

КУЙБЫШЕВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ С. П. КОРОЛЕВА

И. С. Гришин

**ДИФфуЗИОННАЯ
СВАРКА
ЖАРОПРОЧНЫХ
СПЛАВОВ
МЕЖДУ СОБОЙ
И С КОНСТРУКЦИОННЫМИ
СТАЛЯМИ**

КУЙБЫШЕВ
1981

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С.П.Королева

И.С. Г р и ш и н

ДИФфуЗИОННАЯ СВАРКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ МЕЖДУ СОБОЙ
И С КОНСТРУКЦИОННЫМИ СТАЛЯМИ

Конспект лекций

Куйбышев 1981

Г р и ш и н И.С. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов между собой и с конструкционными сталями. - Куйбышев: КуАИ, 35 с., илл. 17.

В конспекте лекций изложен опыт применения диффузионной сварки в вакууме при изготовлении узлов и деталей горячего тракта ГТД. Рассмотрены особенности формирования диффузионного соединения жаропрочных сплавов между собой и с конструкционными сталями, вопросы технологии изготовления роторов малогабаритных ГТД и армирования бандажных полок лопаток авиационных двигателей.

Изложенный в конспекте лекций материал недостаточно освещен в учебной и технической литературе, поэтому издание его будет полезным для студентов моторостроительных факультетов (специальность 0537).

Темплан 1981 г., поз. 95.

Под редакцией к.т.н. доцента Ф.И.К и т а е в а

Утверждены на заседании редакционно-издательского совета института 28.II.79 г.

Повышение эксплуатационных характеристик и экономической эффективности авиационных двигателей является одной из главных задач современного двигателестроения. В конструкциях двигателей все более широкое применение находят высокожаропрочные сплавы, из которых изготавливаются детали узлов горячего тракта. В этой связи возникает необходимость получения надежных работоспособных соединений этих сплавов между собой и с другими конструкционными материалами.

В узлах и агрегатах такие соединения позволяют в полной мере реализовать достоинства используемых материалов, решать целый ряд конструкторских и технологических задач.

Однако соединение жаропрочных сталей и сплавов связано с рядом принципиальных трудностей. Сварка плавлением этих материалов осложнена прежде всего тем, что при расплавлении дисперсно-твердеющих сплавов на никелевой основе происходят необратимые структурные изменения и выгорание легирующих элементов. Свойства соединения, полученного пайкой, определяются свойствами литой структуры прослойки припоя, прочностные характеристики которой, как правило, ниже, чем у основного материала. Сварка трением также сопровождается оплавлением контактной зоны и не обеспечивает надежных стабильных по качеству соединений. Механические способы соединения увеличивают вес и габаритные размеры конструкции и недостаточно надежны в условиях эксплуатации.

В последние годы для соединения однородных и разнородных материалов успешно применяется способ диффузионной сварки в вакууме (ДСВ), предложенный и промышленно разработанный заслуженным деятелем науки и техники РСФСР д.т.н. профессором Н.Ф.Казаковым. В настоящее время доказана принципиальная возможность применения этого способа для соединения практически всех конструкционных материалов. Опыт сравнительного использования диффузионных, паяных и других видов соединений показывает преимущества ДСВ, особенно при работе в условиях повышенных температур, резких термических перепадов, вибрационного и ударного нагружения.

1. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ

1.1. Механизм образования диффузионного соединения

Способ диффузионного соединения основан на сближении ювенильных (свободных от окисных пленок) поверхностей свариваемых деталей в вакууме при нагреве их несколько выше температуры рекристаллизации с приложением небольшого сжимающего усилия и взаимной диффузии на границе раздела соединяемых поверхностей.

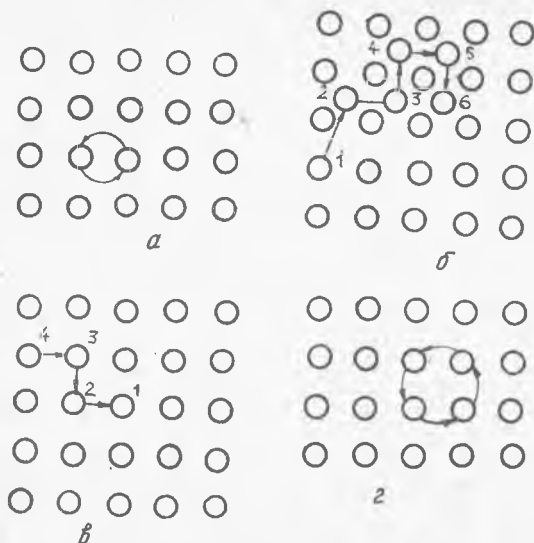
Процессы диффузии лежат в основе многих превращений, наблюдающихся в металлах и сплавах (рост зерна, полиморфное превращение, рекристаллизация, гомогенизирующая термообработка, спекание металлических порошков и др.).

Диффузия – самопроизвольное распределение примесных атомов в решетке матрицы. Основная сила диффузии – это уменьшение химического потенциала $\mu = f(p, T, C)$, т.е. диффузия может возникнуть при наличии градиентов концентрации – C , градиентов напряжения – p или градиентов температуры – T .

При рассмотрении миграции атомов в кристаллической решетке различают: а) самодиффузию – самопроизвольный обмен атомов в решетке под действием тепловых флуктуаций и б) гетеродиффузию – диффузию, идущую через границу раздела двух фаз. Как в первом, так и во втором случае диффузия атомов возможна при условии, что диффундирующий атом будет иметь достаточный запас энергии для миграции в кристаллической решетке.

Диффузия может происходить по следующим четырем механизмам:

I – путем обмена местами двух соседних атомов (рис. 1,а). Для этого требуется большая затрата энергии, поскольку соседние атомы должны раздвинуться на два атомных диаметра; такой процесс требует значительных локальных искажений кристаллической решетки, что исключает возможность осуществления подобного механизма в условиях ДСВ;



Р и с. 1. Вероятные механизмы перемещения атома в кристаллической решетке металла

2 - путем движения атомов внедрения (рис. 1,б). В этом случае атом, находящийся в узле решетки в положении 1, переходит в междоузелье, занимая положение 2; далее атом перемещается по междоузельям 2-3-4-5-6 и т.д., для чего атому необходимо сообщить значительную энергию; поэтому такое перемещение возможно при гетеродиффузии в твердых растворах внедрения, когда внедренный атом имеет значительно меньшие размеры, чем атом основного металла;

3 - путем перемещения вакансии (рис. 1,в). Это происходит в том случае, когда вакансии решетки обмениваются местами с соседними атомами. Последовательность перемещения атомов, при которых вакансия 1 сможет двигаться по решетке, соответствует последовательности перемещения атомов в противоположном направлении; атом 2, попав в вакансию 1, позволяет атому 3 занять место, которое он раньше занимал, а атом 4, переместившись в положение атома 3, оставит на своем месте вакансию;

4 - путем кольцевого обмена четырех атомов (рис. 1,г). В этом случае четыре атома одновременно перемещаются по кольцу: та-

кой механизм вероятен в металлах с плотноупакованной кристаллической решеткой.

В настоящее время большинство исследователей, изучающих диффузионные процессы, отдают предпочтение вакансионному механизму межатомного взаимодействия, так как в этом случае требуется наименьшее количество энергии для отрыва атома из его устойчивого положения.

Согласно первому закону Фика количество вещества, продиффундирующее за время dt через поверхности dS на расстояние dx от исходной плоскости, пропорционально падению концентрации, т.е.

$$dm = -D \frac{dc}{dx} dt ds.$$

Знак минус перед уравнением означает, что вещество двигается в сторону убывания концентрации. Коэффициент пропорциональности D называется коэффициентом диффузии и выражает количество вещества в молях или граммах, диффундирующее в единицу времени через единицу площади при градиенте концентрации $\frac{dc}{dx} = 1$.

Коэффициент диффузии характеризует скорость процесса и имеет размерность $\text{см}^2/\text{с}$. Температурная зависимость коэффициента диффузии подчиняется экспоненциальному закону

$$D = D_0 \exp(-\theta/RT),$$

где D_0 - параметр уравнения, зависящий от типа кристаллической решетки;

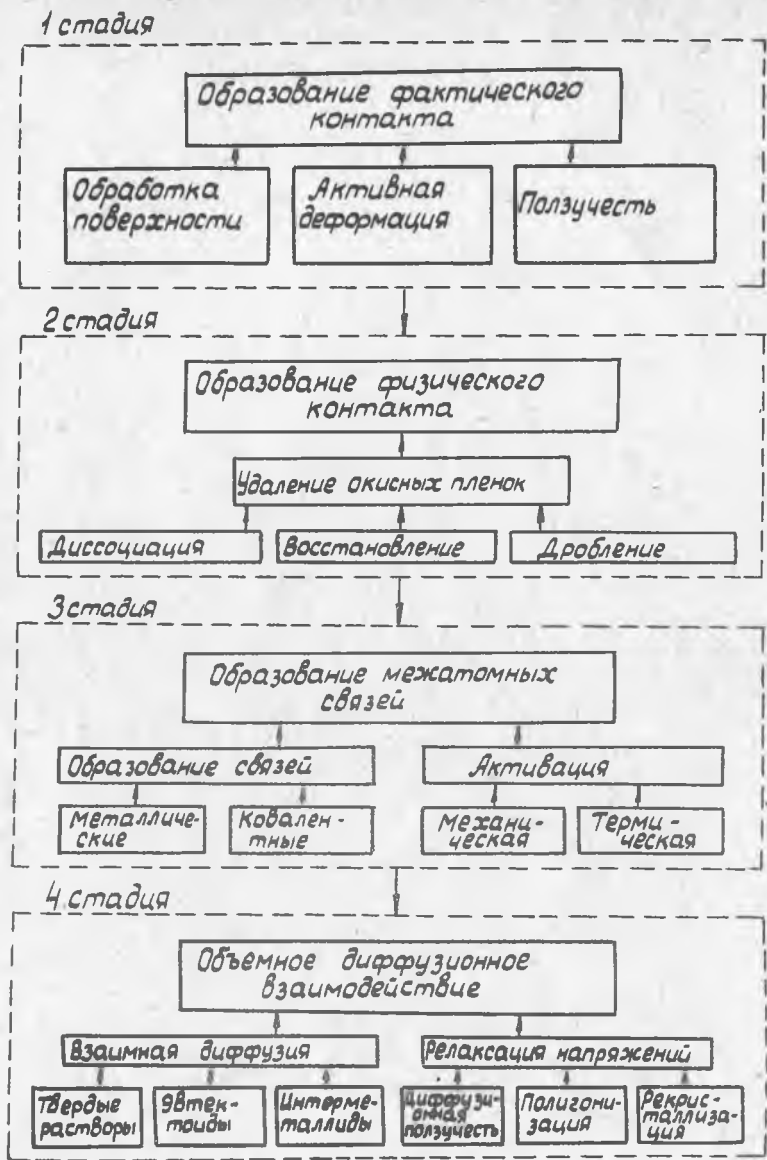
θ - энергия активации, кДж/моль;

R - газовая постоянная, кДж/моль;

T - температура, $^{\circ}\text{C}$.

Процесс диффузии в металлических системах обычно разделяют на три категории: объемную, по границам зерен и поверхностную, причем, $Q_{\text{пош}} < Q_{\text{зр}} < Q_{\text{об}}$.

Преимущественная диффузия по поверхности и границам зерен объясняется тем, что там степень нарушения кристаллического строения и дефекты структуры (наличие вакансий, дислокаций, напряжений) выражены особенно сильно. С точки зрения диффузионной сварки особый интерес представляет возможность ускорения диффузии в результате создания неравновесных дефектов за счет пластической деформации и термической активации процесса.



Р и с. 2. Схема образования диффузионного соединения

1.2. Стадии образования диффузионного соединения

Для удобства изучения и технологического анализа процесс образования диффузионного соединения целесообразно представить в виде последовательных взаимосвязанных стадий (рис. 2).

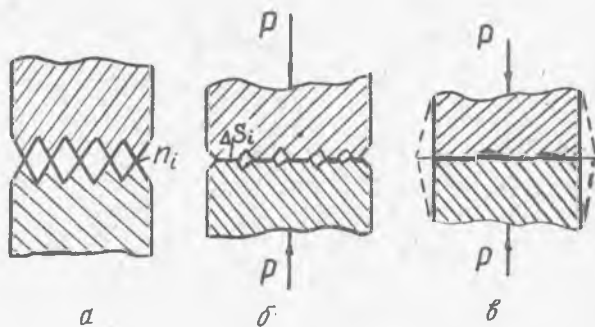
Первая стадия — образование фактического контакта. Поверхности, слой окислов с которых не удален, образуют контакт, называемый фактическим.

На первом этапе площадь фактического контакта складывается из суммы площадок контактирования микровыступов поверхности соединения (рис. 3, а). Очевидно, что чем с более низкой шероховатостью обработаны поверхности, тем больше будет площадок контактирования, тем большей будет площадь фактического контакта $S_{фак}$

$$S_{фак} = n \Delta S,$$

где ΔS — площадь элементарного микроконтакта;

n — число элементарных микроконтактов.



Р и с. 3. Этапы формирования фактического контакта

Однако, как показал опыт, даже такой процесс, как доводка алмазным порошком, дает возможность получить площадь фактического контакта не более половины действительной площади — S_d , определяемой геометрической площадью соединяемых поверхностей в зоне контактирования. Площадь фактического контакта можно увеличить путем пластического деформирования микровыступов в контакте. Это

достигается за счет приложения сжимающего усилия и нагрева деталей в зоне сварки.

В начальный момент приложения нагрузки, когда поверхности контактируют по отдельным выступам, действующие в контакте напряжения значительно превышают предел текучести, и происходит активная пластическая деформация микровыступов (рис. 3,б). Увеличение площади фактического контакта сопровождается релаксацией действующих напряжений, и через несколько секунд после приложения нагрузки скорость деформации резко падает. Доминирующую роль начинает играть ползучесть материала. Но при определенных значениях параметров процесса (давления и температуры) скорость установившейся ползучести может приближаться к нулевому значению за счет возникновения в контакте сопротивления ползучести. Процесс формирования фактического контакта на этом этапе остается незавершенным, а в зоне соединения могут сохраняться микропустоты (рис. 3,в).

Стремление завершить формирование фактического контакта за счет увеличения давления и температуры приводит к возникновению макропластической деформации детали в зоне сварки. Опыт показал, что даже после 30-процентной деформации стали площадь достигнутого фактического контакта не превышает 90-95-процентной действительной площади соединения. Наличие микронесплошностей после двух первых этапов формирования фактического контакта даже при значительной макропластической деформации связано, очевидно, с особым, близким к всестороннему сжатию, характером напряженно-деформированного состояния микрорельефа поверхностей на завершающих стадиях их сближения.

Вторая стадия - образование физического контакта. Площадь фактического контакта, с которой удалены слои полярных молекул (жиры, масла), адсорбированных газов и окисных пленок (рис. 4), называется площадью физического контакта. Только после того, как сформируется надежный физический контакт, возможно механическое взаимодействие на соединяемых поверхностях.

В условиях диффузионной сварки очистка поверхности от окисных пленок осуществляется в процессе вакуумного нагрева. Механизм и кинетика очистки определяются термодинамическими свойствами окислов и составом газовой фазы и могут сильно отличаться в зависимости от рода металла и сплава.

Процесс термовакуумной очистки может протекать по трем наиболее вероятным механизмам:

I - удаление окислов в результате их диссоциации



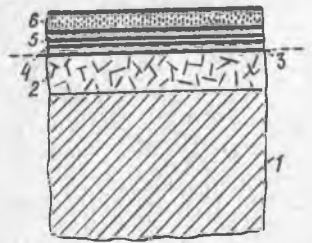
2 - восстановление окислов за счет диффузии кислорода в металл



3 - восстановление окислов углеродом, содержащимся в сплаве и диффундирующим при нагреве к границе раздела металл-окисел



Для металлов с относительно высокой упругостью диссоциации окислов (железо, никель) наиболее вероятным механизмом удаления окислов является их диссоциация. На металлах, хорошо растворяющих кислород (титан, цирконий) в вакууме, можно ожидать растворения окислов в металле. На стали окислы удаляются наиболее интенсивно путем восстановления их углеродом.



Р и с. 4. Основные виды адсорбированных слоев на поверхности металла: 1-металл; 2- деформированная зона; 3-слой окислов; 4-адсорбированный слой газов; 5-адсорбированный слой воды; 6-слой полярных молекул

Третья стадия - образование межатомных связей. Процесс сварки на этой стадии - это прежде всего взаимодействие между поверхностными слоями соединяемых материалов. Для получения прочных межатомных связей (металлических например) необходимо эти атомы активизировать. Активация приводит к разрыву насыщенных связей атомов на контактирующих поверхностях, к большей их подвижности, и межатомное взаимодействие в результате этого может распространиться на глубину порядка нескольких параметров кристаллической решетки. Основными активизирующими факторами при ДСВ являются прилагаемое усилие сжатия и температура нагрева.

В общем случае зона соединения на этой стадии процесса сварки представляет собой межзеренную границу, ориентированную на плоскость контактирования. Поры и окисные включения на этой границе являются следствием незавершенности двух предыдущих стадий процесса. Наличие межзеренной границы и "микронепровары" резко снижают пластичность соединения.

Четвертая стадия - диффузионное объемное взаимодействие. Развитие процесса соединения на этой стадии приводит к устранению несовершенств (пор, окисных включений), образованию общих зерен в контакте и исчезновению границы раздела, релаксации внутренних напряжений. Благодаря этому характеристики соединения при эксплуатации могут стать идентичными характеристикам исходных материалов.

Однако при сварке разнородных материалов в процессе объемного взаимодействия возможно образование в контакте слоя интерметаллидов, который резко снижает прочностные характеристики соединения. В этих случаях необходимо в зону контактирования вводить промежуточную прослойку из материала, который не образует интерметаллических соединений с каждым из свариваемых материалов. Кроме того, в зависимости от соединяемой композиции прослойка может выполнять и другие функции.

При соединении разнородных материалов с различными коэффициентами термического расширения для релаксации внутренних напряжений вводится прослойка из материала, имеющего промежуточное значение коэффициента термического расширения. Прослойки из более мягкого материала применяются для сварки материалов, обладающих высокой твердостью (твердые сплавы, жаропрочные сплавы), что облегчает условия формирования фактического контакта и ускоряет протекание последующих стадий.

Возможность варьирования материалами и толщиной промежуточной прослойки в зависимости от сочетания свариваемых материалов является важным достоинством диффузионной сварки и способствует расширению области ее применения.

1.3. Технологические параметры ДСВ и этапы цикла сварки

Температура сварки является основным параметром процесса. Она определяет условия термовакуумной очистки и образования физического контакта, активации атомов соединяемых поверхностей, лимитирует скорость и характер протекания объемного диффузионного взаимодействия.

Как показывает опыт ДСВ разнообразных материалов, за оптимальную температуру сварки принимается температура, равная $(0,6-0,8)T_{пл}$,

где $T_{пл}$ — температура плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов. Температура сварки не должна превышать значений, при которых в свариваемых материалах могут происходить необратимые фазовые и структурные превращения, ухудшающие свойства сварного соединения.

Удельное давление скатия способствует активации поверхностей, формированию фактического контакта за счет микропластической деформации и ползучести микровыступов. Учитывая взаимосвязь между давлением скатия и температурой сварки, максимально допустимые значения удельного давления необходимо выбирать такими, при которых не будет наблюдаться общая пластическая деформация свариваемой детали в зоне соединения.

Время сварки является функцией основных параметров процесса — температуры и давления. Время сварки определяет полноту протекания завершающего этапа стадии объемного диффузионного взаимодействия. Однако с увеличением времени сварки увеличивается общая пластическая деформация свариваемых деталей, поэтому верхний предел допустимого времени сварки целесообразно ограничивать. Нижнюю границу можно ориентировочно определять, исходя из минимально необходимого времени термовакуумной очистки соединяемых поверхностей.

Глубина вакуума и температура процесса определяют скорость и качество очистки соединяемых поверхностей. Чем выше степень вакуумирования, тем интенсивнее идет процесс дегазации из деталей и объема камеры. Этим условиям отвечает глубина вакуума 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст., которую обеспечивают серийные диффузионные установки.

Сварка осуществляется в определенной технологической последовательности на специальных установках, принципиальная схема одной из них показана на рис. 5. Детали 6, с предварительно подготовленными свариваемыми поверхностями (мехобработанные и обезжиренные), помещаются в камеру 4 и устанавливаются в центрирующем приспособлении 7. Затем камера герметизируется и производится откачка воздуха с помощью вакуумных насосов. При достижении требуемого вакуума включается высокочастотный генератор, и детали нагреваются в зоне сварки с помощью индуктора 5. Так как индукционный нагрев носит поверхностный характер, то с целью предотвращения перегрева деталей на периферии и равно-

мерной передачи тепла в глубь детали тепловую мощность необходимо вводить импульсами. Скорость нагрева зависит от площади поперечного сечения свариваемых деталей в зоне контакта, она должна быть такой, чтобы в процессе нагрева до температуры сварки градиент температур на поверхности и в центре был минимально возможным.

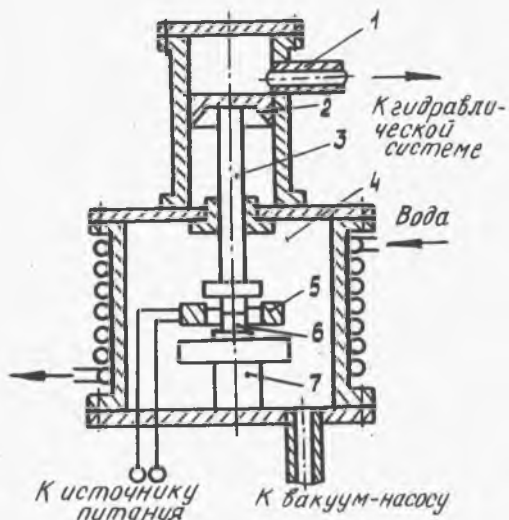
Очистка свариваемых поверхностей от кислых пленок, как правило, завершается за время нагрева детали до температуры сварки.

При достижении температуры сварки на свариваемый комплекс через поршень 2 и шток 3 гидросистемы прикладывается рабочее давление, которое поддерживается до окончания процесса.

При заданной температуре и давлении производится изотермическая выдержка, в течение которой протекает процесс объемного диффузионного взаимодействия.

Последний этап цикла сварки - охлаждение свариваемого комплекса с заданной скоростью до температуры 150–200⁰С. После этого снимается давление сжатия, в камеру напускается воздух и она открывается.

Длительность всего цикла сварки зависит от массы и геометрии свариваемых деталей, физико-механических свойств, входящих в соединение материалов.



Р и с. 5. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме: 1-цилиндр гидропровода; 2-поршень; 3-шток; 4-вакуумная камера; 5-индуктор; 6-свариваемые детали; 7-центрирующее приспособление

2. СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

2.1. Требования к материалам

Жаропрочные сплавы, как правило, применяются для деталей двигателей, работающих при температуре выше 500°C . К таким деталям относятся рабочие лопатки, направляющие лопатки, диски и корпус камеры сгорания.

Рабочие лопатки в процессе эксплуатации подвергаются воздействию растягивающих напряжений порядка 14 кгс/мм^2 и температуры $650\text{--}980^{\circ}\text{C}$. Кроме высокой прочности, материал лопаток должен иметь соответствующую пластичность, сопротивляемость действию усталостных деформаций, иметь высокую стойкость к окислению и газовой коррозии.

В современных двигателях температура сопловых лопаток достигает 1100°C . Основным требованием к материалам в этом случае является сопротивление ползучести, сопротивление термической усталости, стойкость в условиях газовой коррозии и эрозии.

Рабочие температуры диска турбины обычно не превышают 780°C . Однако вследствие центробежных нагрузок рабочие напряжения в этих вращающихся деталях составляют более 50 кгс/мм^2 . Поэтому материал дисков должен иметь высокую прочность при растяжении и высокое сопротивление ползучести, хорошие усталостные характеристики.

Материалы для изготовления составных роторов малогабаритных двигателей должны обладать комбинацией свойств лопаток и дисков в сочетании с очень хорошими литейными свойствами.

2.2. Физико-механические характеристики

Жаропрочность — это способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Основными характеристиками, определяющими жаропрочность, являются предел ползучести ($\sigma_{пл}$) — напряжение, вызывающее заданную скорость деформации при данной температуре, и длительная прочность (σ_D) — напряжение, вызывающее разрушение при определенной температуре за данный отрезок времени.

Жаропрочными сплавами называются высококонцентрированные твердые растворы элементов в матрице (например в никеле). Эти элементы повышают температуру рекристаллизации сплава, а следовательно и его жаропрочность до значений, близких к температуре его плавления.

Наибольшее значение при этом имеет высокая растворимость многих элементов в матрице и возможность контролируемого выделения с целью упрочнения такими соединениями, как γ' - фаза, представляющая собой интерметаллическое соединение Ni_3Al или $Ni_3(Al, Ti)$.

Жаропрочность сплава можно повысить за счет упрочняющей термической обработки - старения, при которой в результате выделения из пересыщенного раствора избыточных фаз происходит превращение, называемое дисперсионным твердением. Упрочняющий эффект может быть также повышен за счет выделения карбидов. Это позволяет получать сплавы с высокими свойствами и применять их для работы как в области средних, так и высоких температур (табл. I).

Т а б л и ц а I

Механические свойства некоторых никелевых сплавов

Сплав	Термическая обработка	$T_{исп}$ °C	σ_B кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	δ %	ψ	α_K кгс/см ²	$\bar{\sigma}_{100}$ кгс/мм ²
ЖСЗ	1150°C, 7 ч. воздействия	20	75		8,5	14	1,5- -2,5	
		800	56		3	17	1,5- -2,5	30
		900	40		4	7		10
ЖСЗДК	1200°C, 2-4 ч. воздействия	20	105	80	6-10	10-15	3-6	
		850	85	45	7	8	3-4	38
		900	75		8-12	8-16	2,8- -3,4	30
ЖС6	1200°C, 4 ч. воздействия	20	104		1	2	2-4	
		800	85		0,5	1,5	1,5- -2,0	50
		900	78		2,5	3	3,0- -3,5	28
ЖС6К	1200±20°C, 4 ч. воздейст- вия	20	100		2,5	6,5	1-3	
		800	92		2	5		52
		900	78		2	3		32

Большинство жаропрочных сплавов имеет достаточно высокую пластичность и ударную вязкость, стойкость к циклической и термической усталости.

При выборе параметров режима диффузионной сварки жаропрочных сплавов необходимо учитывать их физические свойства. Так, теплопроводность жаропрочных сплавов составляет только от 10 до 30% теплопроводности чистых никеля, железа или кобальта вследствие влияния легирующих элементов. Это приводит к возникновению температурных градиентов и термических напряжений. Очевидно при сварке необходимо скорость нагрева и охлаждения выбирать так, чтобы свести к минимуму в зоне соединения температурный перепад на периферии и в центре свариваемых деталей.

Сплавы на никелевой основе имеют примерно одинаковые коэффициенты термического расширения (КТР). Их значения колеблются в пределах (14-16) 10^{-6} / град $^{-1}$ в интервале температур 20-1000 $^{\circ}$ C. Незначительная разница в КТР жаропрочных сплавов облегчает условия сварки их между собой и со сталями, имеющими близкие со сплавами значения КТР.

2.3. Х и м и ч е с к и й с о с т а в , с т р у к т у р а и ф а з о в ы е с о о т н о ш е н и я

Современные сплавы на никелевой основе сложны по составу и включают в себя большое число элементов. Они содержат до 13 важных элементарных составляющих в тщательно контролируемых количествах и до 12 примесных и следовых элементов таких, как марганец, кремний, фосфор, сера. Следует иметь в виду, что большинство никелевых сплавов содержит 10-20% *Cr*, около 8% *Al* и *Ti*, небольшие количества бора, циркония, углерода и по выбору (в зависимости от назначения сплава) кобальта, молибдена, ниобия, ванадия и вольфрама.

Основные составляющие структуры никелевых сплавов следующие.

1. Матрица сплава (γ - фаза). Цельная матрица, представляющая собой аустенитную фазу на никелевой основе с г.ц.к. решеткой, обычно с повышенным содержанием элементов, образующих твердые растворы: кобальта, хрома, молибдена и вольфрама. Элементы, входящие в матрицу сплава, способствуют упрочнению сплава.

2. γ' -фаза. Жаропрочные сплавы на никелевой основе упрочняются, главным образом, благодаря образованию интерметаллических соединений, таких, как $Ni_3(Al, Ti)$. Следует отметить, что прочность γ' -фазы возрастает с увеличением температуры. Кроме того, достаточно высокая пластичность γ'' -фазы препятствует охрупчиванию в отличие от упрочнения фазами, обладающими более высокой твердостью (например карбидами).

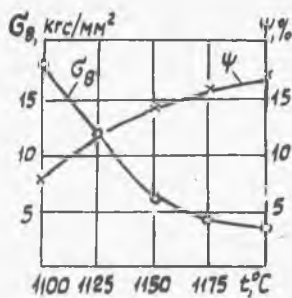
3. Карбиды. Углерод добавляется в количестве $\sim 0,05-0,2\%$, он взаимодействует с химически активными элементами с образованием первичных MeC карбидов. Во время термообработки и в процессе эксплуатации они распадаются на карбиды с пониженным содержанием углерода $Me_{23}C_6$ и M_6C , выделяющиеся по границам зерен. Карбиды оказывают благоприятное действие на предел длительной прочности при высокой температуре, но снижают пластические свойства сплава.

4. Интерметаллические фазы типа $(Me)_2Me$. Так как эти фазы имеют пластинчатую форму, то при их выделении резко снижаются такие свойства, как длительная прочность и пластичность сплава. Наиболее опасным температурным интервалом, способствующим интенсивному образованию подобных фаз, являются температуры в пределах $840-925^\circ C$. Отсюда следует, что при сварке необходимо избегать длительной выдержки свариваемых деталей в этом интервале температур.

3. СВАРКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ МЕЖДУ СОБОЙ И С ДРУГИМИ МАТЕРИАЛАМИ

3.1. Сварка жаропрочных сплавов типа КС6

Детали из литейных сплавов получают обычно методами точного литья в сочетании с последующей механической обработкой. Деформирование литейных сплавов при высоких температурах принципиально возможно, но только при малых скоростях, исключающих образование трещин. Это является предпосылкой возможности соединения их диффузионной сваркой. Однако возникает ряд сложностей при формиро-



Р и с. 6. Высокотемпературные свойства сплава ЖС6

температуры сварки выше 1200°C — к плавлению зернограничных эвтектик и необратимым изменениям структуры сплава.

Для материалов, обладающих высоким сопротивлением деформированию, одним из путей, способствующих увеличению площади фактического контакта, является понижение шероховатости свариваемых поверхностей. Чем ниже шероховатость, тем большее количество микровыступов находится в контакте, и, следовательно, быстрее идет процесс выравнивания поверхности без увеличения температуры и давления. Так, переход от точения к шлифованию сокращает время формирования фактического контакта почти в 4 раза.

Формирование физического контакта при диффузионной сварке жаропрочных сплавов осуществляется за счет термовакуумной очистки свариваемых поверхностей от окисных пленок. Термодинамический анализ позволяет, исходя из химического состава сплавов типа ЖС6, предположить наличие на их поверхности, главным образом, окислов хрома и никеля. Относительную эффективность какого-либо из механизмов очистки трудно оценить. Однако экспериментально выявлено, что при нагреве образцов в вакууме 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. до 1000 – 1100°C поверхность их очищается от этих окислов тем интенсивнее, чем выше температура.

Режим сварки выбирается, исходя из физико-механических свойств сплава, эксплуатационных требований к сварному соединению, масштабного фактора (размеры и формы детали).

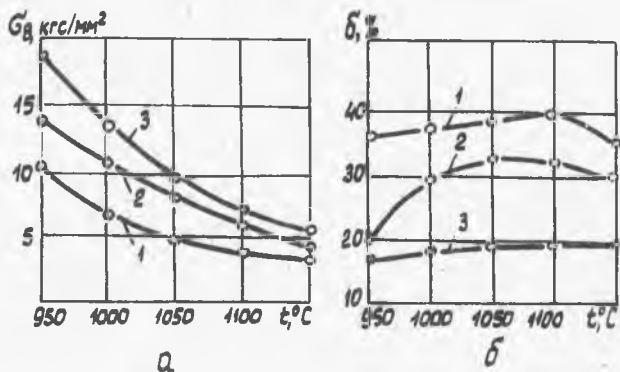
Ориентировочный режим сварки сплавов типа ЖС6: $T_{св} = 1120$ – 1130°C ;
 $P_{сж} = 3$ – 4 кгс/мм²; $\tau_{св} = 15$ – 17 мин; $B = 10^{-4}$ — 10^{-5} мм рт.ст.

В качестве примера сварки жаропрочных сплавов между собой может служить изготовление составных лопаток, исправление дефектов литья роторов турбин и лопаток и др.

3.2. Сварка жаропрочных сплавов с износостойкими сплавами

Износостойкие сплавы на никелевой основе типа ВХ, уступая сплавам типа ЖС6 в жаропрочности, имеют в интервале рабочих температур более высокую твердость, что позволяет использовать их для армирования поверхностей, работающих в условиях контактного трения, с целью повышения износостойкости, а также для восстановления изношенных поверхностей при ремонте деталей.

Высокая износостойкость сплавов ВХ определяется прежде всего большим содержанием хрома (до 35%) и кобальта (до 15%). Свойства этих сплавов в интервале температур сварки даны на рис. 7. При $T > 950^{\circ}\text{C}$ у всех сплавов наблюдается резкое падение прочности. Высокотемпературная пластичность, характеризуемая относительным удлинением, для сплавов ВХ находится в обратной зависимости от предела прочности.



Р и с. 7. Высокотемпературные свойства износостойких материалов: а - прочность; б - пластичность; 1 - ВХ4; 2 - ВХ5; 3 - ВХ6

Повышенная пластичность сплава ВХ, по сравнению со сплавом ЖС6, усложняет возможность получения прецизионных соединений этих сплавов между собой. При формировании фактического контакта в этом случае наблюдается объемная пластическая деформация сплава ВХ, что приводит к нарушению исходных размеров соединяемых деталей.

Для предотвращения этого явления необходимо в стык свариваемых деталей вводить прослойку материала более пластичного, чем ВХ. Это позволит снизить температурно-силовое воздействие на свариваемые детали, исключить их общее пластическое деформирование, облегчить формирование фактического контакта. Материал промежуточной прослойки не должен при этом образовывать интерметаллических соединений в плоскости контактирования свариваемых деталей в процессе объемного диффузионного взаимодействия. В качестве такой прослойки может быть использована фольга из чистого никеля, являющегося основой сплавов ЖС6 и ВХ.

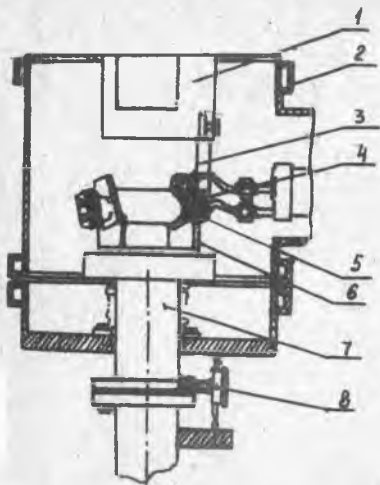
Применение прослойки из "мягкого" материала дает возможность снизить температуру сварки и удельное давление скатия по сравнению со сваркой жаропрочных сплавов между собой

$$T_{св} = 1050-1100^{\circ}\text{C}; \quad P_{сж} = 1,5-2 \text{ кгс/мм}^2.$$

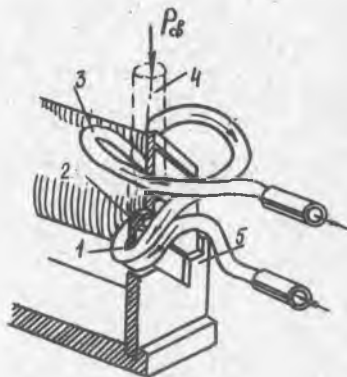
Наглядным примером сварки жаропрочных сплавов с износостойкими материалами является армирование бандажных полок лопаток пластинами из износостойких сплавов.

Наиболее слабым местом лопаток турбины и компрессора являются бандажные полки, большой износ которых в результате действия вибрационных контактных нагрузок при высоких температурах снижает ресурс их полной отработки. Технология армирования с помощью диффузионной сварки позволяет не только восстанавливать лопатки после отработки, но и проводить армирование лопаток на одном из этапов их изготовления.

Схема армирования бандажной полки лопатки пластинками из износостойкого сплава показана на рис. 8. Сварочное приспособление 6, смонтированное на столе штока гидроцилиндра системы скатия 7, обеспечивает жесткую фиксацию лопатки в сварочной камере 2 относительно индуктора 5 и штока 3, передающего давление от системы скатия установки на армирующую пластинку 4 и поверхность полки лопатки.



Р и с. 8. Схема сварки армирующих пластинок к лопатке ИТД: 1-верхняя обойма крепления штока; 2-корпус камеры; 3-шток, передающий давление; 4-армирующая пластинка; 5-индуктор; 6-приспособление для фиксации лопатки; 7-шток гидроцилиндра; 8-индикатор

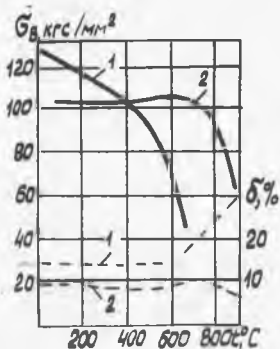


Р и с. 9. Схема индуктора петлевого типа с балластной индуктивностью: 1-индуктирующие петли; 3-балластные плечи; 2-бандажная полка лопатки с армирующей пластинкой; 4-давящий боек; 5-опорная стойка

Для создания локальной зоны разогрева свариваемых деталей и для исключения перегрева давящего бойка 4, двухвитковый индуктор (рис. 9) изготавливается так, что верхняя часть его выполнена по форме расходящихся витков (балластные плечи 3) с большим зазором, а нижняя часть повторяет контур полки лопатки 2 с минимальным между ними зазором. При этом индуктор должен быть выставлен так, чтобы исключить излишний нагрев полки лопатки, подплавление пластинки. Опыт эксплуатации такого индуктора при армировании лопаток показал, что локальный нагрев лопатки сосредоточен в зоне сварки - в стыке бандажной полки и армирующей пластинки. В то же время, молибденовый боек и опорная стойка, выполненная из обычной конструкционной стали, нагреваются в основном лишь за счет теплопередачи и сохраняют свою работоспособность при заданных температурах и давлении сварки.

3.3. Сварка жаропрочных сплавов со сталями

Сочетание сталь - жаропрочный сплав относится к категории трудносваривающихся. Это объясняется, в первую очередь, резким различием их механических свойств и химического состава.



Р и с. Ю. График зависимости прочности (—) и пластичности (---) стали (1) и жаропрочного сплава (2) от t .

Как видно из рис. Ю, пластические свойства стали при температурах, близких к температуре сварки, значительно выше, чем у жаропрочного сплава. Процесс формирования фактического контакта идет за счет пластической деформации стали с заполнением микровыступов. В этих условиях нельзя получить качественное сварное соединение из-за невозможности создания активных центров на поверхности более твердого материала. Попытка активизировать процесс за счет увеличения давления сжатия и температуры сварки приводит к недопустимым микропластическим деформациям стальной детали без какого-либо улучшения качества соединения.

Следует также отметить, что при прямом контактировании стали с жаропрочным сплавом в процессе объемного диффузионного взаимодействия в зоне сварки образуются интерметаллические соединения за счет диффузии легирующих элементов сплава в сталь и железа из стали в жаропрочный сплав.

Качественное диффузионное соединение этих материалов можно получить при использовании промежуточной прослойки из чистого никеля. Выбор никеля в качестве промежуточной прослойки для сварки данного сочетания материалов можно обосновать следующими соображениями.

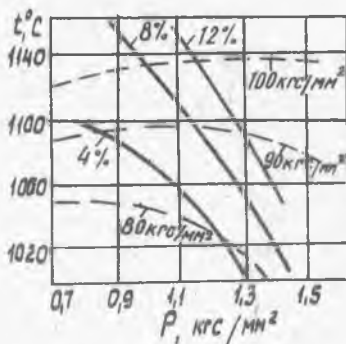
Никель является основой жаропрочных литейных сплавов и близок по природе к железу, с которым образует непрерывный ряд твердых растворов. Прослой никеля при обоснованно выбранной толщине может служить барьером, препятствующим проникновению компонентов жаропрочного сплава в сталь, исключая, таким образом, образование интерметаллических соединений.

В то же время никель обладает более высокой по сравнению с другими металлами диффузионной активностью и, следовательно, может служить интенсификатором диффузионных процессов. В условиях диффузионной сварки никель, контактируя с микровыступами жаропрочного сплава, способствует их сглаживанию. Процесс сглаживания микровыступов при этом происходит не за счет сил внешнего воздействия, а путем интенсификации диффузионных процессов и, прежде всего, диффузионной ползучести.

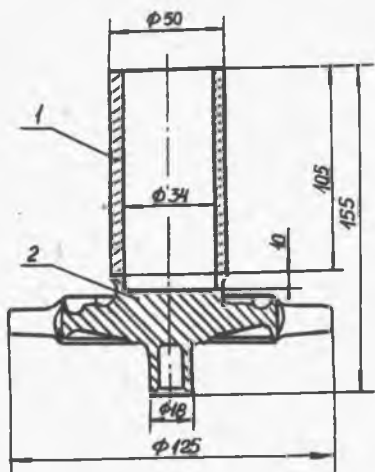
Однако, как показала практика, даже при таких благоприятных условиях получить качественное сварное соединение без некоторой остаточной пластической деформации стальной детали невозможно. Функциональная зависимость, связывающая прочность соединения и степень пластической деформации стали с технологическими параметрами диффузионной сварки, настолько сложна, что выявить ее можно только с использованием математического планирования эксперимента и обработкой результатов на ЭВМ.

Анализируя расположение линий равного уровня прочности и линий равной степени деформации (рис. II), оптимальными значениями макропластической деформации следует считать 8–12%. При сварке с меньшей деформацией нельзя получить стабильных значений прочности. Сварка с большей деформацией приводит к нарушению геометрических размеров детали. На основании этого допустимые отклонения параметров режима сварки лежат в пределах: $1100^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{св}} \leq 1120^{\circ}\text{C}$; $1,0 \text{ кгс/мм}^2 \leq P_{\text{сжк}} \leq 1,2 \text{ кгс/мм}^2$; $15 \text{ мин} \leq \tau \leq 20 \text{ мин}$.

В авиамоторостроении сочетание жаропрочных сплавов со сталями широко применяется при изготовлении роторов малогабаритных ГТД. Рабочие колеса роторов из жаропрочных сплавов изготавливаются отливкой в керамические формы. Колесо выполняется в виде ступицы с лопатками по всему периметру. Существующая технология литья исключает возможность получения цельнолитой конструкции колеса с



Р и с. II. График зависимости прочности (— — —) и деформации (—) от t и давления



Р и с. 12. Конструкция и габаритные размеры ротора: 1-вал ротора из стали; 2-колесо ротора из жаропрочного сплава

валом, поэтому вал вытачивается из жаропрочной стали отдельно от колеса. Общий вид и габаритные размеры одного из роторов представлены на рис. 12. К соединению рабочего колеса с валом предъявляются высокие требования, обусловленные тяжелыми условиями эксплуатации: резкие температурные перепады, наличие значительных крутящего и изгибающего моментов.

Соединение достаточно технологично с точки зрения применения диффузионной сварки: геометрия и габариты узла позволяют производить сварку на серийно выпускаемом оборудовании и обеспечивают возможность равномерной передачи усилий сжатия на торцевые поверхности контакта. В зону соединения можно

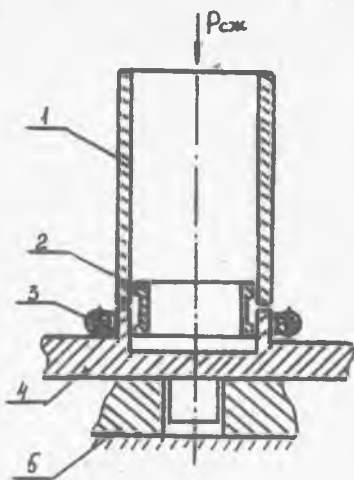
помещать промежуточный слой другого материала (в данном случае никелевой фольги толщиной 0,05 мм), а возможность механической обработки после сварки наружной и внутренней поверхности вала снижает требования прецизионности получаемых соединений.

Схема сборки и сварки роторов показана на рис. 13. Такая схема обеспечивает точность сборки соединяемых деталей и жесткую их фиксацию в сварочной камере относительно системы сжатия установки и нагревателя (индуктора ВЧ генератора). Колесо ротора через его ступицу устанавливается на рабочем столе сварочной камеры и фиксируется за счет отверстия в нижней опоре приспособления. Соосность вала ротора и колеса обеспечивается с помощью фиксирующей втулки - технологического кольца. Кольцо вставляется по свободной посадке и имеет цилиндрическую проточку, благодаря которой осуществляется свободное формоизменение деталей в месте соединения во время сварки. Равномерная и свободная деформация в стыке благоприятно сказывается на формировании фактического контакта и способствует повышению качества диффузионного соединения. После сварки технологическое кольцо с помощью проточки удаляется.

При расчете термического цикла сварки необходимо учитывать особенности индукционного нагрева. Нагрев до температуры сварки узлов, показанных на рис. 12, осуществляется со скоростью 50–60°/мин. При этом на поверхности и в центре вала в зоне стыка наблюдается температурный перепад, равный 90–100°С. Для выравнивания температуры по всей глубине стыка необходима выдержка при температуре сварки в течение 4–5 мин.

Теплофизические характеристики и масса соединяемых деталей (колесо из карбидного сплава, вал из стали) резко различаются. Поэтому при симметричном расположении индуктора относительно стыка происходит преимущественный разогрев стального вала. Как следствие — затрудняется очистка от окислов и активация поверхности карбидного сплава, более "инертного" с точки зрения диффузионного взаимодействия, требующего более интенсивного термомеханического воздействия. Излишний же разогрев стального вала по длине под воздействием усилий скатия приводит к его деформации и даже может вызвать потерю продольной устойчивости.

Наиболее рациональным является положение, показанное на рис. 13. Смещение его на выступающую часть колеса турбины приводит к более интенсивному разогреву в зоне сварки карбидного сплава, что в значительной мере способствует активации его свариваемой поверхности.



Р и с. 13. Схема сварки ротора с полым валом: 1—вал ротора; 2—центрирующая втулка; 3—индуктор; 4—колесо ротора; 5— нижняя опора при-
способления

4. КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ СО СТАЛЯМИ

Диффузионная сварка жаропрочных сплавов со сталями является перспективным способом соединения при изготовлении конструктивных элементов авиационных двигателей. В то же время комбинация этих материалов относится к категории трудносвариваемых сочетаний. Поэтому выявление надежности и качества диффузионного соединения жаропрочный сплав - сталь представляет собой особый интерес.

По ГОСТ 13377-75 под надежностью понимается свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени. Надежность является частью более общего свойства изделия - качества, представляющего согласно ГОСТ 15467-70 совокупность свойств изделия, определяющих его пригодность для эксплуатации. Возможность получения качественных диффузионных соединений зависит от многих факторов (рис. 14).



Р и с. 14. Факторы, определяющие качество диффузионного соединения

Для оценки работоспособности сварной конструкции в зависимости от условий эксплуатации необходимо определить физико-механические характеристики при кратковременных, длительных и циклических нагрузениях как при нормальной, так и при рабочей температуре. Обобщающим показателем соответствия полученного соединения требованиям эксплуатации являются результаты испытаний сварного узла в составе работающего изделия.

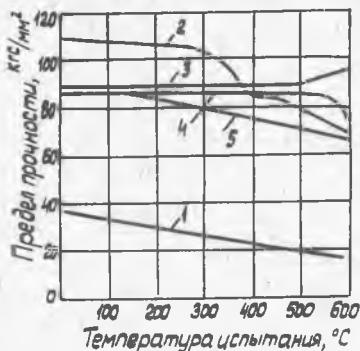
4.1. М е т а л л о г р а ф и ч е с к и й а н а л и з

С помощью этого метода выявляются грубые несплошности (в некоторых случаях и микропоры) в зоне соединения, отличия в форме и размере зерна, миграция границы раздела, образование новых фаз в контакте промежуточной прослойки со сталью и жаропрочным сплавом. Однако возможности метода ограничены: можно проконтролировать лишь отдельные участки соединения, разрешающая способность его не позволяет выявить дефекты размером менее 1 мкм. В связи с этим металлографический анализ хотя и является обязательным элементом контроля качества имеет вспомогательное значение и используется как дополнительный к методам прямого определения механических свойств.

4.2. О п р е д е л е н и е п р е д е л а к р а т к о в р е м е н н о й п р о ч н о с т и в з а в и с и м о с т и о т т е м п е р а т у р ы и с п ы т а н и я

Механические испытания образцов на растяжение, выполняемые при комнатной температуре, могут служить для определения приближенных значений параметров режима сварки. Однако такие испытания еще не позволяют сделать заключение о работоспособности соединения в условиях эксплуатации.

Температура эксплуатации конструкций из жаропрочных сплавов, как правило, находится в пределе 350–600⁰С. Поэтому для оценки работоспособности соединения целесообразно проведение испытаний в диапазоне этих температур. Результаты сравнительных испытаний даны на рис. 15.



Р и с. 15. График зависимости кратковременной прочности материалов и сварного соединения от температуры: 1-никель НП-2; 2-сталь; 3-жаропрочный сплав; 4-сварное соединение (эксперимент); 5-сварное соединение (расчет)

отражается на прочностных свойствах прослойки и всего сварного соединения. Эффект контактного упрочнения "мягкой" прослойки, а также диффузионный массообмен в контакте свариваемых материалов способствуют формированию переходной зоны, не уступающей по прочности жаропрочному сплаву как при комнатной, так и при температуре эксплуатации.

Как можно видеть из графика, прочность жаропрочного сплава практически не меняется во всем диапазоне температур испытания. Прочность же стали заметно снижается, начиная с 300°C. Никель НП-2, который используется в качестве промежуточной прослойки при сварке, при температурах эксплуатации имеет прочность, не превышающую 20 кгс/мм². Однако это не снижает прочностные характеристики сварного соединения в целом. Повышение прочности "мягкой" промежуточной прослойки объясняется эффектом контактного упрочнения. Совместная работа разнородных частей соединения приводит при нагружении составного образца к возникновению в прослойке стесненной деформации и сложного напряженного состояния, что

4.3. Испытания сварного соединения на длительную прочность

Испытания на ползучесть и длительную прочность являются в настоящее время одним из наиболее достоверных методов оценки прочностных свойств жаропрочных материалов. Если лимитирующим фактором для надежной работы конструкции является опасность разрушения детали, то критерием прочности служит время до разрушения при заданном напряжении и температуре или предел длительной прочности - напряжение, вызывающее при заданной температуре разрушение за заданное время.

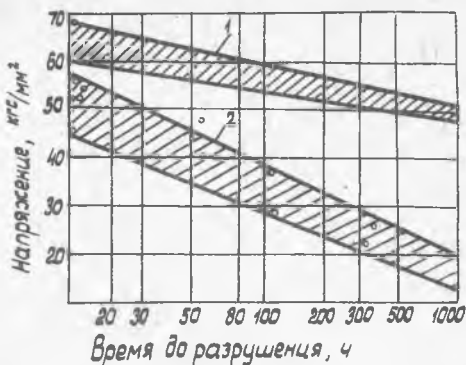
Результаты исследования длительной прочности сварного соединения жаропрочного сплава со сталью при температуре 500°C показаны на рис. 16. Испытания проводились на 14 образцах. Для сравнительной оценки на графике даны результаты испытаний на длительную прочность стали.

Анализ экспериментальных данных показывает, что предел длительной прочности сварного соединения существенно снижается с увеличением времени испытаний по сравнению со сталью.

Так, для времени испытания, равного 10–12 часам, предел длительной прочности сварного соединения не ниже 0,8 от предела длительной прочности стали и составляет 52–54 кгс/мм². При времени испытания более 200 часов предел длительной прочности сварного соединения составляет не более 0,4–0,6 от длительной прочности стали, а полное относительное удлинение образцов при испытаниях составляет не более 2–2,5%, что не превышает удлинение образцов из стали при температуре 500°C . Разрушение сварных образцов при этом происходит по прослойке никеля, причем следы материала прослойки остаются как на жаропрочном сплаве, так и на стали.

Следовательно, наличие мягкой прослойки в зоне сварки снижает длительную прочность сварного соединения. Хотя в процессе сварки и последующей термической обработки в результате легирования компонентами свариваемых материалов происходит упрочнение прослойки никеля, ее механические характеристики (микротвердость, например) все-таки существенно ниже, чем у соединяемых материалов. Это можно объяснить тем, что при температуре 500°C происходит возврат механических свойств никелевой прослойки к исходным, и, как следствие, эффект контактного упрочнения тонкой прослойки снижается.

Однако следует отметить, что время работы сварных узлов из

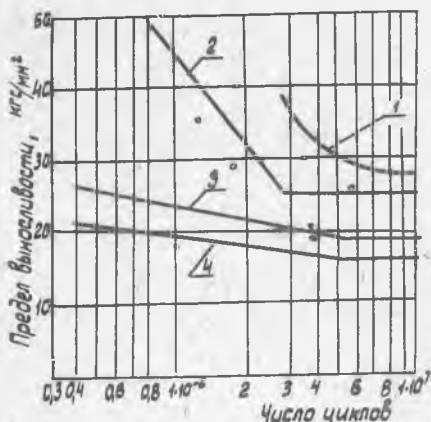


Р и с. 16. График зависимости прочности от времени испытания при 500°C : 1 - сталь; 2 - сварное соединение

данного сочетания материалов (роторы малогабаритных турбин и другие подобные узлы) не превышает 10–15 часов. В таком диапазоне времени испытаний длительная прочность сварного соединения достаточно высока и составляет не менее 50 кгс/мм², т.е. 0,8 от предела длительной прочности стали, и значительно превышает расчетные нагрузки сварного соединения.

4.4. Экспериментальная оценка выносливости сварного соединения

Сварные узлы авиационных ГТД работают в условиях динамических знакопеременных нагружений. В связи с этим усталостные испытания позволяют получить более полное представление, чем статические, о работоспособности сварного соединения в условиях эксплуатации. При стандартном испытании на усталость при симметричном цикле нагружения необходимо испытывать серию или выборку образцов (не менее 10 шт.) для построения кривой Велера при данной постоянной температуре.



Р и с. 17. Зависимость предела выносливости сварного соединения и основного материала от числа циклов: 1—жаропрочный сплав при 500°C; 2—жаропрочный сплав при 20°C; 3—сварное соединение при 20°C; 4—сварное соединение при 500°C

Результаты статистической обработки кривых Велера для жаропрочного сплава и сварного соединения приведены на рис. 17. Анализ экспериментальных данных показывает, что предел выносливости сварного соединения жаропрочного сплава со сталью составляет на базе 10⁷ циклов $\sigma_{-1} = 18,5$ кгс/мм², а для жаропрочного сплава 25 кгс/мм². Таким образом, выносливость сварного соединения составляет 74% от предела выносливости жаропрочного сплава. Повышение температуры до рабочей, равной 500°C, приводит к незначительному снижению предела выносливости сварного соединения до $\sigma_{-1} = 16$ кгс/мм², т.е. на 13,5% по сравнению с пределом вынос-

ливости соединения при 20°C.

Очевидно, наличие границы сварного соединения, ориентированной перпендикулярно продольной оси образца, уже является концентратором, снижающим выносливость по сравнению с монолитным образцом. Существенно отличающиеся свойства соединяемых материалов жаропрочного сплава и стали и использование "мягкой" прослойки чистого никеля определяют физико-механическую неоднородность переходной зоны диффузионного соединения. Наличие указанной неоднородности в зоне сварного шва является причиной снижения выносливости сварного соединения в целом. Однако в интервале рабочих температур выносливость сварного соединения на базе 10^7 циклов достаточно высока и составляет порядка 70% от предела выносливости основного материала жаропрочного сплава. Таким образом, по сравнению с основным материалом сварное соединение обладает значительно меньшей чувствительностью к усталостным трещинам и большей пластичностью, что является существенным преимуществом диффузионного соединения с "мягкой" промежуточной прослойкой в условиях эксплуатации при динамических циклических нагружениях.

Анализируя в целом прочностные характеристики диффузионных соединений жаропрочных сплавов со сталями, можно сделать заключение, что с помощью диффузионной сварки в вакууме возможно формирование зоны соединения, отвечающей основным требованиям эксплуатации сварных конструкций из этих сочетаний материалов. Однако необходимо отметить, что комплексные испытания, проведенные на образцах, хотя и позволяют сделать оценку работоспособности сварного соединения в условиях эксплуатации, но полностью не отражают характер нагружения, величину нагрузок, влияние окружающей среды и других факторов, воздействующих на реальную конструкцию. Поэтому окончательная количественная оценка надежности сварного соединения возможна только после стендовых и натурных испытаний в составе действующего изделия.

5. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ И КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЯ

Одним из главных факторов, влияющих на качество сварного соединения (см. рис. 14), является стабильность основных параметров режима сварки. Ориентировочные режимы сварки жаропрочных сплавов между собой и с износостойкими сплавами, а также жаропрочных сплавов со сталями, даны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Ориентировочные режимы сварки

Материалы	$T_{св}$ °C	$D_{сж}$ кгс/мм ²	$\tau_{св}$ мин.	V мм рт.ст.	R_a мкм	Толщина на просл. № мм
Жаропрочный сплав + жаропрочный сплав	1120-1130	3-4	15-17	10^{-4} - 10^{-5}	0,20	-
Жаропрочный сплав + износостойкий сплав	1050-1100	1,5-2	15-20	10^{-4} - 10^{-5}	0,20	0,05
Жаропрочный сплав + сталь	1100-1120	1-1,2	15-20	10^{-4} - 10^{-5}	0,2	0,05- -0,1

Диффузионная сварка - процесс, протекающий во времени, достаточном, чтобы с необходимой точностью проконтролировать пооперационно его технологические параметры. Такой пооперационный контроль является достаточно объективной гарантией качества получаемого сварного соединения.

Пооперационный контроль технологических параметров режима ДСВ можно представить в виде следующих этапов:

1. Обеспечение требуемой чистоты обработки свариваемых поверхностей выбранным видом обработки и режимов ее, осуществление контроля чистоты поверхности профилометрированием.

2. Контроль степени разряжения (глубина вакуума) в сварочной камере установки в процессе сварки с помощью вакуумметра ВИТ-1АП или другого типа, обеспечивающего измерение вакуума в пределах 10^{-3} - 10^{-5} мм рт. ст.

3. Контроль температуры нагрева, изотермической выдержки и охлаждения свариваемых деталей хромель-алюмелевыми термопарами.

Головки термоспар крепятся на расстоянии 1,5-2 мм от свариваемых поверхностей обеих деталей. Измерение температуры в процессе сварки контролируется приборами КСП-4 (группа ХА). Можно также использовать прибор ЭПЦ-09 той же градуировки ХА. В серийном производстве целесообразно применять бесконтактный метод измерения температуры сварного стыка. Для этой цели можно использовать серийно выпускаемый прибор фотоэлектрический пирометр-регулятор ФПР-8.

4. Подача сварочного давления, прикладываемого к деталям в момент достижения температуры сварки с помощью гидропривода, оснащенного регулятором давления. Контроль давления масла в гидросистеме осуществляется образцовым манометром модели 1231, ГОСТ 6521-60.

Основные технологические параметры процесса: температуру сварки, давление сжатия, время сварки и глубину вакуума - необходимо фиксировать на самопишущих приборах.

С помощью известных методов неразрушающего контроля (ультразвуковой, электросопротивлением и др.) невозможно определить качество соединения, полученного диффузионной сваркой, ввиду их недостаточной чувствительности к дефектам шва, характерным для этого вида сварки.

Однако экспериментально доказано, что о качестве шва можно судить косвенно, не разрушая сварного соединения. За критерий качества при этом принимается величина относительной деформации стального вала в зоне стыка в случае сварки роторов, а при армировании бандажных полок лопаток - величина деформации армирующей пластинки из износостойкого сплава, материала более пластичного, чем материал самой лопатки.

Установлено (см. рис. 10), что оптимальная величина относительной деформации, при которой гарантируется заданная прочность сварного соединения, находится в пределах 8-12%. Относительная деформация пересчитывается с помощью индикатора (см. рис. 8). Окончательный контроль величины остаточной деформации проводится после сварки по извлечению узла из сварочной камеры.

Другим свидетельством качества сварного соединения без его разрушения является степень термовакuumной очистки в зоне стыка свариваемых деталей. При строгом соблюдении режима сварки (температура, вакуум) высота зоны термовакuumной очистки при сварке роторов должна составлять 5-7 мм от стыка на жаропрочном сплаве и 10-15 мм на стальном валу.

Наиболее эффективным способом контроля качества сварного соединения являются механические испытания сварного узла на растяжение контрольной нагрузкой, составляющей 25% от разрушающей нагрузки.

Для выявления возможности появления горячих трещин в зоне сварки, сварной узел после окончательной механической и термической обработки подвергается контролю методом ЛЮМ-А.

Имеющийся практический опыт эксплуатации показал целесообразность и технико-экономическую эффективность привлечения диффузионной сварки в вакууме для решения проблемы получения надежных неразъемных соединений в конструкциях ГТД.

Л и т е р а т у р а

1. К а з а к о в Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. - М.: Машиностроение, 1976, с. 310.
2. С и м с Ч., Х а ч е л ь В. Жаропрочные сплавы. - М.: Металлургия, 1976, с. 386.
3. М у с и н Р.А. и др. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов. - М.: Металлургия, 1979, с. 207.

Предисловие	5
I. Особенности формирования соединений при диффузионной сварке	4
I.1. Механизм образования диффузионного соединения	4
I.2. Стадии образования диффузионного соединения	11
I.3. Технологические параметры ДСВ и этапы цикла сварки	11
2. Свойства жаропрочных сплавов на основе никеля	14
2.1. Требования к материалам	14
2.2. Физико-механические характеристики	14
2.3. Химический состав, структура и фазовые соотношения	16
3. Сварка жаропрочных сплавов между собой и с другими материалами	17
3.1. Сварка жаропрочных сплавов типа ЖС6	17
3.2. Сварка жаропрочных сплавов с износостойкими сплавами	19
3.3. Сварка жаропрочных сплавов со сталями	22
4. Комплексные испытания диффузионных соединений жаропрочных сплавов со сталями	26
4.1. Металлографический анализ	27
4.2. Определение предела кратковременной прочности в зависимости от температуры испытания	27
4.3. Испытания сварного соединения на длительную прочность	28
4.4. Экспериментальная оценка выносливости сварного соединения	30
5. Контроль технологических параметров режима сварки и качества соединения	32
Литература	34

Иван Сергеевич Гришин

ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ МЕЖДУ СОБОЙ
И С КОНСТРУКЦИОННЫМИ СТАЛЯМИ

конспект лекций

Редактор Л. С о к о л о в а
Техн. редактор Н. К а л е н ъ к
Корректор Е. А я т о н о в а

Подписано в печать 24.03.81 г. Б003799.
Формат 60x84 1/16. Бумага писчая белая.
Оперативная печать. Усл.п.л. 2,2. Уч.-изд.л. 2.1.
Тираж 500 экз. Заказ № 3181 Цена 10 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С.П.Королева, г.Куйбышев,
ул. Молодогвардейская, 151.

Областная типография имени В.П.Мяги, г. Куйбышев,
ул. Венцека, 60.