные закономерности позволили связать остаточные напряжения, образующиеся в процессе циклического нагружения, с пределом выносливости при помощи зависимостей, согласующихся с принципами механики остаточных напряжений.

Данное направление исследований в основном связано с рассмотрением влияния резкого изменения формы элементов конструкций. Однако ряд элементов конструкций имеют другой случай концентрации напряжений. в частности, переходная зона диффузионного соединения. Данный вид концентрации напряжений обусловлен различием физико-механических свойств компонентов соединения, что не нашло должного отражения в разработках данного направления.

4 Общие выводы и формулировка задач

Проведенный литературный обзор позволяет сделать следующие выводы:

1. В настоящее время способы диффузионного соединения в вакууме элементов конструкций ГТД и турбоагрегатов различного назначения широко используются как в нашей стране, так еще в большем объеме за рубежом. Причем, по мере разработки и внедрения новых материалов со специальными свойствами растет доля сварных конструкций, выполняемых способами диффузионного соединения, в общем объеме сварочных работ в двигателестроении.

2. Особенно отчетливо преимущества диффузионных способов соединения в твердой фазе и через расплавляющиеся «барьерные» прослойки выражаются при производстве конструкций, состоящих из разнородных сочетаний материалов и/или трудносвариваемых сплавов со специальными свойствами, которые требуют ограниченного теплового воздействия. Также эти способы эффективны для изготовления прецизионных конструкций, в которых предъявляются жесткие требования к их форме и размерам.

3. Проанализировав литературные данные, можно сделать вывод о том, что к сожалению единых суждений, о механизме образования соединений при диффузионной сварке в твердой фазе нет. Хотя большая роль отводится процессам развития пластической деформации при контактном взаимодействии в условиях сварки.

4. Несмотря на достаточно большое количество данных о формировании напряженно-деформированного состояния в зоне соединения при сварке в твердой фазе, все же отсутствуют научно-обоснованные методики целенаправленного управления такими процессами, как деформирование, массоперенос, трение и схватывания в контакте разнородных материалов. При этом, довольно трудно выявить влияние

физико-механических свойств и условий контактного взаимодействия твердых тел на напряженное состояние их в зоне соединения, а, следовательно, обоснованно сделать предварительную оценку важных технологических параметров и факторов.

5. Анализ литературных данных показал, что в большинстве работ рассматриваются закономерности формирования соединений на основе процессов, протекающих с достаточно малыми скоростями (ползучесть, диффузионные процессы и т. п.), и недостаточно изучена кинетика развития процессов на начальной стадии образования сварного шва, которая в ряде способов сварки длится всего $10^{-4} \dots 10^{-6}$ с. Хотя такие процессы являются самоорганизующимися, развиваются нестационарно, что во многих случаях обеспечивает высокое качество соединения.

6. Изучение различных источников и проведенный анализ современной литературы показал необходимость и целесообразность использования способов диффузионного соединения для изготовления элементов конструкций газотурбинных двигателей и турбоагрегатов, а также раскрыл перспективные направления по усовершенствованию существующих методов оптимизации технологий с целью обеспечения заданных свойств сварного шва.

Основываясь на том, что было изложено ранее мною, я постараюсь сформулировать основные цели и задачи, которые попытаюсь решить в настоящей работе.

Цель настоящей работы заключается в рассмотрении мер по повышению технико-экономической и эксплуатационной эффективности газотурбинных двигателей и турбоагрегатов путем разработки технологии диффузионной сварки в вакууме с применением «барьерных» расплавляющихся прослоек.

Для реализации поставленной цели необходимо будет решить следующие основные задачи:

1) провести комплексную оценку по направлению методов повышения эффективности диффузионной сварки в вакууме узлов газотурбинных двигателей и турбоагрегатов;

2) разработать матмодель при контактном взаимодействии разнородных материалов при ДСВ через расплавляющие прослойки;

3) разработать технологию диффузионного соединения элементов ГТД и турбоагрегатов через расплавляющие прослойки.

5 Основные закономерности и особенности деформирования деталей из разнородных материалов при диффузионной сварке

Среди неразъемных элементов различных узлов в конструкциях авиационных газотурбинных двигателей и турбоагрегатов, при изготовлении которых применяется метод диффузионной сварки в вакууме, «львиную» долю составляют узлы, в которых соединение деталей осуществляется «встык», а детали изготавливаются из разнородных материалов (металлов и сплавов).

Из-за действия сжимающего усилия в ходе диффузионной сварки в вакууме неминуемо будет происходить, в большей или меньшей степени, непоправимое изменение формы сварного соединения и его макропластическая деформация, известная в литературных источниках как – «объемная», а так как процесс формоизменения сварного соединения при диффузионной сварке в вакууме происходит довольно медленно возникает еще и так называемая – «накопленная» деформация.

Вид деформации будет зависеть от конструкции свариваемого и от ряда множества различных факторов присущих диффузионной сварке в вакууме, к которым можно отнести следующие основные:

- 1) механические свойства свариваемых металлов;
- 2) способа нагрева (общим или локальным);
- 3) режимов сварки;
- 4) программ нагружения деталей и др.;

Более подробно все факторы описаны в [26].

Пластическая деформация сварного соединения является одним из путей, по которому ему сообщается энергия активации, необходимая для осуществления процесса сварки. Так как образование сварного соединения при диффузионной сварке в вакууме формируется процессами, которые

протекают в небольшой приконтактной зоне, можно предположить, что в нашем случае присутствует пластическая деформация прилегающих к контакту зон свариваемых деталей.

В связи с этим оптимизация напряженного деформированного состояния и условий протекания процессов деформирования и массопереноса является разработкой технологий диффузионного соединения важной технической задачей при разработке технологий диффузионного соединения [26, 53].

Оптимальное применение механической энергии, позволит провести процесс сварного соединения в условиях близких к диффузионной сварке в вакууме с максимальным термическим КПД, минимизировать ЗТВ, и как следствие оказать наименьшее тепловое воздействие на основные материалы и переходную зону сварки. В связи с этим нужно рассмотреть особенность деформирования таких сварных соединений при условии локального индукционного нагрева при диффузионной сварке в вакууме и изучить взаимосвязь между пределом прочности соединения и его деформацией [26].

Сварные соединения деталей цилиндрической формы, выполненные «встык» из однородных или разнородных материалов, относятся к наиболее распространенным типам сварных соединений в изделиях самого различного назначения, том числе для узлов газотурбинных двигателей и турбоагрегатов.

Рассмотрев исследования и оценив результаты полученные в [26], можно делать вывод о том, что утверждать, что величина макропластической деформации является важным технологическим параметром, косвенно характеризующим завершенности процесса формирования сварного соединения при диффузионной сварке. Поскольку механические свойства сварных соединений определяются процессами, протекающими в тонких прилегающих к свариваемым поверхностям слоях деталей, возникает необходимость изучения взаимосвязи процессов макропластической и контактной деформаций.

Зачастую величина деформаций деталей в сварных соединениях деталей и узлов имеет ограниченный характер и увеличение деформации в сварных соединениях является крайне нежелательной мерой из-за возрастания объема механической обработки после сварки, снижения коэффициента использования металла и т.п. Однако встречаются случаи, когда во время эксплуатации есть возможность применения сварных соединений без их завершающей механической обработки.

В связи с вышеизложенным изучение закономерностей макропластической деформации соединений при диффузионной сварке в вакууме направлено на изучение возможностей для минимизации ее величины при условии сохранения достаточно высоких показателей прочности сварных соединений.

Стремление к снижению температурно-временных параметров диффузионной сварки, при условии получения равнопрочного соединения приводит к необходимости увеличения сварочного давления [6, 7, 26, 51].

Также в работе [26] показано, что одним из главных параметров, который определяет высоту зоны деформации стыковых соединений при локальном нагреве, является распределение температуры вдоль его оси. Следовательно при постоянной величине сварочного давления высота зоны деформации рассматриваемых соединений с увеличением градиента в продольном их направлении должна уменьшаться.

При индукционном нагреве деталей ширину зоны нагрева можно отрегулировать путем использования индукторов токов высокой частоты различной конструкции, изменения частоты тока. Возможно существенное сужение зоны нагрева соединения путем устройства теплоотводов.

Одним из способов управления шириной нагреваемой зоны сварного соединения, является смещение индуктора относительно плоскости сварного стыка в сторону детали из более прочного материала, так как высота зоны деформации зависит от градиента температур в продольном направлении «мягкой» детали.

Полученный положительный результат [26], полученный в экспериментах от повышения величины фактора формы зоны деформации стыковых соединений из разнородных материалов, выражающийся в снижении температуры сварки при получении равнопрочного соединения, послужил основанием для проведения дополнительных исследований в этом направлении с целью разработки более эффективных технологических приемов его увеличения.

Повысить величину фактора формы зоны деформации соединений рассматриваемого типа можно с помощью жесткой оправки. Оправка, изготовленная из жаропрочного материала, надевается на «мягкую» деталь с некоторым вылетом, и, таким образом, ограничивает зону ее пластической деформации. Минимальная длина вылета определяется величинами осадки соединения при сварке и жесткости оправки.

Применение жесткой оправки при сварке сталь-медных образцов [26] позволило получить сварное соединение равнопрочное соединению по обычной схеме.

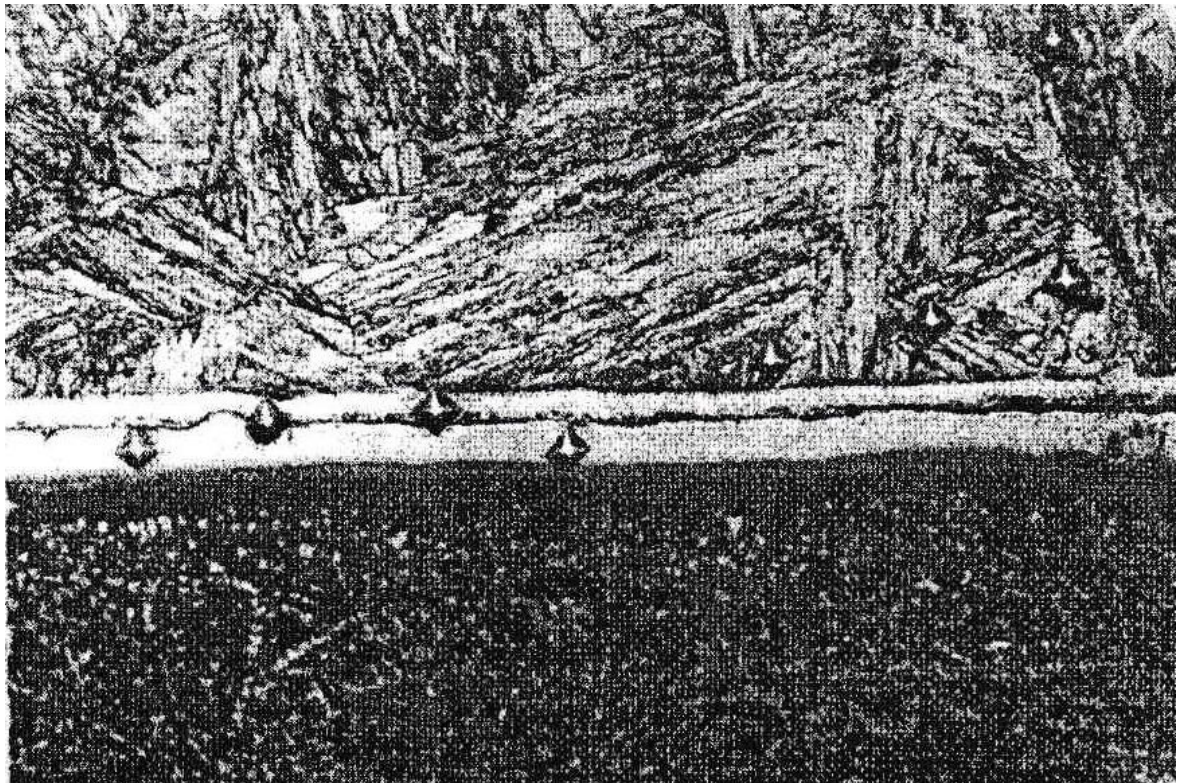
Таким образом описанные в работе [26], проведенные экспериментальные исследования позволяют установить влияние как физических, химических и механических свойств свариваемых металлов и сплавов, так и влияния давления, величины сварочного тока, конструкцию и расположение высокочастотного индуктора и оснастки при диффузионной сварке в вакууме.

6 Выбор и оптимизация барьерных прослоек при диффузионной сварке элементов конструкции ГТД из разнородных материалов

Давно установлено, что при любых способах сварки давлением прочность и пластичность соединений значительно снижаются, если в переходной зоне формируются хрупкие прослойки толщиной более 3 ... 5 мкм. Это хорошо заметно при сварке металлов имеющих ограниченную растворимость, к которым относятся также высоколегированные сплавы и стали. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что низкая прочность сварных соединений, выполненных сваркой давлением вызвана охрупчиванием в результате взаимного проникновения атомов одного металла в другой.

В современном двигателестроении массовое распространение получили детали и узлы, которые изготавливаются методом диффузионной сварки в вакууме из жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ-12У, ЖС6К со сталями 40, 45, 45Х. Эти сплавы и стали в различных сочетаниях используются при соединении рабочих колес с валами турбин малоразмерных ГТД и турбоагрегатов.

Первые исследования и эксперименты по диффузионной сварке в вакууме при создании сварных соединений разнородных материалов ВЖЛ-12У + ЭИ-961 и ЖС6К + 45Х показали, что прочность таких сварных соединений минимальна. При проведении микрометаллографии этих сварных установили, что они имеют в своей структуре переходные зоны довольногосложногостроения, шириной от 12 до 15 мкм. Микроструктура соединения ВЖЛ-12У + ЭИ-961 показана на рисунке 10. Микротвердость в переходных зонах выше микротвердости основных материалов.



x500

Рисунок 10 – Микроструктура переходной зоны сварного соединения жаропрочного сплава ВЖЛ-12У со сталью ЭИ-961 (без прослойки)

Возникновение хрупкой фазы околошовных зонах сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов присоединении со сталями, скорее всего можно объяснить наличием в составе сплавов карбидообразующих легирующих элементов, таких как Cr, W, Ti и диффузией С из сталей. В пользу этого предположения говорит и работа [27], в которой авторы описывают проведение радиографического исследования сварного соединения АНВ-300 + сталь 40Х, выполненного диффузионной сваркой в вакууме, и устанавливают, что причиной низкой прочности сварного соединения является объемная сетка карбидов Ti, W и Cr в сплаве АНВ-300 вблизи зоны контакта со сталью 40Х. Данное утверждение хорошо просматривается на рисунке 11.

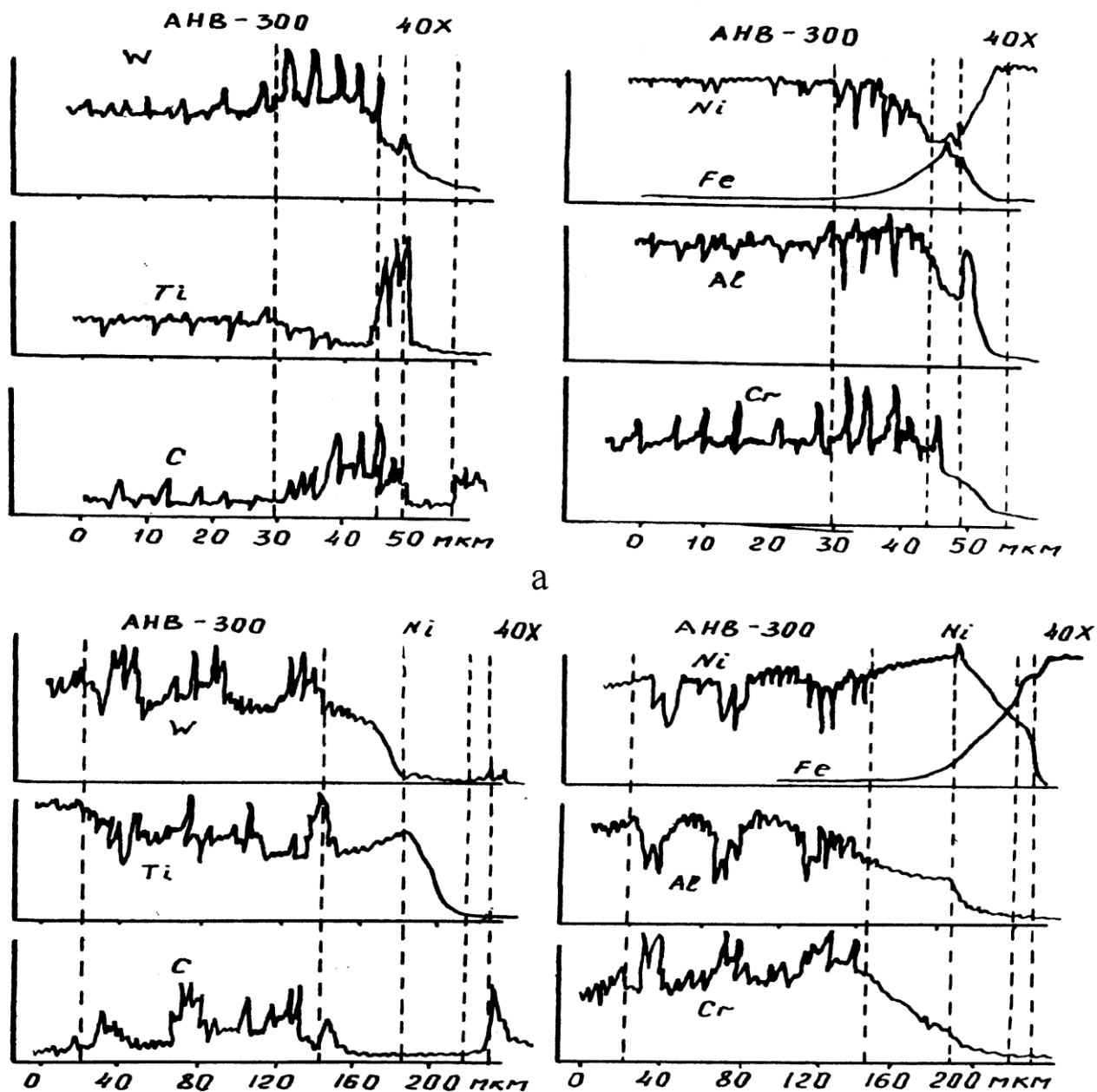
Одним из часто используемых и наиболее «продвинутым» способом устранения вышеописанного явления (появление хрупких фаз) при

диффузионной сварке в вакууме, является применением третьих металлов, которые вводятся в «стык» для выполнения барьерных функций.

Полностью всем требованиям, которые предъявляются к материалам «барьерных» прослоек, отвечает такой химический элемент как Ni. Он является основой практически всех жаропрочных сплавов, в том числе таких как ВЖЛ-12У и ЖС6К и может неограниченно растворяться в Fe – основным элементом всех сталей.

Огромное значение и влияние на прочное сварное соединение и дальнейшую работоспособность, выполненных диффузионной сваркой в вакууме будет оказывать толщина «барьерной» прослойки. Выбор и оптимизация толщин «барьерных» прослоек проводится с учетом температуры сварки, где за оптимальную температуру диффузионной сварки в вакууме принимают ту, при которой КТП свариваемых материалов достигает max величины. Её можно рассчитать эмпирически по формулам, либо получить экспериментально.

Из-за того, что отсутствуют необходимые данные для аналитической оценки оптимальной температуры, при диффузионной сварке в вакууме и физико-механические свойства поверхностных слоев соединяемых материалов при нагреве их в вакууме, было решено «идти вторым путем».



а – без прослоя, б – с никелевым прослоем

Рисунок 11 – Распределение легирующих элементов в зоне соединения сплава АНВ-300 со сталью 45Х

Температуры диффузионной сварки жаропрочных сплавов со сталями выбирались с учетом температурных зависимостей КТП свариваемых материалов, т.е. жаропрочных никелевых сплавов с никелем и сталей с никелем, полученных путем испытаний на трение в условиях, соответствующих условиям диффузионной сварки [6]. Испытание на трение производилось с помощью трибометра. Применялись образцы плоской

формы. Время изотермической выдержки, перед нагружением модельных пар трения составляло 300 с. Образцы (большие) изготавливались из жаропрочных сплавов ЖС6К и ВЖЛ-12У и сталей ЭИ-961 и 45Х; контрообразцы – из конструкционной среднеуглеродистой стали 45. К контактным поверхностям образцов по методу диффузионной сварки в вакууме приваривалась никелевая фольга толщиной 0,1 мм. Контактные поверхности больших образцов обрабатывались так же, как и соединяемые поверхности сварных образцов чистовым шлифованием до $Ra=0,5 - 0,4$ мкм.

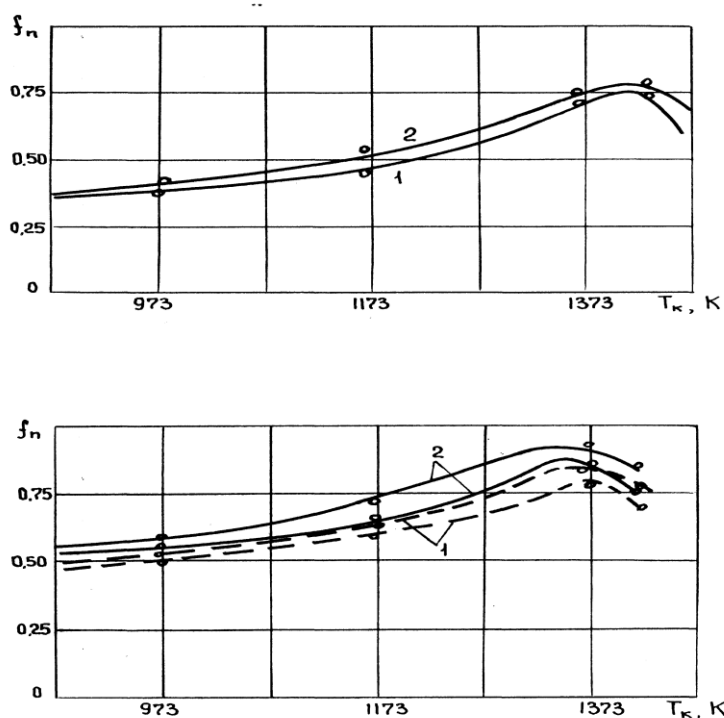
Испытание на трение указанных пар материалов проводилось в интервале температур 873 – 1423 К. Величина нормальной нагрузки (P) варьировалась на двух уровнях: 500 и 1000 Н. Эти усилия обуславливали в контактах модельных пар трения нормальные напряжения, средние величины которых, с учетом номинальной площади контакта (около 1 см^2), приближение составляли соответственно 5 и 10 МПа.

Температурные зависимости коэффициентов трения покоя (f_n) никеля в паре с жаропрочными сплавами ЖС6К и ВЖЛ-12У практически идентичны (кривые 1 и 2 на рисунке 12 – а совпадают), а в сочетании со сталями несколько различаются (рисунок 12 – б). При величине контактного давления (P), равной 5 МПа, трение покоя f_n рассматриваемых сочетаний материалов достигают максимальной величины приблизительно при следующих температурах:

- жаропрочные сплавы (ЖС6К, ВЖЛ-12У) + Ni – 1373 - 1445 К;
- сталь ЭИ961 + Ni – 1343 - 1403 К;
- сталь 45Х + Ni – 1313 - 1363 К.

Увеличение давления до 10 МПа приводит к росту трения покоя f_n всех испытанных сочетаний материалов и не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на положение экстремумов на оси температур. Согласно выводам данной работы указанные интервалы температур являются наиболее благоприятными для формирования соединений соответствующих пар материалов при диффузионной сварке.

Изучая графики можно отметить также, что с возрастанием контактного давления (P) изменяется вид кривых: «пики» на них становятся менее остроконечными, вследствие чего нижние границы указанных выше интервалов отодвигаются в сторону более низких температур. В рамках развиваемого положения о роли контактного трения при диффузионной сварке разнородных материалов, этот факт говорит о том, что температура процесса может быть несколько понижена путем увеличения сварочного давления. Этот вывод не противоречит хорошо известной эмпирической зависимости между температурой и давлением при термомеханических способах сварки [6, 7].



а) сочетание (ЖС6К; ВЖЛ-12У) – никель: 1 – $P=5$ МПа; 2 – $P=10$ МПа;

б) ст. 45 + никель + ЭИ-961:1 – $P=5$ МПа; 2 – $P=10$ МПа

Рисунок 12 – Зависимость коэффициента трения покоя (f_n) материалов сварного соединения «жаропрочный сплав + никель + сталь» от температуры (T_κ) и контактного давления (P)

Сравнивая интервалы «благоприятных температур» для сочетания жаропрочный сплав + Ni с рекомендуемыми в литературе [6] температурами диффузионной сварки сплавов на основе Ni (1323 - 1353 К) можно констатировать их хорошее совпадение.

Поскольку найденные диапазоны «благоприятных температур» для жаропрочных сплавов и сталей в паре с Ni близко расположены и перекрываются, можно предположить, что наиболее вероятными оптимальными температурами диффузионной сварки рассматриваемых композиций будут температуры, заключенные в следующих интервалах: ВЖЛ-12У + Ni + ЭИ-961 от 1373 до 1403 К; ЖС6К + Ni + сталь 45Х от 1353 до 1333 К.

Полученный таким образом диапазон температур, а также установленная взаимосвязь ширины интервала «благоприятных» температур с величиной контактного давления были взяты за основу при определении оптимальных режимов диффузионной сварки композиции ЖС6К + Ni + 45Х.

В серии специально поставленных экспериментов показано, что при температуре сварки 1393 К (верхняя граница), сварочном давлении 10 МПа и времени сварки 30 мин, никелевая прослойка толщиной 100 мкм непроницаема для сквозной диффузии карбидообразующих элементов соединяемых материалов (рисунок 13). Механические испытания на растяжение позволили оценить прочность соединения, которая составила 0,8 – 0,9 от прочности основного металла [26].

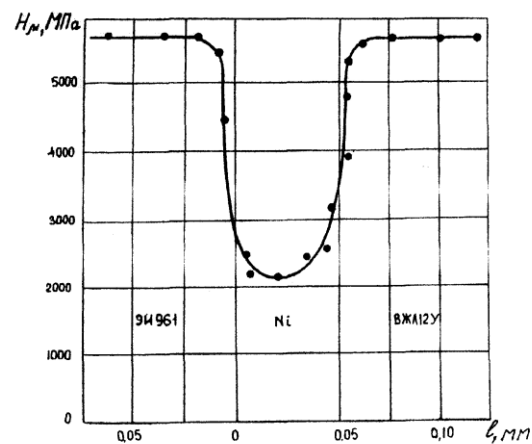
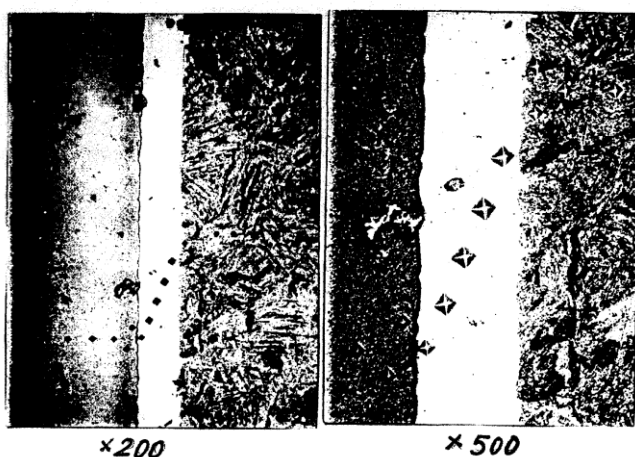


Рисунок 13 – Структура (а) и микротвердость (б) переходной зоны оединения ВЖЛ-12У – ЭИ-961 через прослойку никеля

Выбор состава «барьерных» прослоек и оценка их оптимальных режимов в соединения с основными металлами и/или сплавами лишь одна из задач, которая решается при разработки технологии диффузионной сварки в вакууме. Другая, очень важная задача – это определение необходимой толщины «барьерной» прослойки. Так вот при выборе оптимальной толщины «барьерной» прослойки руководствуются следующими соображениями:

- 1) она должна гарантировать образование сварных соединений без присутствия хрупких фаз, то есть выполнять барьерные функции.
- 2) она не должна снижать механические свойства соединения в целом.

7 Разработка математической модели для теоретической оценки взаимной диффузии в разнородных соединениях с прослойкой

Математическое моделирование позволяет спрогнозировать глубину взаимной диффузии элементов соединяемых материалов в условиях диффузионной сварки в вакууме, термообработки, а также при эксплуатации узлов в высоких температурах, а также оценить толщину «барьерной» прослойки с точки зрения ее барьерных свойств при производстве и во время эксплуатации сварных соединений, полученных диффузионной сваркой в вакууме.

Для теоретической оценки процесса выберем систему ЖС6К-Ni-45Х и воспользуемся физической моделью массопереноса в пластически деформированных материалах. С математической точки зрения сформулируем задачу следующим образом. Рассмотрим одномерную систему, состоящую из двух различных материалов и прослойки, состоящей из третьего материала с толщиной h между ними. Исследование взаимной диффузии материалов будем производить в условиях пластической деформации, которая происходит во всех материалах системы и задается таблицами относительных деформаций. Для описания процессов будем использовать аппарат теории диффузии в двухкомпонентных сплавах, в связи с тем, что компоненты материалов пространственно не перекрываются друг с другом в материале прослойки.

Введем следующие обозначения:

1, 2, 3 - номер компонента; c_1^0 , c_{12}^0 , c_{13}^0 - начальный уровень концентрации компонента 1 в компонентах 2 и 3 соответственно; 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-ем, 3-го в 1-м; $\varepsilon_1 = \Delta l_1/l_{01}$, $\varepsilon_2 = \Delta l_2/l_{02}$, $\varepsilon_3 = \Delta l_3/l_{03}$ - относительные деформации компонентов.

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

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c_1}{\partial x} \right) \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t < t_0 \quad (7.1)$$

при следующих условиях

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

$$c_1(x, t)_{x \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0, \quad 0 < t < t_0. \quad (7.2)$$

В соответствии с (7.1 – 7.2) коэффициенты диффузии (КД) определяются следующими 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

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

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

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

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

$D_{01}=D_{01}^* \exp(-Q_1^*/RT)$, $D_{02}=D_{02}^* \exp(-Q_2^*/RT)$ и $D_{03}=D_{03}^* \exp(-Q_3^*/RT)$ – коэффициенты самодиффузии компонентов 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, k_3 – постоянные, характеризующие пластические деформационные свойства материалов, равные

$$k_1 = \frac{\eta_{1v} \tau_1}{\tau_{0v1}}, \quad k_2 = \frac{\eta_{2v} \tau_2}{\tau_{0v2}}, \quad k_3 = \frac{\eta_{3v} \tau_3}{\tau_{0v3}},$$

$$\eta_{0v1} = \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) \quad \eta_{0v2} = \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \quad \eta_{0v3} = \exp\left(-\frac{Q_3}{RT}\right) \text{ равновесные}$$

концентрации вакансий материалов,

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

$$\eta_{jv} = a_j + b_j \varepsilon_j^{n_j}, \quad (j=1,2,3), \quad (7.3)$$

где a_j, b_j, n_j – эмпирические константы эксперимента; τ_1, τ_2 и τ_3 – время жизни вакансий в соответствующих компонентах.

Для решения поставленной задачи используем численный метод решения. При численном решении (1.2), (1.3), (1.4) бесконечная область изменения переменной x заменяется конечным интервалом $[-x_0, x_0]$, где

$$x_0 = \frac{h}{2} + l_D \quad \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} = 0, \quad x = x_0, \quad 0 \leq t \leq t_0$$

Величина l_D является условной шириной диффузионной зоны, которая пропорциональна $\beta \cdot \sqrt{D \cdot t_0}$, где β – задаваемый параметр. При этом условия на бесконечности заменяются «мягкими» условиями при $x = \pm x_0$

Перейдем к безразмерным переменным

$$x' = \frac{x}{x_0}, t' = t_0, D' = \frac{D}{D_{01}^*} \quad (7.4)$$

Задачи (7.1), (7.2), (7.4) в безразмерных переменных примет вид (штрихи опущены):

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c_1}{\partial x} \right), \quad 1 < x < 1, 0 < t \leq 1, \quad (7.5)$$

$$c_1(x, 0) = \begin{cases} c_{12}^0, & -1 \leq x \leq -\frac{h}{2}, \\ c_1^0, & |x| \leq \frac{\bar{h}}{2}, \\ c_{13}^0, & \frac{h}{2} \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (7.6)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = 0, \quad x = \pm 1, 0 < t \leq 1. \quad (7.7)$$

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 начальный момент времени имеет разрыв при $x = \pm \frac{h}{2}$, 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:

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

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

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

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

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

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

Задача (7.5), (7.7) аппроксимируется неявной разностной схемой (3):

$$\frac{(c_1)_i^{n+1} - (c_1)_i^n}{\tau^n} = \alpha \frac{2}{h_{i-1} + h_i} (D_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{(c_1)_{i+1}^{n+1} - (c_1)_i^{n+1}}{h_i} - D_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{(c_1)_i^{n+1} - (c_1)_{i-1}^{n+1}}{h_i}), \quad (7.8)$$

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

$$(c_1)_i^0 = \begin{cases} c_{12}^0, & -1 \leq i \leq i_1, \\ c_1^0, & i_1 \leq i \leq i_2, \\ c_{13}^0, & i_2 \leq i \leq i_{\max}, \end{cases} \quad (7.9)$$

$$\alpha D_{3/2}^{n+1} \frac{(c_1)_2^{n+1} - (c_1)_1^{n+1}}{\delta_1} - \frac{h_1}{2\tau^n} ((c_1)_1^{n+1} - (c_1)_1^n) = 0, \quad (7.10)$$

$$\alpha D_{\max-\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{(c_1)_{i_{\max}+1}^{n+1} - (c_1)_{i_{\max}}^{n+1}}{\delta_{i_{\max}+1}} - \frac{h_{i_{\max}+1}}{2\tau^n} ((c_1)_{i_{\max}+1}^{n+1} - (c_1)_{i_{\max}}^n) = 0 \quad (7.11)$$

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

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 - 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 (7.8) аппроксимирует уравнение (7.5) с первым порядком по x и t , соотношения (7.10), (7.11) аппроксимируют граничные условия (6.7) со вторым порядком.

Коэффициенты разностных уравнений содержат значения коэффициента диффузии D в узлах сетки, который определяется с помощью таблично заданных величин $\gamma_{12}, \gamma_{21}, \gamma_{13}, \gamma_{31}, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$. Эти величины приближенно заменяются интерполяционными кубическими сплайнами [28,

29], а значения величин $\frac{\partial \ln \gamma_{12}}{\partial \ln c_1}, \frac{\partial \ln \gamma_{21}}{\partial \ln(1-c_1)}, \frac{\partial \ln \gamma_{13}}{\partial \ln c_1}, \frac{\partial \ln \gamma_{31}}{\partial \ln(1-c_1)}, \dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$,

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

Алгоритм решения разностной задачи (7.8) - (7.11) заключается в следующем.

В начале расчета вычислим постоянные задачи, затем построим разностную сетку по x , вычислим шаги сетки и вспомогательные величины. Затем зададим начальные условия (7.9). Для нахождения приближенного решения на каждом шаге по времени решается система нелинейных алгебраических уравнений (7.8), (7.10), (7.11) относительно неизвестных $(c_i)_1^{n+1}, (c_i)_2^{n+1}, (c_i)_{\max}^{n+1}$. Для решения этой системы используем метод простой итерации, т.е. 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 берем уже известные значения решения на предыдущем шаге. Получающаяся в итоге на каждой итерации линейная система уравнений решается методом прогонки [28, 29]. Итерации проводятся до тех пор, пока величина k – номер итерации не будет достаточно мала.

$$\max \left| \frac{(c_i^{n+1})^{k+1} - c_i^{n+1})^k}{(c_i^{n+1})^{k+1}} \right|, \text{ где } 1 \leq i \leq i_{\max} \quad (7.12)$$

Расчет всей задачи заканчивается при достижении конечного момента времени. Для реализации математической модели диффузии в одномерной системе из различных компонентов при наличии прослойки между компонентами из другого материала использовались САЕ-программы, основанные на численной методике и алгоритме, описанной выше, и предназначенные для проведения вычислительных экспериментов при моделировании процесса диффузии.

Моделирование с использованием САЕ-программ начиналось с определения физических параметров моделируемого процесса диффузии, последующие этапы – использование вычислительной части, обработка результатов счета и графической визуализации. Выходной информацией вычислительной части – распределение концентрации c_1 компонента 1 в системе в момент времени t_0 в графической и табличной форме. Программы позволяют смоделировать, также многовариантный счет при различных значениях параметров, определяющих физический процесс, причем информация выводится в виде нескольких графиков, помещаемых на одном рисунке.

При работе с САЕ-программами использовался модульный принцип, для того чтобы каждый модуль программы был предназначен для реализации

различных функций. Все модули делились по назначению на следующие группы:

- 1) Модуль ввода информации;
- 2) Вычислительный модуль, реализующий численное решение задачи;
- 3) Модуль для вывода результатов в графическом и табличном видах;
- 4) Вспомогательный модуль для организации диалога с пользователем.

Связь между отдельными модулями осуществлялась через отдельные блоки включаю в себя описание массивов; вызов модулей для ввода исходной информации; вызов модуля, управляющего счетной частью; вызов модуля, управляющего обработкой и выводом результатов; вызовы модулей, для диалога с пользователем и др.

Математическое моделирование процессов диффузионного соединения было выполнено при помощи САЕ-программ для соединения 45Х-ЖС6К через никелевую прослойку

Ni и Fe – элементы, которые входят в состав многих технических сплавов. Для этих металлов имеется большое количество данных по их физико-механическим свойствам. В связи с этим Ni и Fe были выбраны в качестве модельных элементов. Основные значения констант и характеристик этих элементов заданы изначально в программы, в расчетной части использованы значения физических величин реальных сплавов 45Х, ЖС6К, если таковые отсутствовали, то подбирались близкие к ним по составу. Перечислим основные значения, использованные в расчетах:

- температурная зависимость коэффициентов самодиффузии Ni принималась равной $D_{Ni}^*(T) = 1.27 \exp(-66\ 800 \text{ кал/моль}/(RT)) \text{ см}^2/\text{с}$ (5), Fe– $D_{Fe}^*(T) = 1.05 \exp(-67\ 800 \text{ кал/моль}/(RT)) \text{ см}^2/\text{с}$ (193); в сплаве Fe – 4,5%Cr (в стали 45Х $\approx 1\%Cr$) коэффициент самодиффузии Fe 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 Ni в γ -железе принималась равной $D_{Ni^* \rightarrow Fe} = 1.25 \exp(-67700 \text{ кал/моль}/(RT)) \text{ см}^2/\text{с}$

- сведения о коэффициентах активности Ni и Fe заимствованы из работы [30];

- данные по деформированию образцов из Fe и Ni определены экспериментально;

- длина образцов 30,0 мм;

- временной интервал между отдельными измерениями величины абсолютной деформации образцов – 60 сек.;

- температура процесса диффузионного соединения Ni и Fe равна соответственно 1393K и 1423K;

- энергия образования вакансий в Ni принималась равной для Ni 39190 кал/моль (1,7 eV), для γ -железа 39190 кал/моль (1,7 eV) и для сплава 45X – 26000 кал/моль (1,13 eV) (7);

- время жизни неравновесных вакансий принималось равным от 10^3 с до 10^7 с (7); оценка τ производилась по формуле $\tau \cong L_0^2/D_v$, 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 виде таблицы на рисунке 14. Параметры деформирования определялись экспериментальным путем.

Для приготовления образцов из 45X и ЖС6К, вырезались заготовки в виде цилиндров диаметром 12 мм и длиной 30 мм, следующего химического состава:

45X (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%).

Сварку проводили на следующих режимах: температура - 1393К и 1723, время сварки - 30 мин, давление сжатия - 12 МПа.

Наложение давления в процессе сварки приводило 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 , регистрировалась индикатором перемещения в течении всего промежутка времени сварки. Для выяснения характера деформирования для каждого образца строили зависимость абсолютной деформации Δl 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 рисунке 15.

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 распределением концентрации соответствующему решению диффузионного уравнения для взаимной

диффузии исследуемых элементов (Ni, V, Fe) при $\tau_{CB}=1800$ с и $T_{CB} = 1393 - 1423$ К без деформирования.

Номер параметра	Значение параметра	Примечания
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	$a_3=1,8e-7; b_3=1,8e-5; n_3=1$	$\varepsilon \approx 5-3 \eta_i \leq 1,5 \eta_{o\eta}$
13	1e4	$L_0 \sim 1$ МКМ
14	1e7	$L_0 \sim 50$ МКМ
15	1e5	$L_0 \sim 10$ МКМ
16	1373,1403	$^{\circ}K$
17	50	h , МКМ
18	1,0	c°_1
19	0,0	c°_{12}
20	0,75	c°_{13} (ЖС6К)
21	18,0	t_0
22	10	l_0
23	10	l_0
24	10	l_0
25	1	Δt , мин
26	γ	3
27	$\varepsilon_{Ni}^{(t)}$	13
28	$\varepsilon_{45X}^{(t)}$	13+эксп
29	$\varepsilon_{ЖС6К}^{(t)}$	Эксп.(0,0)

Рисунок 14 - Значения параметров численного моделирования диффузионной сварки 45X-Ni-ЖС6К

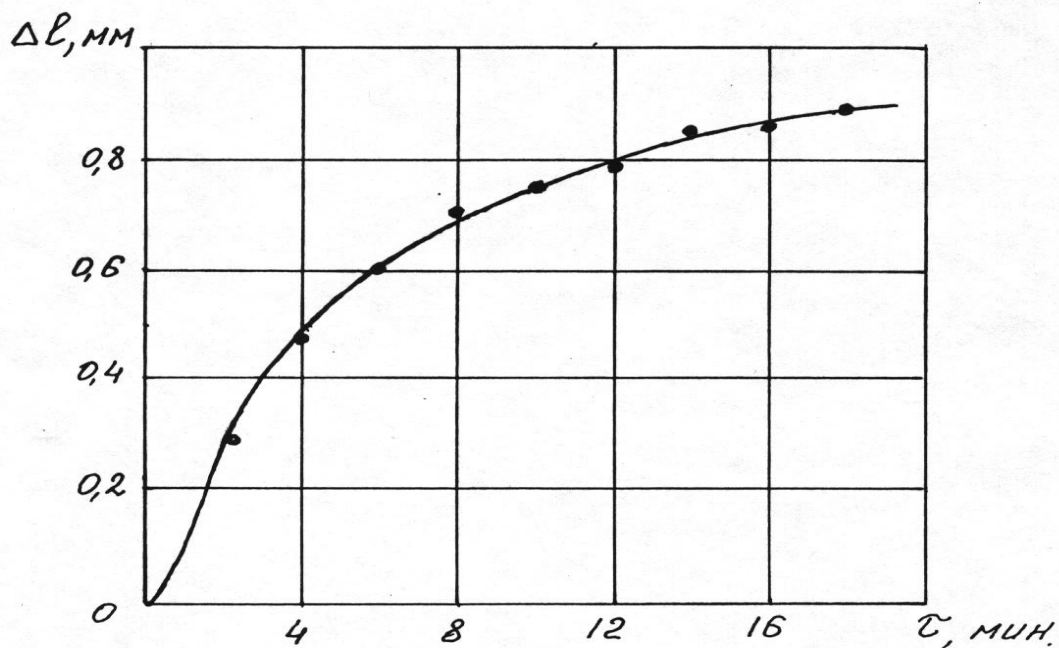


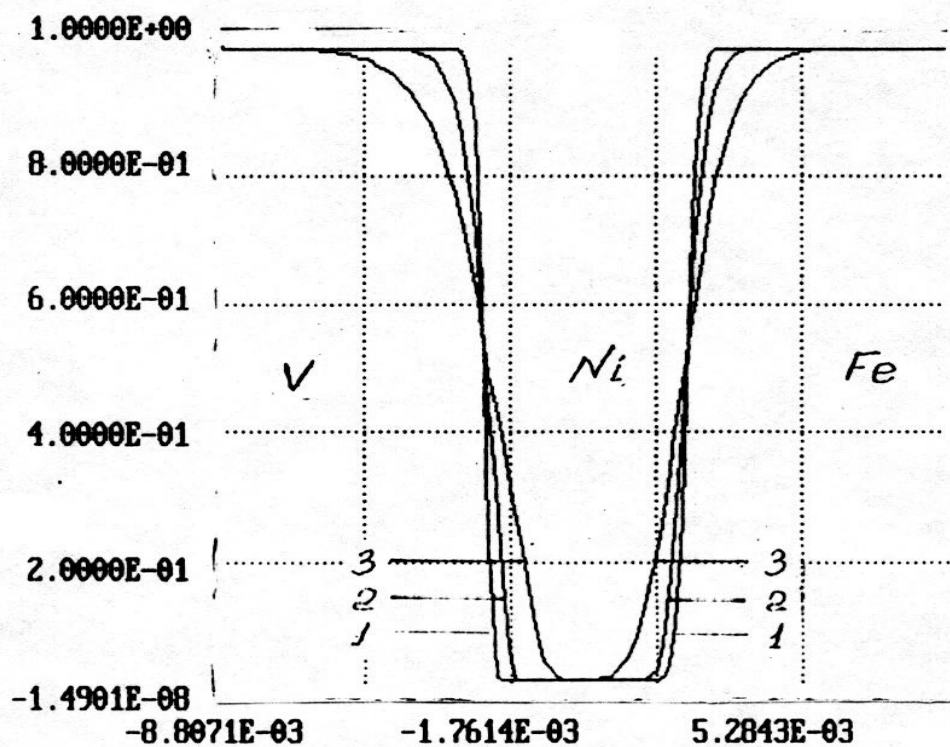
Рисунок 15 – Характерная зависимость абсолютной деформации зоны соединения от времени

На рисунках 16 и 17 приведены концентрационные кривые распределения исследуемых элементов в зоне диффузионного соединения. Как видно из рисунка 16, глубина взаимного проникновения Ni и Fe увеличивается с ростом температуры, что позволяет рекомендовать сохранить стандартную температуру диффузионной сварки в ее технологии.

Результаты численного моделирования показывают, что оптимальным профилем концентрации Ni в диффузионном соединении является профиль, соответствующий стандартной технологии диффузионной сварки. Поэтому для отработки режимов сварки соединений сплавов 45X-Ni-ЖС6К следует рекомендовать образцы, сваренные по существующей технологии диффузионной сварки.

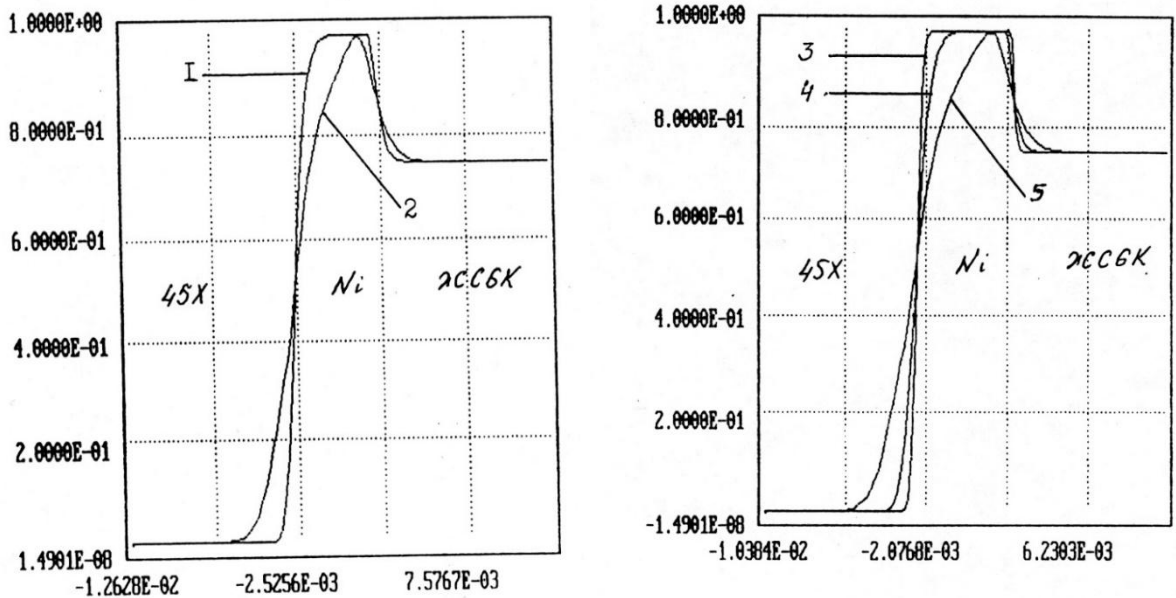
Как показывает численное моделирование зоны взаимной диффузии достаточны малы и не превышают 10 мкм, т.е. теоретически показано, что хорошо согласуется с данными других работ [31]. Таким образом,

теоретически показано, что для сохранения «барьерных» свойств толщина прослойки 0,05 – 0,1 мм вполне достаточна.



1 - $P_{CB} = 0$, 2 - $P_{CB} = 6$ МПа, 3 - $P_{CB} = 15$ МПа

Рисунок 16 – Концентрационное распределение W и Fe в прослойке Ni в зависимости от сварочного давления (P_{CB})



$T_{св} = 1393\text{K}$ (а) и $T_{св} = 1423\text{K}$ (б)

1 и 3 – $P_{св} = 0$, 2 и 5 $P_{св} = 10$ МПа, 4 – $P_{св} = 5$ МПа

Рисунок 17 – Концентрационное распределение Ni в зоне диффузионного взаимодействия 45X-Ni-ЖСБК

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 [32]. 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, ударных нагрузках в условиях эксплуатации позволяет снизить уровень напряженного состояния в сварном соединении. Изменение механических свойств чистого никеля в зависимости от температуры представлено на рисунке 18.

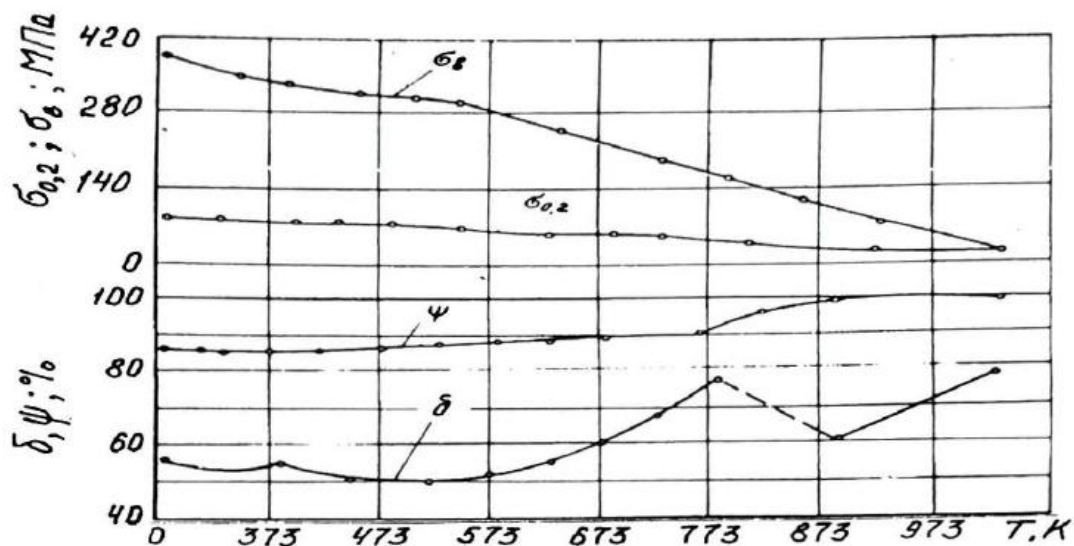


Рисунок 18 – Механические свойства Ni в зависимости от температуры

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

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 [33, 34].

Свойства соединений с мягкой прослойкой существенно зависят от относительной толщины мягкой прослойки и соотношения прочностных

свойств металла прослойки и прилегающих более твердых металлов. При растяжении развитие пластических деформаций мягкого металла прослойки сдерживается вблизи граничных поверхностей более прочным материалом. По мере сближения граничных поверхностей (уменьшения χ) 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 d . При этом естественно для любых величин χ нижней границей механических свойств будут свойства мягкого материала – прослойки, а верхней границей – прочностные характеристики основного «твердого» материала.

Существующая теоретическая оценка прочности составных образцов [33] приводит к зависимости, дающей наилучшее совпадение расчетных данных с экспериментальными:

$$\sigma_B = \sigma_B^{\text{пр}} K_p, \quad (7.13)$$

где $\sigma_B^{\text{пр}}$ – предел прочности «мягкого» материала прослойки,

K_p – коэффициент контактного упрочнения.

Коэффициент контактного упрочнения является согласно экспериментальным данным [33] функцией не только относительной толщины «мягкой» прослойки, но и степени механической неоднородности соединения, определяемой коэффициентом

$$K_B = \frac{\sigma_B^M}{\sigma_B^{\text{пр}}}, \quad (7.14)$$

где $\sigma_B^{\text{пр}}$ – предел прочности менее прочного из соединяемых материалов.

В случае осесимметричной деформации действительный коэффициент контактного упрочнения, как установлено [35, 54].

$$K_p = \frac{\pi}{4} + \frac{K_{\%} - \frac{\pi}{4}}{3 \left(3 K_{\%} - \frac{\pi}{4} \chi + \frac{\exp c \chi_M - \chi - 1}{\exp c \chi_M - 1} \right)} \quad (7.15)$$

здесь $\chi_M = 0,895$ относительная толщина «мягкой» прослойки, при которой начинает проявляться эффект контактного упрочнения;

C – параметр, определяемый интенсивностью вовлечения «твердого» металла в пластическое деформирование, зависящий от K_B и от способности металла к упрочнению в ходе его деформирования.

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

$$\sigma_{\%} = \sigma_{\%}^M \frac{\pi}{4} + \frac{K_{\%} - \frac{\pi}{4}}{1 + 3 \left(3 K_{\%} - \frac{\pi}{4} \chi \right)} \quad (7.16)$$

Верхней границей реальной прочности соответствует расчет при экстремальном значении $C=C_k=3 \left(3 K_{\%} - \frac{\pi}{4} \right)$. Для изучаемого сочетания верхняя граница реальной прочности равна границей теоретической прочности σ_B^T , то есть является и верхней границей теоретической прочности.

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 293K $\sigma_{\text{в}}^{\text{T}}=900$ МПа, $\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}=400$ МПа, $K_{\text{в}} = 2,25$, а $\chi_{\text{кр}} = 0,135$. При этом критическое значение относительной толщины прослойки равно $h = 0,81$ 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 $\sigma_{\text{в}}^{\text{M}}$ в твердом металле происходит быстрее нарастание деформаций с нагрузкой, что ослабляет сдерживание им деформаций прослойки.

Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствуют 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 полученных 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.

8 Разработка технологии диффузионного соединения через расплавляющиеся прослойки элементов конструкции ГТД

Из выше сказанного следует, что применение технологии диффузионной сварки в вакууме разнородных материалов является основным, а иногда чуть ли не единственным способом для получения качественных сварных соединений деталей газотурбинных двигателей, и цель работы – исследования процесса диффузионной сварки в вакууме через расплавляющиеся прослойки с получением качества сварного соединения, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям, предъявляемым к газотурбинным двигателям.

Практическая часть работы проводилась на производственной базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), а точнее в его структурном подразделении научно-исследовательском институте технологий и проблем качества (НИИ-204), который расположен по адресу: г. Самара, на пересечении ул. Лукачёва, 37 и ул. Гая, 59. НИИ-204 оснащен всем необходимым современным и уникальным оборудованием.



Рисунок 19 – Вид здания в котором располагается НИИ-204

8.1 Применяемое оборудование и приборы

Помещение, где установлена машина для диффузионной сварки МДВ-301 94 оснащено системой управления включения/выключения как самой машины, так и её отдельных блоков (индукционный нагрев, система гидравлического охлаждения, система подачи давления и др.). Хотя при диффузионной сварке в вакууме выделение вредных примесей минимально, но в исполнении «Правил по охране труда при выполнении электросварочных и газосварочных работ», утвержденных приказом № 1101 от 23 декабря 2014 года и так как будут использоваться химические элементы для подготовки образцов под сварку (обезжиривание, травление, нанесение активирующих прослоек и др.) помещение оборудовано принудительной приточно-вытяжной вентиляцией.



Рисунок 20 – Внешний вид машины для диффузионной сварки МДВ-301 94

При работе с машиной для диффузионной сварки весь персонал обеспечивается средствами индивидуальной защиты в соответствии с типовыми нормами и Межотраслевыми правилами обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты. Принципиальная схема машины изображена на рисунке 21 [48].

Данная машина позволяет осуществлять диффузионную сварку в вакууме любых материалов, имеющих металлическую основу, а также ферриты, кварц, стекло, керамику, графит, сапфир; металлокерамику, пористые и композитные материалы, не нарушая при этом их текстуры и не ухудшая их свойств; разнородных металлических сплавов, которые имеют склонность к образованию хрупких фаз, а также такие тугоплавких металлов, как тантал, ниобий, вольфрам и др.; металлических изделий с неметаллическими, например сталь и графит, стекло и медь.

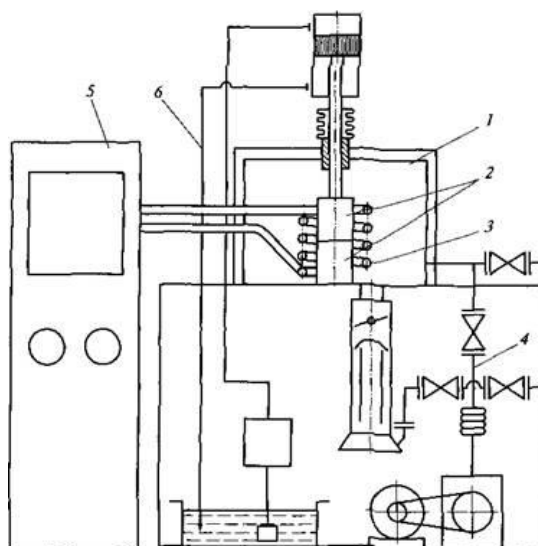


Рисунок 21 – Принципиальная схема машины для диффузионной сварки МДВ-301 94

Детали – 2, предназначенные для сварки помещают в вакуумную камеру – 1, где создается её разряжение при помощи вакуумной системы – 3. Нагрев осуществляется высокочастотным индуктором – 4 от высокочастотного генератора – 5. Сжимающее усилие на свариваемые детали передается от гидравлической системы – 6.

Основные технические характеристики машина для диффузионной сварки МДВ-301 94 приведены в таблице 1 [49].

Для контроля глубины вакуума применялись вакуумметры ВИТ-2П. Величину сварочного усилия контролировали по показаниям образцовых манометров, регистрирующих давление в гидросистемах сварочных установок.

Температура нагрева свариваемых деталей измерялась с помощью прикрепленных (при помощи зачеканивания в предварительно просверленные в деталях отверстия диаметром 1,2...1,5 мм на глубину 1,5...2,0 мм) к ним хромель-алюмелевых термопар (диаметром 0,5 мм) и потенциометров КСП-4.

Таблица 1 – Технические характеристики МДВ-301 94

Номинальное первичное напряжение трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц	В	380
Глубина вакуума в рабочей камере	Па (мм рт.ст)	$6,7 \times 10^{-3} (5 \times 10^{-5})$
Температура свариваемых деталей, не более	К ($^{\circ}\text{C}$)	1773(1500)
Способ нагрева	-	индукционный
Потребляемая мощность, не более	кВт	100
Номинальное усилие сжатия деталей	кН	30
Количество вакуумных камер	-	1
Количество сварочных позиций в камере	-	1
Расход охлаждающей воды, не более	м ³ /ч	10

В связи с тем, что процесс диффузионной сварки в вакууме на данной машине полностью автоматизирован, для получения качественного соединения необходимо придерживаться разработанного технологического процесса сварки и следить за работой машины по приборам и датчикам, чтобы исключить сбои в системе автоматики.

8.2 Технологическая оснастка для сварки узлов

Для сборки свариваемых образцов используется технологическая оснастка, позволяющая повысить производительность процесса сварки, разработанная в НИИ-204.

Многообразие современных роторов турбин, применяемых, в газотурбинных двигателях и турбоагрегатах, приводит к тому, что из-за их конструктивных отличий, необходимо проектировать разнообразную

сварочную оснастку. Но в тоже время, вне зависимости от конструктивного исполнения, оснастка должна решать один и те, же задачи, а именно:

- 1) обеспечивать сборку свариваемых деталей с заданной точностью;
- 2) предоставлять возможность установки и фиксации деталей в вакуумных камерах сварочных установок дл диффузионной сварке в вакууме;
- 3) гарантировать равномерное распределение сварочных усилий по всей площади контакта свариваемых деталей;
- 4) обеспечить заданные значения температурного поля в свариваемых узлах.

Для нашей работы будем применять спроектированную сборочную оснастку для двух типов роторов турбин различной конструкции, а именно с валом сплошного сечения (рисунок 21 а) и с полым валом (рисунок 21 б).

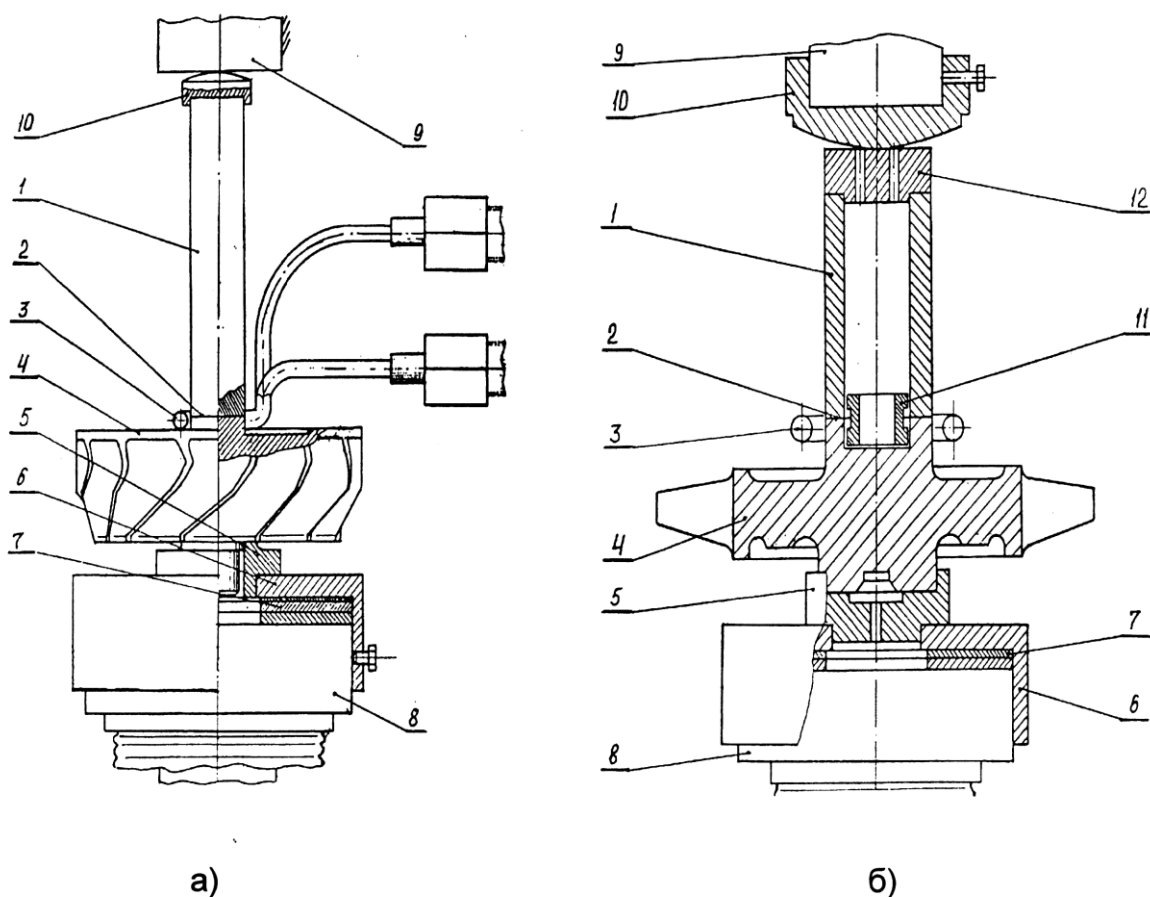
Колесо турбины – 4 (рисунок 21 а, б) смонтируем в вакуумной камере установки для диффузионной сварке в вакууме на столе штока силового привода – 8 с помощью установочных деталей опорной втулки - 5 и центрирующего стакана – 6, которые обеспечат соосность со штоком – 8 и индуктором – 3 и размещение свариваемого стыка в рабочей зоне высокочастотного индуктора – 3.

Вал ротора – 1 установим на свариваемый торец колеса ротора – 4 через «барьерную» расплавляющуюся Ni прокладку – 2;. Центровка вала ротора относительно свариваемого торца колеса – 4 проконтролируем визуально-измерительным методом. Для передачи равномерного усилия сжатия на свариваемые детали, осуществим при помощи надетого на вал ротора – 1 сферического наконечника – 10.

Положение свариваемых деталей относительно индуктора регулируется путем изменения толщины пакета сменных прокладок – 7.

Другое конструктивное решение в сборочной оснастке применено для роторов турбин, у которых вал полый. При сборке деталей ротора используем технологическую центрирующую втулку – 11 (смотри рисунок

21 б). Она устанавливается по посадке с заданным зазором в отверстие вала – 1 и колеса – 4. Благодаря проточке, выполненной на ее боковой поверхности, при диффузионной сварке в вакууме будет обеспечено свободное формоизменение внутренней зоны соединения.



сплошного исполнения – а; полого исполнения – б

Рисунок 21 – Оснастка для диффузионной сварки в вакууме колес роторов турбин с валами

Вся сборочно-сварочная оснастка изготовлена из аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т, кроме технологической втулки, которая изготовлена из стали ЭИ-961. Данные материалы сохраняют в условиях диффузионной сварки в вакууме высокие механические показатели и не склонной к газовыделению при нагреве в вакууме.

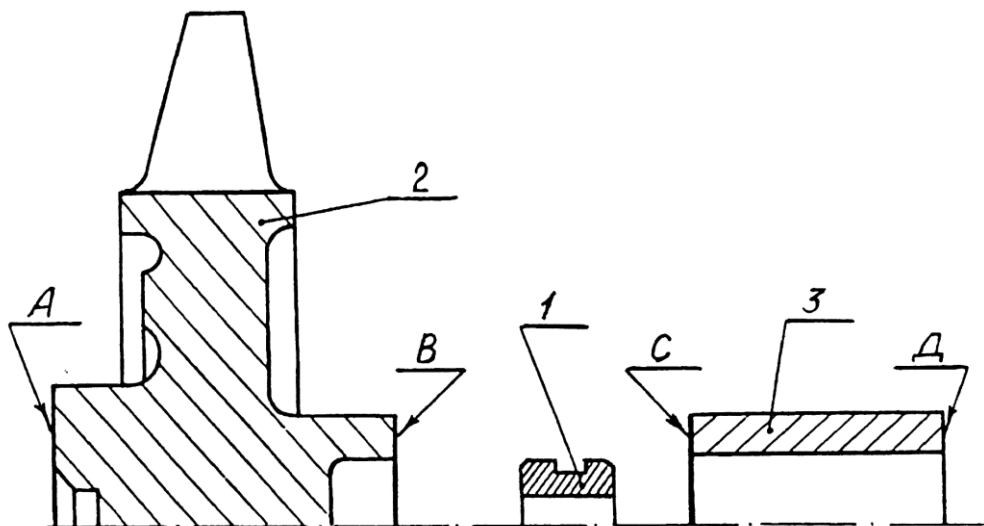
Для того чтобы, предупредить схватывание (спекание) поверхностей свариваемых деталей элементами сборочно-сборочной оснастки во все контакты между ними помещаем прокладки, изготовленные из слюды.

Для сварки деталей будем использовать специальную серию высокочастотных индукторов различного типа – цилиндрического, плоского и смешанного с одним, двумя и большим количеством витков, которая специально была разработана для этих целей в НИИ-204. Индукторы изготовлены из медных трубок диаметром от 6 до 12 мм и для предотвращения расплавления при сварке охлаждаются проточной водой, через систему охлаждения.

8.3 Подготовка соединяемых поверхностей деталей узлов к сварке

Все свариваемые поверхности деталей обрабатываем шлифованием. Ко всем поступающим на сварку, после механической обработки, деталям предъявляется ряд технических условий по форме и расположению их свариваемых и базовых поверхностей, чистоте обработке свариваемых поверхностей (смотри рисунок 22).

Непосредственно перед диффузионной сваркой соединяемые поверхности, расплавляющиеся «барьерные» прослойки и технологические центрующие втулки тщательно промываются в растворителях, для удаления с них различных загрязнений, таких как пыль, окисные и жирные пленки и другие. Предварительно детали и прокладки промываются в бензине марки Б-70в течении 10 – 15 минут, а затем в ацетоне. После чего все детали высушиваются на открытом воздухе, до полного удаления с них следов растворителя.



1. Неперпендикулярность поверхностей А, В, С, Д к оси симметрии свариваемых деталей не более 0,02 мм.
2. Отклонение от плоскостности стыкуемых поверхностей В, С не более 0,005 мм.
3. На поверхностях В, С не допускается риски, забоины, завал (притупление) кромок, прижоги, впадины.
4. Шероховатость соединяемых поверхностей В, С не более $Ra=0,63$.

Рисунок 22 – Технические требования к механической обработке свариваемых поверхностей деталей турбин: 1 - технологическая центрирующая втулка; 2 - рабочее колесо турбины; 3 - вал турбины

8.4 Сварка роторов турбин из жаропрочных сплавов и сталей

Технология диффузионной сварки в вакууме через расплавляющиеся «барьерные» прослойки турбин состоит из последовательно выполняемых операций:

- 1) сборка и установка деталей узла в вакуумной камере;
- 2) вакуумирования вакуумной камеры;
- 3) нагрева деталей в месте соединения до заданной температуры, с последующей изотермической выдержкой,

4) сварка и охлаждения узла до температуры, которая исключит окисления сварного соединения на воздухе.

Детали роторов турбин – рабочие колеса изготовленные из сплавов ВЖЛ-12У и ЖСК6, валы, изготовленные из сталей марок ЭИ961 и сталь 45Хсвариваются через прослойки Ni, которые вырезаны по форме свариваемых контактов из фольги. Толщина прослоек в узлах сочетания ВЖЛ-12У + ЭИ961 – 50 мкм, а в узлах из сочетания ЖСК6 + ст.45Х – 100 мкм.

Сварка узлов осуществляется с применением сборочно-сварочной, которую я описал выше.

Нагрев осуществляем с учетом их конструкции и свойств металлов и сплавов, из которых они изготовлены, а также особенностей нагрева токами высокой частоты, технических данных установки для диффузионной сварки в вакууме. Для нагрева необходимо подобрать конструкцию индуктора и определить его положения относительно свариваемых деталей узла, а также определить параметры нагрева. Из-за того, что свариваемые детали сильно различаются по своим тепло – физическим свойствам, и чтобы избежать высокого нагрева стального вала, а также активировать вакуумную очистку жаропрочных сплавов, которые более инертны с точки зрения диффузионного взаимодействия расположим индуктор с небольшим смещение в зону жаропрочного сплава. Применяются индуктор, который обеспечит возможность достижения заданной температуры с достаточно высокими скоростями при минимальной ширине нагреваемой зоны.

При монтаже сборочного приспособления, сместим в сторону индуктора на 1...2 мм колесо турбины, что даст нам не допущение локального перегрева.

В процессе сварки необходимо контролировать температуру нагрева обеих деталей, как колеса, так и валов. Термопары крепим на боковых поверхностях колес на расстоянии от 1,5 до 2,0 мм от «стыка». К валам термопары крепим зачеканкой, к колесам припаиваем.

Нагрев производим:

- 1) для валов полого исполнения со скоростью 60 – 80 К в минуту;
- 2) для валов сплошного сечения со скоростью 50 – 60 К в минуту.

При достижении заданной температуры выполняем изотермическую выдержку для выравнивания температуры по сечению сварного соединения.

Сварка узлов проводится на режимах указанных в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы диффузионной сварки роторов турбин из жаропрочных сплавов со сталями

Наименование параметра режима сварки	Свариваемое сочетание материалов	
	сплав ВЖЛ-12У +сталь ЭИ961	сплав ЖС6К +сталь 45Х
Глубина вакуума, Па	$10^{-2} \dots 10^{-3}$	$10^{-2} \dots 10^{-3}$
Температура сварки, К: - вал - рабочее колесо	1373 ± 10 (ЭИ961) 1403 ± 10 (ВЖЛ12У)	1383 ± 10 (45Х) 1403 ± 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 будем регистрировать величину 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.

8.5 Контроль качества сварного соединения

Для обеспечения качества сварных соединений, выполненных диффузионной сваркой в вакууме через расплавляющие прослойки, касаемо роторов турбин (да и других изделий), необходимо строго соблюдать технологический процесс сварки, осуществлять постоянный пооперационный контроль на всех стадиях изготовления узла, от входного контроля на основные материалы до окончательных приемо – сдаточных испытаний.

Для оценки качества наших сварных соединения роторов турбин будем применять следующие методы контроля:

- а) визуально-измерительный контроль;
- б) нагрузка сваренного узла контрольным растягивающим усилием;
- в) люминесцентный и капиллярный методы контроля;
- г) разрушающий контроль (статическое растяжение) и металлографические исследования.

При визуально-измерительном контроле выявляются наружные дефекты, которые могут быть в виде подрезов, несплавлений и трещин.

К косвенным свидетельствам удовлетворительного качества сварных соединений можно отнести также:

- а) достаточно широкую зону поверхности, прошедшей термовакуумную очистку;
- б) остаточную деформации в месте контакта участка стального вала.

На ступицах рабочих колес протяженность указанной зоны должна быть 5 – 7 мм, на валах 10 – 15 мм.

Величины относительной деформации сварных соединений должны составлять:

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

Также каждый узел прошел нагружение контрольным растягивающим усилием $P=180 - 220$ МПа, составляющим часть полной расчетной эксплуатационной нагрузки.

Люминесцентный и капиллярный контроль проводился до разрушающего контроля с целью выявления подповерхностных дефектов в сварных соединениях.

В результате проведения разрушающих видов контроля было установлено, что прочность сварных соединений превышает 700 МПа (более 80% от предела прочности основных материалов). Причем все образцы разрушились по основному материалу.

Макрометаллографические исследования показали отсутствие в шлифах, изготовленных из сварных соединений каких либо дефектов (трещины, непровары, несплошности отсутствуют).

9 Общие выводы по результатам работы

Современный уровень развития машиностроения требует непрерывного повышения качества металла, деталей, узлов, агрегатов и изделий и одним из путей в этом направлении является развитие представлений об остаточных напряжениях, методов их контроля, измерения, уменьшения и возможность управлять их величиной. В связи с этим необходимо комплексно рассмотреть данную проблему и учесть все стороны в таком явлении, как остаточные напряжения.

Уже научно доказано, что остаточные напряжения могут не только приводить к разрушению конструкций, но повышать их эксплуатационные характеристики. В связи с этим в современной науке все чаще и в большей степени проводятся исследования, которые направлены на получение изделий с заданным уровнем остаточных напряжений.

В передовых областях промышленности, а именно машиностроение, атомная энергетика, авио-космическое строение, военная промышленность, вопрос об остаточных напряжениях наиболее актуален. Потому что надежная работа сложной техники и механизмов, к которым можно отнести авиационные и ракетные двигатели, атомные реакторы, космические спутники и многие другие высокотехнологичные изделия, всегда будут на первом месте в списке высоких требований к оборудованию.

В данной работе предпринята попытка решения проблемы создания высокоэффективных деталей узлов конструкций газотурбинных двигателей и турбоагрегатов на базе разработки прогрессивной технологии диффузионного соединения разнородных сочетаний жаропрочных никелевых сплавов и сталей, позволившей свести к минимуму влияние остаточных напряжений, за счет:

- 1) применения специальной оснастки, конструкцией и расположением высокочастотных индукторов, величинами токов, давления в совокупности с

физическими, химическими и механическими свойствами свариваемых материалов;

2) математического моделирования контактного взаимодействия разнородных материалов при диффузионной сварке в вакууме через расплавляющие прослойки, позволившего получить результат отличающийся не более чем на 8% от результатов проведенных экспериментальных данных, что является приемлемым в большинстве практических случаев;

3) разработки технологии диффузионного соединения элементов ГТД и турбоагрегатов через расплавляющие прослойки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на интенсивное развитие диффузионной сварки, возникает много довольно сложных научно-технических задач, которые связаны со сдерживанием «вредного» влияния термомеханических процессов соединения на механические характеристики основных материалов, переходной зоны и самого сварного соединения, которое отвечало бы заданным техническим требованиям.

В первую очередь, это связано с уменьшением температурного воздействия на основные материалы и зону сварного соединения для устранения «вредных» химических соединений, например таких как прослойки интерметаллидов, карбидов и т.п., а также возникновение остаточных напряжений в сварных соединениях и конструкциях в целом. Иногда для сохранения формы и размеров элементов конструкции и/или изделия в целом нужно ограничить давления сжатия.

Выбор способа диффузионной сварки в вакууме с оптимизацией его основных параметров при решении вышеизложенных задач является вполне закономерным, так как он дает возможность прийти к положительному результату и получить высокотехнологичные соединения удовлетворяющие эксплуатационным требованиям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Старцев, Н.И., Виноградов, А.С., Новиков, Д.К. Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Электрон. учебное пособие / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Самара, 2013, 1 эл. опт. диск (CD-ROM) Систем. требования: ПК Pentium; Windows 98 или выше.
2. 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. Хролина. – М. : Машиностроение, 1989. – 368 с.
3. Найбороденко, Ю.С., Итин, В.И., Савицкий, К.В. Реакционная диффузия в металлокерамических материалах / Порошковая металлургия: Сб. научн. трудов №80. Пермь. 1970. – С. 133 – 139.
4. Стрелецкий, Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений / Н.С. Стрелецкий // М. : Стройиздат, 1947. – 151 с.
5. Иванова, В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. – М. : Наука, 1992. – 160 с.
6. Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред. Н.Ф. Казакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.
7. Казаков, Н.Ф. Диффузионная сварка материалов / Н.Ф. Казаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.
8. Муратов, Л.В. Энергия разрушения при циклических и статических нагрузках. Прочность металлов при переменных нагрузках / Л.В. Муратов // М. : Издательство АН СССР, 1983. – С. 111 – 118.
9. Казаков, Н.Ф., Браун, А.Г. Диффузионная сварка за рубежом / Журн. автоматическая сварка. – 1984. – №11. – С 50 – 54.

10. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. – 2 изд., доп. и перераб. – К. : Наук. Думка, 1986. – 240 с.
11. Малинин, Н.Н., Батанова, О.А. Теория пластичности материалов различно сопротивляющихся растяжению-сжатию // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1979. – №12. – С. 9 – 14.
12. Особенности сварки в твердом состоянии деталей и узлов летательных аппаратов из разнородных материалов.: Учебное пособие / Л.А. Дударь. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – 64 с.
13. Проблемы диффузионной сварки материалов в условиях космоса./ А.Г. Браун // К.Э. Циолковский и проблемы космической индустриализации: Тр. 20 Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 17-20 сентября 1985 г. Секция «К.Э. Циолковский и проблемы космического пространства» М. – 1987 г. – С. 41 – 44.
14. Митропольский, А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М. : Физматиз, 1961. – 456 с.
15. Биргер, М.А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности// Прикладная математика и механика. – 1951. – Т. 15. – № 6. – С. 765 – 770.
16. Вишняков, Н.А., Грингауз, Г.Л., Рудзей, Г.Ф. О релаксации остаточных напряжений в дуралюмине при нормальных и повышенных температурах // Проблемы прочности. – 1980. – № 5. – С. 50 – 52.
17. Вишняков, Н.А., Рудзей, Г.Ф. Расчет кривых релаксации остаточных напряжений при нормальной и повышенной температурах // Проблемы прочности. – 1982. – №5. – С. 101 – 103.
18. Гуца, О.Н. Исследование полей сварочных остаточных напряжений и их изменение под влиянием циклических нагрузок неразрушающим ультразвуковым методом // Остаточные напряжения и методы

регулирования: Труды Всесоюзного симпозиума. – М. : МПИМ АН СССР, 1982. – С. 152 – 160.

19. Кудрявцев, М.В., Саввина, Н.М., Зайцев, Г.З. Устойчивость эффекта остаточных напряжений в усталостной прочности стальных деталей (во времени и при воздействии переменных нагрузок) // Усталостная прочность и остаточные напряжения в стали и чугуне Кн. ЦНМИТМАШ. – М. : Машгиз, 1955. – С. 5 – 22.

20. Трощенко, В.Т., Хамаза, Л.А., Цыбанев, Г.В. Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев / В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза, Г.В. Цыбанев. – Киев: Наукова думка, 1979. – 105 с.

21. Когаев, В.П., Серенсен, С.В. Статистическая методика оценки влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости// Заводская лаборатория. – 1962. – № 1. – С. 79 – 87.

22. Дерягин, Г.А., Штовба, Ю.К., Шнерова, Э.М. Применение ускоренных методов испытаний для определения пределов выносливости алюминиевого сплава Д16Т // Заводская лаборатория. – 1967. – № 9. – С. 870 – 873.

23. Le soudage – diffusion a l'etatsolide / Hourcade M.// Trait. herm. – 1991. – №250. – Р. 21 – 29.

24. Балашов, В.Ф., Петухов, А.Н. Усталостная прочность жаропрочных сплавов в связи с концентрацией напряжений, асимметрией цикла и поверхностным наклепом / Проблемы прочности. – 1974. – №4. – С. 82 – 86.

25. Иванов, С.И. и др. Остаточные напряжения во впадинах шестерен / Иванов С.И., Трофимов Н.Г, Ермолаев В.М., Ковалкин О.П. и др. / Остаточные технологические напряжения: Труды II Всесоюзного симпозиума. – М. : ИПМ АН СССР. – 1985. – С. 179 – 184.

26. Барвинок, В.А., Бордаков, П.А., Демичев, С.Ф. Механика контактного взаимодействия при диффузионном соединении разнородных

материалов в вакууме / В.А. Барвинок, П.А. Бордаков, С.Ф. Демичев. – М.: Международный центр научной и технической информации, 1997. – 72 с.

27. Давиденков, Н.Н. Об остаточных напряжениях // Заводская лаборатория. – 1935. – № 6. – С. 688 – 696.

28. Бордаков, П.А., Демичев, С.Ф., Мальцев, А.В., Покоев, А.В., Сироченко, В.П., Степанов, Д.И. Деформационное поведение концентрационных распределений элементов в диффузионном контакте металлических материалов // Тез. докл. XIII МНТК «Физика прочности и пластичности материалов», Самара, СГТУ, 1992, – с. 124.

29. Бордаков, П.А., Демичев, С.Ф., Покоев, А.В., Сироченко, В.П. Численное моделирование состава диффузионного соединения разнородных металлов с прослойкой // Тез. докл. XIV МНТК «Физика прочности и пластичности материалов», Самара, СГТУ, 1995, – с. 278 – 279.

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

31. Михеев, А.А. Диффузионные соединения. Контроль качества, испытания, исследования. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 180 с.

32. Конюшков, Г.В., Копылов, Ю.Н. Диффузионная сварка в электронике / Под общ. Ред. Н.Ф.Казакова. – М. : Энергия, 1986. – 168 с.

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

34. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности. М. : Наука, 1969. – 420 с.

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

36. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.

37. Давиденков, Н. Н. Рентгенография в применении к исследованию материалов / Н. Н. Давиденков. – М. : Изд. ОНТИ, 1963. – 248 с.

38. Давиденков, Н. Н. К вопросу о классификации и проявлении остаточных напряжений / Н. Н. Давиденков // Заводская лаборатория. 1959. – № 3. – С. 318 – 319.
39. К вопросу о классификации и проявлению остаточных напряжений / Н. П. Щапов [и др.] // Заводская лаборатория. 1959. – № 10. – С. 252 – 254.
40. Косолапов, Г. Ф. Рентгенография / Г. Ф. Косолапов. М. : Высшая школа, 1952. – 332 с.
41. Бэкофен, В. Процессы деформации / В. Бэкофен. М. : Металлургия, 1977. – 288 с.
42. Немец, Я. Жесткость и прочность стальных деталей / Я. Немец. М. : Машиностроение, 1970. – 528 с.
43. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие. С.П. Буркин, Г.В. Шимов, Е.А. Андрюкова [Электронный ресурс]. – URL: <http://hdl.handle.net/10995/34750> (дата обращения: 12.10.2017).
44. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. М. : Машиностроение, 1957. – 400 с.
45. Гуревич, С. М. Справочник по сварке цветных металлов / С. М. Гуревич. – Киев : Наукова думка, 1981. – 608 с.
46. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
47. Двухвальная газовая турбина GeneralElectricLM6000 [Электронный ресурс]. – URL: <https://dm.energy/ru/ge-lm6000> (дата обращения: 14.02.2018).
48. Принципиальная схема машины для диффузионной сварки [Электронный ресурс]. – URL: <http://plazmorez.com/?p=2332> (дата обращения 24.12.2018).
49. Универсальная машина диффузионной сварки МДВ-301 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elmics.ru/dscr/MDV-301.html> (дата обращения 24.12.2018).
50. Materials and manufacturing in aerospace / clementson DrA / Adv. Mater. Mtechnol Jut. 1990 London – 1989. – P. 115 – 120.

51. Perona, G., Sesini, R., Nicodemi, W. Diffusionsionsschweissung von Titan mit Stahl. – Z. – Metallk. – 1967. – №2. P. 125 – 128.
52. Fischer, R. L., Losco, E. F., Lustman, B. Phase transformation bounding of metal members. Westinghouse Electric Corpor, Patent USA № 3025592, Filed December 5, 1974; Wolfe ,et al. September 14, 1976. – Vol. 5.
53. Jacques, F. J. Soudage par diffusion. Techn. mod. – 1971. – №10, P. 359 – 362.
54. Jonson, K.L. Deformation of a plastic wedge by a rigid flat die under the action of tangential force / J. Mech. Phys. Sol., v.16. – №6. – 1968. P. 395 – 402.