

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УСТРАНЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНЫХ АГРЕГАТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.А. Новиков, В.В. Овчинников



НОВИКОВ
Виктор Алексеевич

Начальник управления гарантийного ремонта и продления ресурса авиационной техники ФГУП «Российской самолетостроительной корпорации «МиГ». Специалист в области технологии ремонта летательных аппаратов. Автор 20 научных работ и 8 изобретений.

В последние два десятилетия основными направлениями существенного повышения аэродинамического качества летательных аппаратов, в частности, истребителей четвертого поколения являются снижение сопротивления трения и использование элементов фюзеля-



ОВЧИННИКОВ
Виктор Васильевич

Профессор, доктор технических наук, академик Международной академии информатизации. Ведущий специалист по сварке ФГУП «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Основное научное направление деятельности – разработка методов и технологических средств получения качественных сварных соединений при изготовлении ответственных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов. Автор более 220 научных работ, в том числе авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Введение

Технология изготовления деталей, узлов и самолетов в целом во многом определяет ресурс изделия в эксплуатации. Наряду с этим важным фактором повышения срока эксплуатации изделия является совершенствование технологии устранения эксплуатационных повреждений летательных аппаратов.

© Новиков В.А., Овчинников В.В., 2006

ляжа для создания дополнительной подъемной силы. Это повлекло за собой появление в конструкции летательных аппаратов высоконагруженных топливных агрегатов, к которым крепятся крылья, основные стойки шасси, элементы фюзеляжа (кабина пилота, хвостовая часть корпуса и т.д.).

Для создания таких топливных агрегатов нашла применение каркасно-панельная концепция сборки. Согласно этой концепции силовой каркас агрегата формируется за счет элементов поперечного силового набора (шпангоуты) и продольного силового набора (балки и лонжероны). Шпангоуты соединяются посредством ручной аргонодуговой сварки с элементами продольного силового набора. Замкнутый объем топливного агрегата, необходимый для размещения топлива, образуется при вварке панелей автоматической аргонодуговой сваркой в проемы каркаса самолета. Для изготовления топливных агрегатов наиболее часто применяют высокопрочную нержавеющую сталь ВНС-2.

На рис. 1 приведена компоновочная схема топливных отсеков планера самолета МиГ-29.

Опыт эксплуатации парка самолетов МиГ-29 в России и в ряде зарубежных государств показал, что на силовых элементах их каркаса

возможно возникновение трещин и сколов. Кроме того, при боевом применении самолета возможно его поражение снарядами и осколками снарядов зенитной артиллерии. В последнем случае наиболее частыми дефектами являются вырывы на полках и пробоины в полотне шпангоутов.

Для устранения данных повреждений применяется наплавка и подварка, выполняемая ручной аргонодуговой сваркой. Подварка дефектов в сварных соединениях из стали ВНС-2 согласно действующим производственным инструкциям разрешается, хотя и с известными ограничениями. В то же время подварка дефектов в виде пробоин должна производиться в местах, где по условиям конструкции не предусмотрено наличие сварного шва или наплавленного металла. Можно предположить, что работоспособность восстановленного элемента будет понижена, поскольку коэффициент прочности сварного соединения стали ВНС-2 составляет примерно 0,85–0,90. Одновременно в материале появляется структурная, химическая и механическая неоднородность. Степень неоднородности предположительно зависит от размеров наплавки и сечения детали в зоне наплавки.

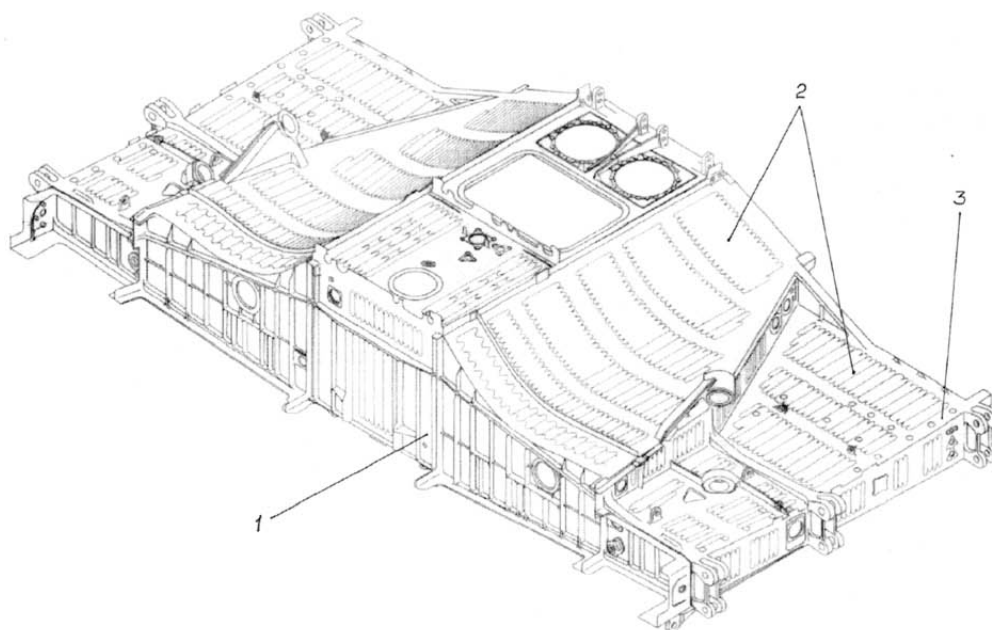


Рис. 1. Компоновочная схема топливных отсеков планера самолета МиГ-29:

1 – шпангоуты; 2 – панели; 3 – лонжероны

В данной работе приводятся результаты исследования влияния наплавки на структуру и механические свойства основного материала.

Результаты механических испытаний образцов

Исследование проводили на пластинах из стали ВНС-2 толщиной 14 мм. Наплавку производили ручной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом с применением присадочной проволоки марки ЭП410у. В качестве электрода использовали лантанированный вольфрамовый пруток диаметром 2,5 мм. Зоны дуги и сварочной ванны защищались аргоном марки А.

Пластины подвергались полной термической обработке до достижения предела прочности $\sigma_B = 1350$ МПа: закалке при температуре 950°C с выдержкой в течение 1 ч и старению при температуре 450°C и выдержке в течение 1 ч. Затем пластины механически обрабатывали до определенных размеров, указанных на рис. 2.

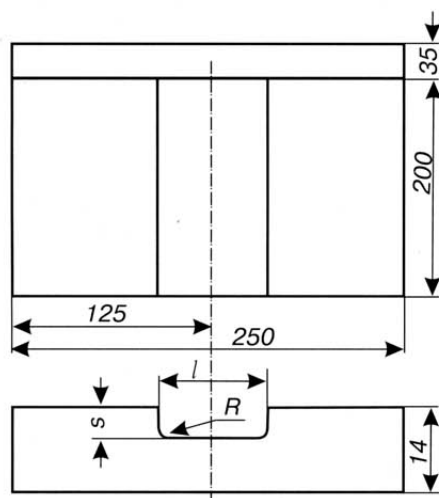


Рис. 2. Заготовка пластины для образцов на статическое растяжение: s – глубина канавки; l – ширина канавки; R – радиус разделки

Поскольку глубина и ширина дефекта могут быть различны, предусмотрен разный объем наплавки (табл. 1).

После наплавки пластины подвергали магнитному и рентгеновскому контролю. Результа-

ты контроля выявили наличие в наплавке единичных включений и пор, но трещины отсутствовали. После магнитного и рентгеновского контроля наплавки пластины разрезали на образцы для механических и металлографических испытаний.

Таблица 1

Параметры экспериментальных пластин

Номер пластины	R , мм	l , мм	s , мм	Площадь наплавленного металла, мм ²
1	8	30	6	216
2	8	50	6	378
3	8	30	9	324
4	8	50	9	567
5	8	30	12	432
6	8	50	12	756
7	8	100	6	720

Испытания на ударную вязкость проводили на образцах с канавкой, прорезанной как со стороны наплавки, так и со стороны основного металла. Результаты механических испытаний на статическое растяжение и на ударную вязкость представлены в табл. 2.

Предел прочности σ_B основного материала составлял примерно 1225–1250 МПа при ударной вязкости 130–208 кДж/м². У наплавленных образцов пластин 1–3 снижение значения σ_B по сравнению с основным материалом было незначительное. С увеличением объема наплавленного металла в образцах увеличивается разница в пределе прочности σ_B между основным материалом и материалом с наплавкой: наибольшее снижение наблюдается в пластинах 4 и 6 с наибольшей величиной наплавленной зоны.

Следует отметить, что разрушение всех испытанных на разрыв образцов произошло по наплавленному металлу, в большинстве случаев – по границе наплавленного металла, где имеются участки металла с пониженной твердостью (рис. 3).

При испытании пластин 1 и 2 разница в значениях ударной вязкости в зависимости от места надреза незначительна.

В случае, когда все рабочее сечение образца, предназначенного для испытания на

Таблица 2

Влияние площади наплавленного металла
на предел прочности и ударную вязкость стали ВНС-2

Номер пластины	Параметры образцов			Площадь наплавленного металла, мм ²	σ_b , МПа	a_n , кДж/м ²	
	R , мм	l , мм	s , мм		наплавленного металла	по наплавленному металлу	по основному металлу
1	8	30	6	216	1245	150	151
2	8	50	6	378	1223	133	136
3	8	30	9	324	1170	140	123
4	8	50	9	567	1072	123	68
5	8	30	12	432	1160	107	102
6	8	50	12	756	840	138	102
7	8	100	6	720	1198	–	–

Примечание. Данные приведены по результатам испытаний десяти образцов на каждый вариант (номер пластины).

ударную вязкость, составляет наплавленный металл (пластины 3, 4 и 6), при надрезе, сделанном у основания наплавки, имеет место более низкая ударная вязкость a_n , чем при надрезе в верхней части наплавки. Это снижение можно объяснить старением нижних слоев наплавленного металла при выполнении последующих слоев, а также ростом зерна вблизи линии сплавления с последующими слоями.

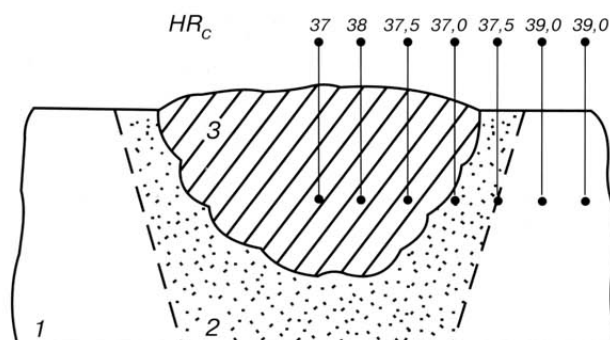


Рис. 3. Распределение твердости в наплавленном образце пластины 1: HR_c — твердость по Роквеллу; 1 — основной металл; 2 — зона термического влияния; 3 — наплавленный металл

Во всех случаях значение ударной вязкости металла a_n в наплавленных образцах ниже, чем у основного материала: разброс значений ударной вязкости на некоторых наплавленных образцах намного больше, чем, например, на пластине 4 (табл. 3).

Практически во всех случаях значение ударной вязкости не наблюдалось меньше мини-

мально допустимого по техническим условиям для сварных швов (для швов на стали ВНС-2 $a_n > 70$ кДж/м²).

Таблица 3

Ударная вязкость a_n , кДж/м² металла наплавленного образца при различном расположении надреза

Основной металл	Расположение надреза		
	со стороны основного металла	со стороны наплавленного металла	перпендикулярно оси шва
248	108	112	107

Примечание. Данные приведены по результатам испытаний десяти образцов на каждый вариант (номер пластины).

Значение твердости в наплавленном металле колеблется в незначительных пределах (1–2 единицы по Роквеллу). На границе перехода наплавленного металла к основному во всех образцах наблюдается снижение твердости до $HR_c = 35$ – 36 ед. ($\sigma_b = 1210$ – 1230 МПа) при твердости средней части наплавленного металла $HR_c \approx 30$ ед. ($\sigma_b \approx 1300$ МПа) и твердости основного материала $HR_c \approx 39$ ед. ($\sigma_b \approx 1350$ МПа).

В табл. 4 представлены механические свойства наплавленных образцов с 50 %-ной толщиной наплавки, из которых видно, что как по прочностным, так и по пластическим свойствам наплавленные образцы уступают основному материалу.

Таблица 4

Механические свойства образцов
с 50% толщиной наплавки

Образец	Номер пластины	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	a_n кДж/м ²
Основной металл	2	1215	1180	16,9	130
Образцы наплавленные	1	1095	–	6,3	111
	2	1135	1100	8,1	117
	3	1135	1085	10,0	108
	4	1110	1065	8,8	107

Результаты анализа макроструктуры материала

Исследование макроструктуры наплавленных образцов показало хорошее сплавление материала наплавки с подложкой, однако, как и следовало ожидать, появляется резко выраженная структурная неоднородность (рис. 4 и рис. 5).

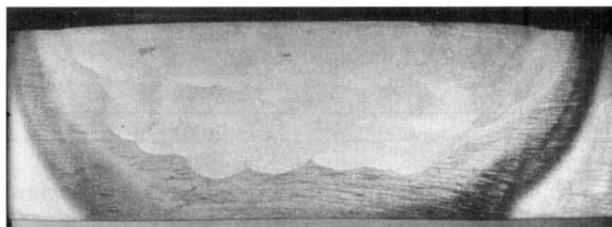


Рис. 4. Макроструктура сварного шва при ширине и толщине наплавки соответственно 30 мм и 9 мм (2-кратное увеличение)

Структура центральной зоны верхней части наплавленного металла представляет собой наиболее равномерно расположенные равноосные дендриты (см. рис. 5, а). С приближением к линии сплавления с основным металлом дендриты становятся более вытянутыми и ориентированными нормально к линии сплавления. Со стороны основного металла в пограничной области имеется участок с увеличенным размером зерна и утолщенными границами, по-видимому, с карбидными образованиями (см. рис. 5, б).

По мере удаления от зоны высокотемпературного нагрева (см. рис. 5, в) размеры зерен и толщина их границ постепенно уменьшаются, интенсивность полос карбидных образований

возрастает и в зоне повышенной травимости достигает максимума, которая характеризуется выпавшими карбидами, как по границе зерен, так и внутри их (см. рис. 5, г). Эта зона, как известно, является местом, в котором при наличии агрессивной среды протекает процесс межкристаллитной коррозии, а при совместном воздействии агрессивной среды и напряжений возможно коррозионное растрескивание

За карбидной зоной структура по размеру зерен, текстуре материала и интенсивности травления соответствует основному материалу (см. рис. 5, д). Исчезают и карбидные образования.

Важно отметить проявление механической неоднородности образцов в зоне наплавки, причем прочность металла в различных зонах неодинакова (см. рис. 5).

На макрошлифах были определены основные размеры наплавки (ширина l и толщина s), которые значительно превышают размеры выборки дефекта (табл. 5).

Таблица 5

Размеры выборки, наплавки и зоны термического влияния

Номер плиты	Размеры, мм					
	выборки		наплавки		зоны термического влияния	
	l_B	s_B	l	s	l_T	s_T
1	30	6	40	9	55	Вся толщина образца
2	50	6	55	8	75	
3	30	9	43	12	53	
4	50	9	53	11	85	
5	30	12	45	14,5	65	
6	50	12	66	13,5	90	

Зона термического влияния наплавки, таким образом, в 1,5–2 раза превосходит величину выборки по ширине; при этом практически всю толщину занимают зоны термического влияния наплавки. Даже при минимальной глубине разделки дефекта, равной 6 мм (при толщине пластин около 15 мм), 60 % толщины сечения приходится на материал наплавки, а остальное – на зоны термического влияния. Таким образом, в сечении пластины в зоне наплавки вместо основного материала имеет место материал с отмеченной ранее структурой

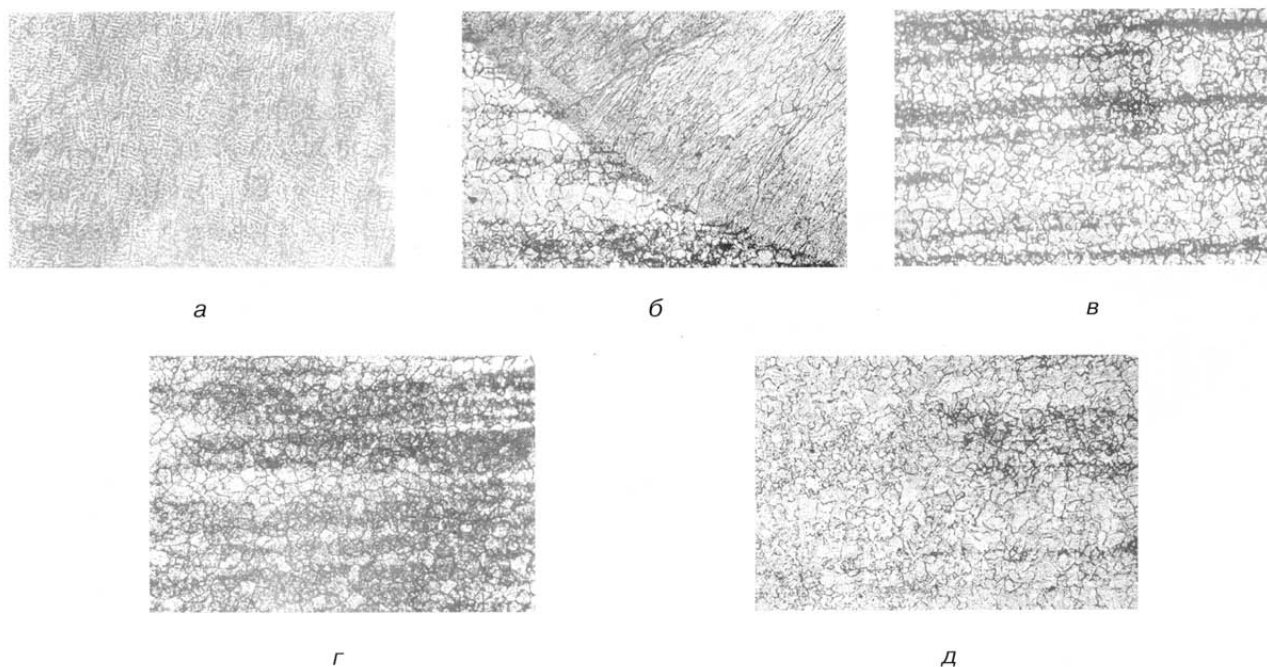


Рис. 5. Микроструктура напавленного образца (100-кратное увеличение):
а – микроструктура напавленного металла;
б – структура на границе напавленного и основного металла;
в, г, д – структуры металла на различных участках зоны термического влияния

рой и механической неоднородностью. Естественно, что при этом снижается работоспособность напавленной детали.

При анализе характера разрушения напавленных образцов обнаружено наличие в изломе испытанных образцов участков с несплавлением между собой слоев напавки. Несплавление имело место в результате появления окисных пленок и включений. Как видно на рис. 6, излом напавленных образцов более

хрупкий (как следствие, намного хуже деформационная характеристика разрушения), чем у образцов из основного материала.

На рис. 7 участки несплавления показаны при большом увеличении.

Наличия несплавлений, окисных и других включений, а также структурная неоднородность снижают общий пластический характер разрушения. На рис. 8 можно наблюдать полное отсутствие пластической деформации в

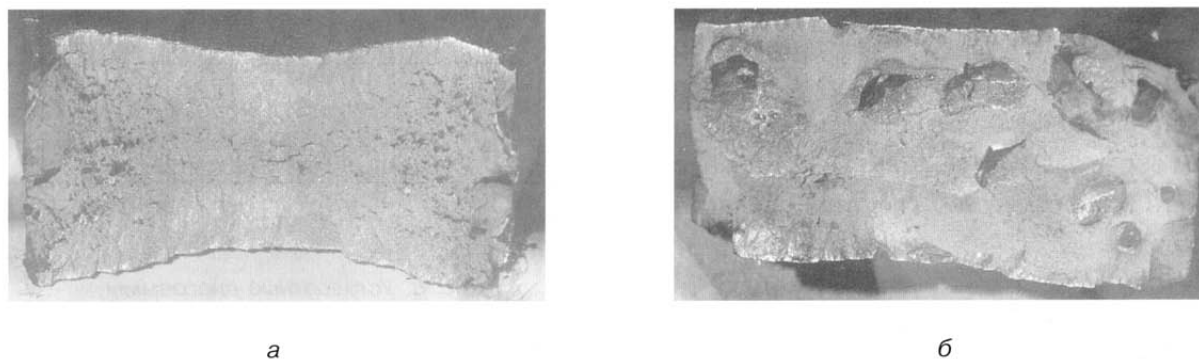


Рис. 6. Внешний вид излома образца из основного металла $\sigma_b = 1230$ МПа (а) и излом сварного образца ($\sigma_b = 1130$ МПа, $l = 30$ мм, $s = 12$ мм) (б). Темные пятна – участки несплавления (3-кратное увеличение)

месте разрушения у наплавленных образцов, тогда как у образца из основного материала разрушению предшествует значительная пластическая деформация.



Рис. 7. Внешний вид участков несплавления в сварном шве (20-кратное увеличение)

Хрупкий характер разрушения в зоне несплавления, по-видимому, обусловлен тем, что в объемах металла, граничащих с дефектом (например, с окисной пленкой), возможен перегрев металла из-за изменения условия теплопередачи. При этом кристаллизация происходит нормально к поверхности дефекта, чем объясняется древовидный характер излома в зоне несплавления.

Очевидно, упомянутые дефекты и различного рода неоднородности могут влиять на работоспособность деталей при длительной работе на переменных напряжениях с учетом неизбежного влияния напряжений от наплавки.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать ряд выводов. Наплавленные детали отличаются от ненаплавленных ярко выраженной неоднородностью структуры и механических свойств металла в зоне наплавки. При этом кристаллиты в наплавке, как правило, ориентированы нормально к растягивающим рабочим напряжениям, т.е. самым неблагоприятным образом. В результате снижаются прочностные и пластические свойства наплавленной детали.

К тому же остаточные напряжения, особенно в присутствии концентратора, снижают работоспособность детали.

Выровнять структуру и свойства металла и снять напряжения термической обработкой (за-

калка + старение) не представляется возможным, поскольку после старения металла, наплавленного присадочной проволокой ЭП410у, его пластические свойства значительно снижаются. Кроме того, невозможно полностью собранную конструкцию топливного агрегата, включающую материалы различного класса, подвергнуть нагреву при термообработке стали ВНС-2.

В наименьшей степени разупрочнение стали ВНС-2 проявляется на образцах с минимальной глубиной наплавки. С увеличением размера наплавки механические свойства образцов существенно снижаются.

При испытании на повторно-статическое растяжение установлено, что предел выносливости наплавленных образцов уменьшается на 40 % по сравнению с основным материалом и составляет 500–600 МПа (см. рис. 8).

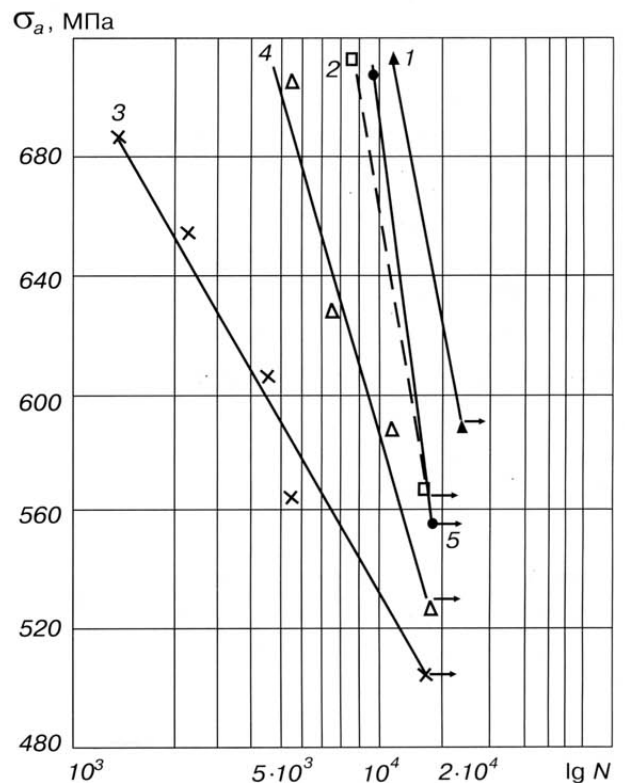


Рис. 8. Усталостные диаграммы для наплавленных образцов стали ВНС-2: 1–5 – номера испытанных пластин; σ_a – амплитуда напряжений; N – число циклов до разрушения

Особенности ремонта повреждений

Особенностью ремонта повреждений наплавкой является то, что в наплавленном металле могут иметь место дефекты, которые должны быть выявлены соответствующим контролем, удалены и подварены. Одной из причин образования этих дефектов может быть нарушение газовой защиты расплавленного металла в процессе заварки дефекта.

Качество защиты можно улучшить за счет применения гелия. В большинстве случаев ремонтные работы на топливных агрегатах осуществляются в условиях аэродромных ремонтных баз. При ремонте дефектов вне цехового помещения может иметь место сдвиг защитного потока гелия струей воздуха. Поэтому для устранения образования дефектов в процессе ремонта повреждений силовых шпангоутов была усовершенствована сварочная горелка для аргонодуговой сварки, предназначенная для осуществления ремонтных работ. Разработана специальная горелка (рис. 9) с двойными каналами и комбинированным соплом, обеспечивающего применение двух газов: гелия – по центру сопла и аргона по периферии.

При этом для защиты вольфрамового электрода использовался гелий, а сварочной ванны – аргон. Расходы защитных газов аргона и гелия подбирались по результатам анализа изломов. В качестве присадочного материала использовалась присадочная проволока св. ЭП-659ВН с содержанием титана 0,24 %. Известно, что при сварке стали ВНС-2 указанной присадкой в среде аргона в изломе шва наблюдаются дефекты типа оксидных включений. Спектральным анализом было установлено, что в оксидных включениях содержание титана находится на уровне 0,9–1,0 %. Очевидно, что оксид титана в процессе кристаллизации сварочной ванны не успевает полностью всплыть на поверхность металла шва.

Выполненные эксперименты позволили установить, что незначительное раздельное добавление гелия в газовую защиту (около 10 %) практически полностью устраняет наличие оксидных пленок в изломах сварных швов. На осно-

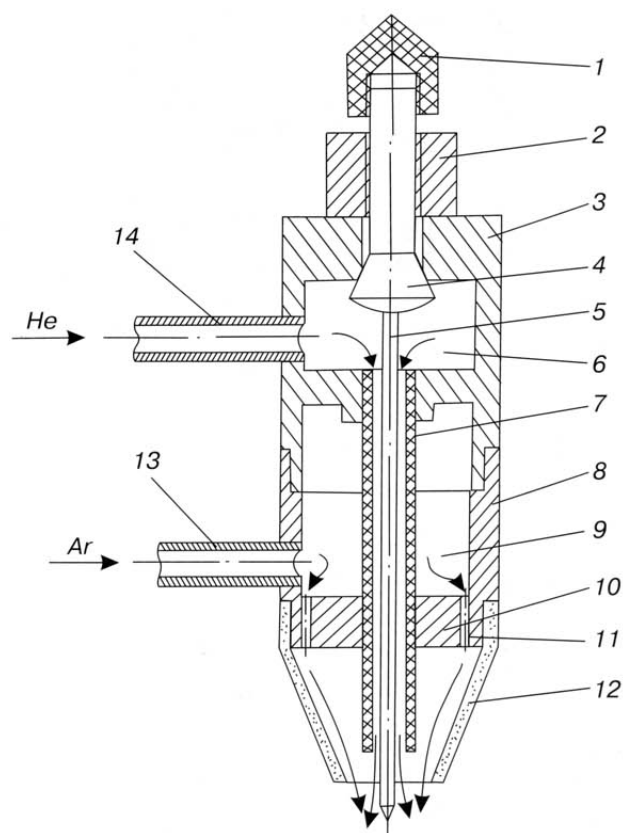


Рис. 9. Двухканальная горелка

для дуговой сварки в среде защитных газов:

- 1 – колпачок; 2 – гайка; 3 – корпус; 4 – цанга;
- 5 – электрод; 6 – газовая камера гелия; 7 – втулка;
- 8 – проставка; 9 – газовая камера аргона;
- 10 – газовая линза; 11 – канал подачи аргона;
- 12 – сопло; 13 – штуцер подачи аргона;
- 14 – штуцер подачи гелия

ве фрактографического анализа изломов металла шва выбран состав газовой защиты, содержащий 75% аргона и 25% гелия. Излом сварного шва, выполненного с оптимальным содержанием газов, представлен на рис. 10.

Излом, при отсутствии дефектов структуры, имеет мелкозернистый, пластичный характер.

Ручная дуговая сварка двухканальной горелкой пластин стали ВНС-2 толщиной 12 мм для последующих механических испытаний швов проводилась при следующих значениях силы тока дуги:

- корневой шов – 100 А;
- второй, третий и четвертый слой – 120 А;
- последующие слои – 130 А.

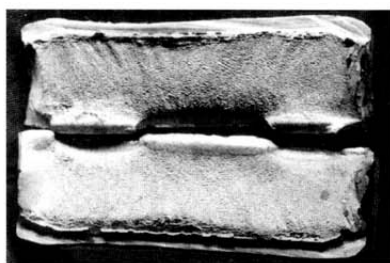


Рис. 10. Излом сварного шва при сварке с использованием двухканальной горелки

Затем выполнялась послойная зачистка металлической щеткой. При сварке использовалась присадочная проволока св. ЭП-659 АВИ с расходом газов 16 л/мин (аргона – 12 л/мин и гелия – 4 л/мин). Использовался аргон с точкой россы -52°C , а также увлажненный аргон, пропущенный через воду в специальном сосуде, с точкой росы $+5^{\circ}\text{C}$.

Ударная вязкость металла шва определялась на стандартных образцах с надрезом 10×10 мм. Надрез выполнялся поперек сварного шва (от корня к вершине). Испытание на замедленное разрушение при постоянной нагрузке проводилось на образцах с острым надрезом по сварному шву.

Результаты проведенных исследований показали, что применение горелки с двойным соплом позволяет получать сварные соединения из стали ВНС-2 с идентичными механическими свойствами (табл. 6 и 7) как при сухом (точка росы -52°C), так и при увлажненном аргоне. Эти соединения не чувствительны к замедленному разрушению при постоянной нагрузке.

Замедленное разрушение образцов с острым надрезом по сварному шву при постоянной нагрузке

Газовая защита	$T_{\text{с}}, ^{\circ}\text{C}$	Точка росы, $^{\circ}\text{C}$	$[H], \text{см}^3/100 \text{ г}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{а}}, \text{МПа}$	$t, \text{сут.}$
Аргон	Соответствует ГОСТ 10157-82	-52	0,2	1720	1600	10, без разрушения
	Увлажненный	+5	5,7	1650	1000 800	Разрушение через 16 ч 10, без разрушения
Комбинированная Ag + He	Соответствует ГОСТ 10157-82	-52	–	1600	1500	5, без разрушения
	Увлажненный	+5	–	1700	1600	7, без разрушения

Таблица 7

Механические свойства сварных соединений пластин толщиной 12 мм из стали ВНС-2

Влажность аргона	$T_{\text{с}}, ^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$a_{\text{н}}, \text{кДж/м}^2$	$HR_{\text{с}}$
Соответствует ГОСТ 101157-82	-52	1600	139	28–31
Увлажненный аргон	+5	1700	139	29–32

Примечание. Данные приведены по результатам испытаний десяти образцов на каждый вариант (номер пластины).

Сварные соединения, выполненные обычной горелкой в среде увлажненного аргона, имеют низкую прочность при испытании на замедленное разрушение (800 МПа) по сравнению с соединениями, сваренными горелкой с двойным соплом (1600 МПа).

Заключение

Анализ результатов проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Разупрочнение стали ВНС-2 в наименьшей степени проявляется на образцах с минимальной глубиной наплавки. С увеличением размера наплавки механические свойства образцов существенно снижаются.

2. Предел выносливости наплавленных образцов снижается по сравнению с основным металлом примерно на 500 МПа.

3. Для устранения образования дефектов в наплавленном металле при ремонте шпангоутов целесообразно применять газовую защиту расплавленного металла двойным потоком, состоящим из гелия и аргона.