

И.С.Гришин, Д.В.Самородов, А.А.Прохоров, П.А.Бордаков

ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ  
С ВЫСОКОПРОЧНЫМИ СТАЛЯМИ

Соединение жаропрочных сплавов между собой и со сталями – одна из наиболее сложных проблем современной сварочной науки и техники. При выборе способа сварки необходимо исходить из требований к сварным соединениям, учитывающих физико-механические свойства соединяемых материалов, конструкцию и особенности эксплуатации. Жаропрочные сплавы отличаются повышенной склонностью к трещинообразованию и свариваются тем труднее, чем сложнее их химсостав и чем более они жаропрочны. Конструкционные узлы и детали из таких материалов, как правило, работают в условиях совместного воздействия высоких температур и знакопеременных нагрузок, агрессивных жидкостей и газов, ударного нагружения и т.д.

Как показали исследования [1] и производственный опыт, сварка плавлением не обеспечивает необходимых требований, предъявляемых к сварным соединениям в конструкциях из жаропрочных сплавов. При любом из способов сварки плавлением происходит оплавление свариваемых кромок и перегрев материала в зоне термического влияния выше температуры закалки ( $> 1200^{\circ}\text{C}$ ). Это приводит к неизбежным структурным изменениям в металле шва и околошовной зоне, что вызывает потерю жаропрочности. Литейная усадка металла шва в условиях неравномерного нагрева и действия сварочных напряжений приводят к появлению локальных очагов разрушения и трещинообразованию в зоне сварки.

Известные способы пайки также не могут быть рекомендованы для получения высокопрочных и термостойких соединений из жаропрочных сплавов [2]. Наличие литого промежуточного слоя припоя, физико-механические характеристики и жаропрочность которого заведомо ниже свойств основного материала, снижает термомеханическую надежность конструкции. Применение тугоплавких припоев ( $T_{пл} > 1200^{\circ}\text{C}$ ) приводит к необходимости нагрева паяемого узла выше температуры закалки сплава, что влечет за собой ухудшение характеристик соединения и, прежде всего, его жаропрочности.

Для решения проблемы соединения жаропрочных сплавов между собой и со сталями целесообразно привлекать методы сварки в твердом состоянии и, прежде всего, диффузионную сварку в вакууме (ДСВ), которая позволяет получать высокопрочные прецизионные соединения самых различных материалов [3]. Диффузионная сварка выполняется при температурах  $(0,7 - 0,8) T_{пл}$  материала, поэтому нагрев не сопровождается фазовыми и структурными превращениями в зоне соединения. Давление сжатия не превышает предела текучести более пластичного из соединяемых материалов, следовательно, остаточная макропластическая деформация сварного узла ограничена.

Для отыскания области оптимальных режимов и разработки технологии ДСВ жаропрочных сплавов между собой и со сталями был проведен комплекс исследований по специально разработанным методикам. В качестве объекта исследования были взяты жаропрочные сплавы на никелевой основе типа ЖС и ВЖЛ, свойства которых достаточно полно описаны в работах [4], а также легированные конструкционные стали ЭИ96Г и 45Х. В ходе экспериментальных исследований на специальных опытных образцах изучалось влияние основных параметров ДСВ на прочностные характеристики сварного соединения. При этом ставилось условие - получить высокопрочное соединение с минимально возможной общей пластической деформацией свариваемых деталей.

Процесс отыскания оптимального режима ДСВ методически можно разделить на два этапа. На первом этапе выбирается диапазон изменения параметров режима, а на втором этапе путем традиционного эксперимента или с помощью математического планирования определяется оптимальное значение параметров режима. Технологические параметры делятся на две группы: качественные, определяющие исходные условия ДСВ, - способ и класс обработки соединяемых поверхностей, материал и толщина прослойки; и количественные, связанные с работой используемого оборудования - температура процесса  $T_{св}, ^\circ C$ , удельное давление сжатия  $P_{сж}$ ,  $кГ/мм^2$ , время изотермической выдержки  $\tau_{св}$ , мин, глубина вакуума  $B$ , мм рт.ст. Конкретные величины параметров определяются с учетом кинетических особенностей формирования соединения, физико-механических свойств исследуемых материалов и эксплуатационных требований к натурным узлам.

Проведенный анализ позволил определить диапазон изменения параметров ДСВ для соединения жаропрочных сплавов между собой и случая сварки со сталями. Результаты анализа приведены в табл. I.

Т а б л и ц а I

Материалы	$T_{св}$ °C	$P_{сж}$	$\tau_{св}$	$B$	Способ подготов- ки по- верхнос- ти	Толщина никелевой прослойки, мм
Жаропр.сплав+ жаропр.сплав	900-II150	2-5	10-20	$10^{-3}$ - $10^{-5}$	Шлифова- ние	0,02-0,05
Жаропр.сплав+ сталь	I000- II150	0,5- 2	5-20	$10^{-5}$	Шлифова- ние Чистовое точение	0,05-0,1

Эксперименты по определению оптимального режима процесса сварки жаропрочных сплавов между собой проводились традиционным путем - исследуемый параметр изменялся в выбранном диапазоне, а остальные фиксировались на определенном уровне. Так как одним из требований к сварке натуральных узлов было полное исключение общих пластических деформаций в зоне соединения, то в качестве критерия оптимизации режима ДСВ выбран только предел прочности сварного соединения при комнатной температуре, определяемый при испытаниях на растяжение.

Как показали предварительные опыты по сварке жаропрочных сплавов со сталями, для получения качественного соединения необходима некоторая пластическая деформация в приконтактной зоне более мягкого материала (стали). Критерием оптимизации режима в таком случае являются уже два взаимосвязанных фактора - прочность соединения и величина оптимальной деформации детали. При этом оптимальным считается такой режим, при котором возможно получить соединение с необходимой прочностью и минимально допустимой для данного сочетания материалов деформацией детали. Решить эту задачу в полной мере с помощью обычного традиционного эксперимента практически невозможно. Хорошие результаты дает методы математического планирования эксперимента, позволяющие не только сократить количество трудоемких опытов, но и получить более полную и достоверную информацию об изучаемом процессе [5], [6].

В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований по определению области оптимальных режимов ДСВ изучаемых материалов на модельных образцах.

Т а б л и ц а 2

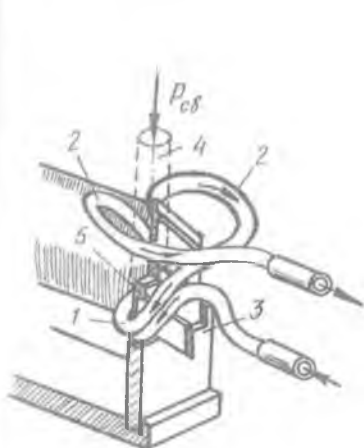
Материалы	$T_{об}$ °C	$P_{ож}$ кг/мм <sup>2</sup>	$T_{об}$ мин	$B$ мм рт.ст
Жаропр.сплав+ жаропр.сплав	1070-1100	3 - 4	15 - 17	10 <sup>-5</sup>
Жаропр.сплав+ сталь	1100-1120	1 - 1,2	15 - 20	10 <sup>-5</sup>

Для выявления качества и работоспособности сварных соединений образцы, сваренные на оптимальных режимах, испытывались в диапазоне рабочих температур. Испытания показали, что прочность соединений составляет не менее 0,8-0,9 от прочности исследуемых материалов. Разрушение в стыке, как правило, носит объемный характер с вырывом основного материала. Следует отметить, что при сварке жаропрочных сплавов между собой такие результаты достигаются при отсутствии заметных макропластических деформаций, а при сварке их со сталями деформация не превышала 4-6%.

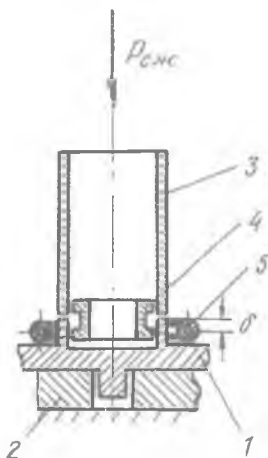
Металлографические исследования зоны соединения свидетельствуют об отсутствии дефектов. Введение никелевой прослойки в контакт между свариваемыми материалами благоприятно сказывается на формировании переходной зоны. Прослойка никеля является барьером к возникновению новых хрупких фаз и способствует более равномерному перераспределению элементов в зоне диффузионного взаимодействия. Для выявления характера и направления взаимной диффузии в процессе длительной изотермической выдержки и влияния ее на прочность соединения сваренные образцы подвергались вакуумному отжигу. Было выявлено, что отжиг приводит к некоторому расширению зоны диффузионного взаимодействия, более плавному переходу никелевого прослоя к основному материалу и выравниванию концентрации взаимодействующих компонентов. Однако, как показали испытания, отжиг не приводит к существенному увеличению прочности соединения, но, что очень важно, в значительной мере способствует ее стабильности при высокотемпературных испытаниях.

На основании экспериментальных исследований разработана технология ДСВ жаропрочных сплавов между собой и со сталями применительно к конкретным конструкциям натурных узлов ГТД.

В конструкциях из жаропрочных сплавов, при условии их взаимного контактирования в процессе эксплуатации, наблюдается активное изнашивание материала в зоне контакта, что приводит к снижению общетехнического ресурса изделия. В этих случаях целесообразно армировать контактные поверхности сплавами, обладающими более высокими показателями по твердости и износостойкости. На рис. 1



Р и с.1. Схема армирования бандажных полок лопаток: 1-сварочное приспособление; 2-лопатка; 3-бандажная полка; 4-армирующая пластинка; 5-давящий шток



Р и с.2. Схема сварки натуральных узлов: 1-колесо турбины; 2-центрирующие приспособление; 3-вал колеса; 4-технологическое кольцо; 5-индуктор

показана схема армирования бандажных полок лопаток методом ДСВ с использованием высокочастотного нагрева. Приспособление I обеспечивает фиксацию и центрирование лопатки 2 в сварочной камере. На бандажную полку 3 лопатки приваривается армирующий элемент 4 - пластинка из более износостойкого сплава, чем материал лопатки. Усилие сжатия при сварке передается с помощью давящего штока 5. Специально сконструированный индуктор 6 обеспечивает локальный нагрев зоны сварки.

Разработанная на базе проведенных исследований технология армирования бандажных полок элементами из более износостойких сплавов позволяет повысить, по сравнению с другими применяемыми методами армирования, надежность и ресурс лопаток ГТД.

Рабочие колеса малогабаритных турбин изготавливают из жаропрочных литейных сплавов отливкой в керамические формы. Существующая технология литья исключает возможность получения цельнолитой конструкции колеса с валом, поэтому вал вытачивается из высокопрочной стали отдельно от колеса.

Соединение колеса с валом с помощью диффузионной сварки показано на рис. 2. Колесо 1 устанавливается в камере с помощью центрирующего отверстия приспособления 2. Для точной сборки колеса с валом 3 применяется стальное технологическое кольцо 4. Кольцо вставляется по свободной посадке и имеет цилиндрическую проточку, обеспечивающую нестесненное формоизменение (осадку) деталей в зоне контактирования. Индуктор 5 смещен относительно плоскости стыка на ступицу колеса. Это вызвано необходимостью более интенсивного термомеханического воздействия на жаропрочный сплав с целью активации контактной поверхности и, следовательно, облегчения условий диффузионного взаимодействия. В то же время, излишний разогрев стального вала может привести к недопустимому деформированию его под действием сжимающих усилий.

Предложенная технология ДСВ жаропрочных сплавов со сталями позволила получить сварные соединения роторов, отвечающие эксплуатационным требованиям, что подтверждено испытаниями натуральных узлов в составе работающих изделий. Экономический эффект от внедрения разработанной технологии только на одном предприятии превысил 200 тыс. руб.

## Л и т е р а т у р а

1. М е д о в а р Б.И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М., "Машиностроение", 1966.
2. Л а ш к о Н.Ф., Л а ш к о С.В. Пайка металлов. М., "Машиностроение", 1967.
3. К а з а к о в Н.Ф. Диффузионная сварка металлов. М., "Машиностроение", 1976.
4. Х и м у ш и н Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М., "Металлургия", 1969.
5. Н а л и м о в В.В. Теория эксперимента. М., "Наука", 1971.
6. Г р и ш и н И.С., К о п ы л о в Ю.Н., М е д н и к о в В.А. Математическое моделирование процессов диффузионной сварки. Труды КуАИ, 1974.