

УДК 620.175.2: 669.15

А. В. Кашенкова¹, Н. Е. Калинина², В. Т. Калинин³

¹«ГП «ПО «ЮМЗ имени А. Н. Макарова»»; ²Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара; ³Национальная металлургическая академия Украины

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ СВАРКИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА INCONEL 718

Для виготовлення деталей і вузлів рідинних ракетних двигунів, певними труднощами при постачанні матеріалів з країн ЄС, на машинобудівних підприємствах України виникла необхідність заміни напівфабрикатів. В першу чергу потрібна заміна листового прокату з ряду сплавів на сплав, який володів би необхідним комплексом фізико-механічних характеристик.

Ключові слова: жароміцний сплав, зварювання, структура, турбонасосний агрегат, зварний шов.

Для изготовления деталей и узлов жидкостных ракетных двигателей, определенными трудностями при поставке материалов из стран ЕС, на машиностроительных предприятиях Украины возникла необходимость замены полуфабрикатов. В первую очередь требовалась замена листового проката из ряда сплавов на сплав, который обладал бы необходимым комплексом физико-механических характеристик.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, сварка, структура, турбонасосный агрегат, сварной шов.

For the manufacture of parts and assemblies of liquid rocket engines, certain difficulties in the supply of materials from EU countries, at machine-building enterprises of Ukraine, it became necessary to replace semi-finished products. First of all, it was necessary to replace sheet metal from a number of alloys with an alloy that would have the necessary complex of physical and mechanical characteristics.

Keywords: high-temperature alloy, welding, structure, turbopump assembly, weld.

Введение. Для обеспечения требуемых прочностных и эксплуатационных свойств деталей ответственного назначения жидкостных ракетных (ЖРД) двигателей, применяется множество различных сплавов, а также методик их изготовления.

Чаще всего, детали и узлы турбонасосных агрегатов (ТНА) изготавливаются сваркой, поэтому важно подобрать правильное сочетание сплавов для сварного соединения, сварочную проволоку и режим сварки для достижения высокого качества деталей.

Поскольку детали ЖРД и ТНА работают при повышенных температурах порядка 650°C и испытывают ряд напряжений как термических, так и со стороны потоков газа, то для их изготовления выбирают жаропрочные сплавы.

Цель работы. Данная работа проводилась с целью изучения термических воздействий при пайке на сварной шов и для имитации условий изготовления реальных узлов.

Материалы и методы исследования. В данной работе применены для изготовления образцов жаропрочный сплав на никелевой основе Inconel 718 и сплав ХН67МВТЮ (ЭП 202), обладающие требуемыми высокими свойствами при повышенных температурах и довольно часто применяющийся для производства подобных деталей.

Данные сплавы являются дисперсионно упрочняющимися и их требуемые свойства достигаются, как правило, после последующей его термообработки благодаря выделению таких упрочняющих фаз как γ' - Ni₃(Al, Ti, Nb) и γ'' - Ni₃Nb. Химический состав сплавов представлен в табл.1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов

Сплав	Заготовка	Химический состав, % масс													
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti	Mo	W	V	Al	Cu	Fe
inconel 718	Лист d=3,17мм	0,03	0,08	0,08	0,0001	0,008	18,24	53,53	0,97	2,99	-	B-0,002	0,51	0,07	17,95
	Свар. проволока Ø 1,6	0,04	0,06	0,07	0,001	0,008	18,75	53,44	0,98	2,88	-	B-0,004	0,58	0,11	17,8
ХН67М ВТЮ	Лист d=3,0мм	0,04	0,04	0,22	0,002	0,004	18,70	Осн.	2,40	4,47	4,64	-	1,15	0,02	0,56

Из исследуемых сплавов были изготовлены заготовки размером $115^{+2} \times 120^{+2} \times d$ мм, где d- толщина заготовки, на которых проводилась последующая отработка.

Для имитации условий изготовления деталей и узлов изделий перед сваркой заготовок была произведена термическая обработка по режимам, указанным в табл. 2.

Для дуговой сварки основными элементами режима являются сила тока, напряжение и скорость перемещения дуги, число электродов, шаг наплавки, а также смещение электрода при наплавке тел вращения.

Наплавку обычно ведут на постоянном токе, обеспечивающем высокую стабильность процесса.

Ток дуги при наплавке зависит от скорости подачи электродной проволоки. С увеличением скорости подачи возрастает сила тока, а следовательно, и производительность наплавки.

Таблиця 2

Режимы термической обработки заготовок

Сплав	Режим термической обработки
inconel 718	Закалка от температуры 980°C/1 час, охлаждение на воздухе+ Старение 720 °C/8 ч, охл. с печью до 620 °C, выдержка при 620°C 10 часов, общее время старения не менее 18 часов, охлаждение на воздухе
ХН67МВ ТЮ (ЭП 202)	КС 95В ОСТ 92-1311 – Закалка от температуры 1060°C/1 час, охлаждение на воздухе

Однако с возрастанием тока дуги увеличивается глубина проплавления.

Для сварки образцов было предложено три режима сварки, представленные в табл. 3

Таблиця 3

Режимы сварки

п/п	Режим сварки
1	Корневой проход I= 120А без присадки, наполняющий проход: I=120А с подачей присадочной проволоки 2.4668 (inconel 718), расход на защиту 7 л/мин
2	Наполняющий проход: I= 110А с подачей присадочной проволоки 2.4668 (inconel 718), расход на защиту 20 л/мин
3	Корневой проход: I= 100А без присадки на защиту 15 л/мин

Перед сваркой все образцы прошли опесочивание кварцевым песком для снятия с их поверхности окисных плен, а для удаления остатков смазки провели обезжиривание нефтяным растворителем.

В процессе сварки образцов, дуга в атмосфере аргона смещалась в направлении пластин из сплава ХН67МВТЮ; при этом шов становился не ровным, увеличилась зона термического воздействия.

Отклонение дуги во время сварки может вызывать чрезмерное разбрызгивание, недостаточную глубину проплавления, пористость и низкое качество сварных швов. После получения низкого качества шва и изучения научной литературы и сделан вывод, что данный феномен имеет магнитный характер.

Магнитное отклонение происходит из-за искажений магнитного поля вокруг сварочной дуги. Эти искажения возникают из-за того, что в большинстве случаев дуга оказывается на большем расстоянии от одного конца соединения, чем от другого, и непостоянного расстояния от рабочей клеммы.

Дисбаланс также может быть вызван постоянными изменениями направления тока в цепи между электродом, дугой и рабочим изделием.

В процессе сварки массивных металлических изделий, в частности, трубопроводов большого диаметра крупногабаритных емкостей, возникает явление магнитного дутья.

Магнитное поле большой массы металла взаимодействует с электродугой, вызывая ее отклонение. Отклонение может достигать значительных величин, затрудняя электросварку или делая ее вовсе невозможной.

Разработано несколько способов борьбы с этим негативным явлением[6].

Сильный электроток, протекающий по электродуге, создает собственное магнитное поле. Оно взаимодействует с постоянным полем массивной металлической конструкции.

В результате этого взаимодействия возникает сила, направленная к центру поля. Если массовый провод подключен близко к месту работы, то эта сила действует вдоль столба и не вызывает ее смещения от вертикали. Однако чем дальше подключена масса, тем более проявляется поперечная составляющая этой силы. Под ее действием электродуга отклоняется в сторону подключения.

Степень отклонения пропорциональна расстоянию от места подключения, намагниченности металлической конструкции и квадрату рабочего тока.

Эффект проявляется особенно сильно при высоких значениях сварочного тока и при сварке постоянным напряжением.

При работе переменным током эффект дутья ослабляется изменением направления отклонения с частотой сварочного напряжения.

Кроме того, возникающая электродвижущая сила наводит вихревые токи в поверхностных слоях металла. При больших значениях рабочего электротока, достигающих тысяч ампер, магнитное дутье проявляется незначительно.

В работе была измерена намагниченность образцов, которая и стала причиной смещения дуги и, как следствие, образования дефектов. Измерения производились ферромагнитным полюсоискателем ФП-1м при чувствительности прибора 4 μA . Результаты измерения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты исследования намагниченности

Обр. № п	Показания полюсоискателя, μA			
	Пластина 1	Пластина 2	Пластина 3	Пластина 4
1	-45	0	0	+40
2	-20	+5	0	-20
3	+40	0	+50	x
4	+35	0	+25	x
5	-80/+100	-5	-80/+100	x
6	-100/+60	+5	+5	+45

Из таблицы следует, что, сплав Inconel 718 не имеет намагниченности, а пластины из сплава ХН67МВТЮ имеют относительно высокую намагниченность.

Как известно, электрическая дуга в атмосфере аргона смещается в сторону пластины с более высокой намагниченностью, что провоцирует образование дефектов шва, которые наблюдались при сварке заготовок на первом этапе.

В связи с полученными результатами все образцы были подвергнуты размагничиванию в установке ДЕ-1 для уравнивания магнитной структуры заготовок и повышения качества сварного шва.

После размагничивания пластин показатели на всех пластинах варьировались от -5 до $+5$ μA , что находится в пределах погрешности измерений полюсоискателя.

После размагничивания заготовок, подбора и корректировки режимов сварки были получены образцы с удовлетворительной поверхностью шва, без видимых невооруженным взглядом непроплавов, трещин или подрезов.

Качество сварных соединений было подтверждено рентгеноконтролем. В работе проведен макроанализ металлографических шлифов (рис.1).

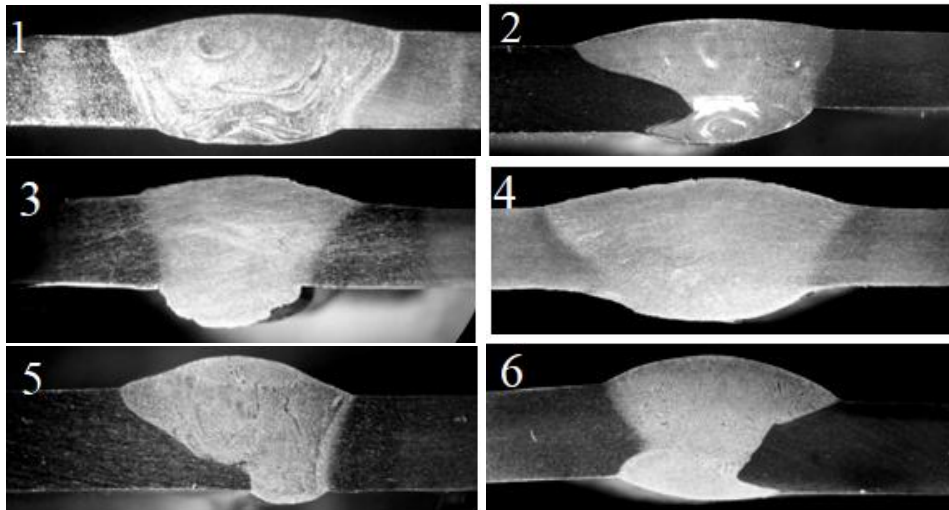


Рис. 1. Структура образцов сваренных по режиму:

1,2 – Корневой проход: $I = 120\text{A}$ без присадки, наполняющий проход; $I = 120\text{A}$ с подачей присадочной проволоки inconel 718, расход аргона на защиту 7 л/мин; 3,4 – Наполняющий проход: $I = 110\text{A}$ с подачей присадочной проволоки inconel 718, расход аргона на защиту 20 л/мин; 5,6 – $I = 120\text{A}$ без присадки, наполняющий проход; $I = 120\text{A}$ с подачей присадочной проволоки inconel 718, расход аргона на защиту 7 л/мин

Как видно из результатов исследования, образцы 1 и 2, сваренные по режиму сварки 1 имеют признаки пережога, неоднородности структуры сварного шва, что является признаком низкого качества шва из-за завышенной силы тока при сварке. Образцы 5 и 6, сваренные по режиму 3, имеют непроплавы кромок сварочной ванны и рыхлоты из-за заниженной силы тока.

Качественными в соответствии с ОСТ 92-1114-88 являются образцы №3 и 4, сваренные по режиму 2. Данный режим был введен в типовые

технологические процессы изготовления сварных деталей и узлов данного сочетания материалов.

Качество сварных соединений было подтверждено механическими испытаниями, результаты которых приведены в табл. 5.

Таблица 6

Результаты механических испытаний сварных соединений

№ обр.	$\delta, \%$	$\sigma_b, \text{МПа}$	Режим сварки	
1	4,0	725	Корневой проход. I= 120А без присадки, наполняющий проход: I= 120А с подачей присадочной проволоки inconel 718, расход на защиту 7 л/мин, на	
	2,6	720		
2	2,0	710		
	4,4	880		
3	12,2	870		Наполняющий проход: I= 110А с подачей присадочной проволоки inconel 718, расход на защиту 20 л/мин
	12,8	980		
4	10,7	959		
	12,2	980		
5	10,0	875	Наполняющий проход: I= 110А с подачей присадочной проволоки inconel 718, расход на защиту 20 л/мин,	
	11,8	890		
6	7,8	730		

Как следует из результатов исследования, образцы, сваренные по режиму 2 имеют высокие прочностные и пластические свойства, что свидетельствует о высоком качестве сварных соединений.

Выводы. Испытания и исследования сплава Inconel 718 показали возможность его широкого применения в конструкции двигателя ракетносителей, взамен ранее применяющегося сплава ХН67МВТЮ (ЭП 202), что позволяет унифицировать применение материалов в изделиях ЖРД и ТНА.

1. Установлена особенность сплава Inconel 718 - высокая стойкость против образования трещин в сварных соединениях и при термической обработке.

2. Контроль качества сплава Inconel 718, такие как контроль механических свойств, рентгеноконтроль и металлографическое исследование, показали результаты близкие к полученным методами контроля по ASTM и AMS .

3. Определены следующие оптимальные варианты соединений при ручной аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом: I= 110А с подачей присадочной проволоки inconel 718, расход на защиту 20 л/мин.

Библиографические ссылки

1. Воробей В. В., Логинов В. Е. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: Учебник. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.

2. Авиационно-космические материалы и технологии. Учебник/ В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, Н.Е. Калинина и др.–Запорожье: Мотор Сич, 2007.–383с.

3. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–35.

4. Катков Р.Э., Лозино-Лозинская И.Г., Мосолов С.В., Скоромнов В.И., Смоленцев А.А., Соколов Б.А., Стриженко П.П., Тупицын Н.Н. Экспериментальная отработка камеры сгорания многофункционального жидкостного ракетного двигателя с кислородным охлаждением камеры: результаты 2009–2014 гг. // Космическая техника и технологии. 2015. № 4(11). С. 12–24

5. Шлямнев А. П. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: Справ.М.: «Интермет Инженеринг», 2000. – 232с.

6. Rigina L.G., Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M., Zvereva T.N. Effect of alloying on the composition-stable nitrogen content and phase composition of corrosion-resistant Fe-Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb alloys after solidification. 9-th Int. konf. High Nitrogen Steels, Moscow, july 2009, p. 36-44.

Надійшла до редколегії 31.10.2019 р.