

0,5–0,6 мм. К числу ее недостатков следует отнести повышенную температуру плавления (80–85 °С), малый интервал вязкопластичного состояния (3–5 °С) и высокую линейную усадку (1,5–2,2 %) при переходе из жидкого состояния в твердое. Поэтому модельная масса указанного состава могла успешно применяться лишь при изготовлении наиболее тонких равностенных моделей, поскольку в массивных элементах моделей наблюдались внешние усадочные дефекты глубиной 1,0–1,5 мм.

С целью устранения указанных недостатков в состав модельной композиции был введен дополнительно защитный воск марки ЗВ–I, относящийся к группе пластичных восков с пониженной температурой плавления и нулевой усадкой. Теплоустойчивость композиции повысилась до 54 °С, твердость – на 14 единиц, прилипаемость понизилась на 0,04 МПа, интервал пастообразного состояния расширился на 7 градусов, усадка уменьшилась до 1,0–1,5 %, заполняемость пресс-форм в случае образца толщиной 1 мм возросла на 35 %. Модели, изготовленные из композиции, имеют толщину стенок до 0,6 мм, гладкую, глянцевую поверхность, сохраняют форму и размеры в течение месячного хранения при температуре 18–20 °С. Состав модельной массы защищен авторскими свидетельствами № 772682 и №923716.

**М. Г. Близник, Г. М. Сюкасов,
В. И. Черменский, С. В. Рабинович,
М. П. Шалимов, М. Д. Харчук**

СВАРНО-ЛИТОЙ ШПАНГОУТ ВЫСОКОЙ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ

Применение прецизионных литейных суперинварных сплавов взамен деформируемых суперинваров типа 32НКД (ГОСТ 10994) для шпангоутов теплозащитных узлов летательных аппаратов обеспечивает повышение технологичности изготовления этих крупногабаритных металлических деталей. Вместе с тем одним из наиболее перспективных путей повышения термостабильности шпангоутов является изготовление их в виде конструкции, состоящей из комплекта наружных сложнопрофильных элементов и внутреннего (несущего) сплошного кольца [1]. Именно такой конструкции присуща весьма высокая термостабильность, что позволяет использовать в качестве внутреннего кольцевого элемента металлические неинварные материалы, например, нержавеющей стали, обладающие существенно меньшей стоимостью по сравнению с суперинварами.

С учетом данных обстоятельств, разработчиками изделия была выбрана конструкция шпангоута, состоящая из наружных элементов, изготавливаемых

литьем суперинвара 32НКБЛ (ТУ В3 2785), и внутреннего кольца, получаемого из листового проката нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632). Изготовить подобный шпангоут можно лишь при использовании надежной сварочной технологии, в связи с чем авторским коллективом, имеющим опыт сварки однородных литейных инварных и суперинварных сплавов, был разработан необходимый технологический процесс получения сварных соединений из разнородных материалов: литейного суперинвара 32НКБЛ с вышеуказанной нержавеющей сталью.

Сведения о подобной технологии в доступной отечественной и зарубежной литературе отсутствовали. Методом экспериментально-теоретического исследования необходимо было преобразовать ранее созданные технологии сварки литейных инваров и суперинваров [2, 3, 4] в искомую технологию. Теоретически важно было создать модель прогнозирования величины температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) металла шва в зависимости от его химического состава и структуры. Практически требовалось осуществить выбор способа сварки, определить режим, сварочные материалы, разработать наиболее технологичную конструкцию соединения.

В качестве суперинвара использовался литейный сплав 32НКБЛ, содержащий: $C - 0,05$, $Mn - 0,36$, $Si - 0,02$, $Ni - 32,8$, $Co - 3,8$, $Nb - 0,45$, $PЗМ - 0,008$, $S - 0,002$, $P - 0,002$, остальное – Fe (в % по массе).

ТКЛР этого сплава после его стандартной термообработки составлял $(0,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ в интервале от 20 до 100 °С. В качестве нержавеющей стали применена сталь 12Х18Н10Т, состав которой по сертификату соответствовал требованиям ГОСТ 5632, а ее средний ТКЛР для температурного интервала от 20 до 100°С составлял $14,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Для получения сварного соединения «суперинвар – нержавеющая сталь» был выбран способ механизированной дуговой сварки под флюсом с использованием стандартных сварочных материалов.

С помощью математической модели металлургических процессов при механизированной сварке под флюсом (модель разработана кафедрой технологии сварочного производства УГТУ–УПИ) рассчитаны составы металла шва соединений литейного суперинвара 32НКБЛ со сталью 12Н18Н10Т. При расчете в качестве исходных данных были использованы предварительно опробованные технологические параметры режима сварки: сварочный ток, напряжение на дуге, скорость сварки, скорость подачи электрода, диаметр проволоки, обратная полярность, количество проходов. Результаты определения составов корневого и облицовочного швов применялись для расчета их структуры. Был найден оптимальный вариант сочетания сварочных материалов, позволяющий получить двухфазную структуру металла шва, наличие которой обеспечивает его трещиностойкость и в то же время не выводит ТКЛР за верхний предел значений, присущих стали 12Х18Н10Т.

С целью оптимизации конструкции сварного соединения для изготовления сварно-литого шпангоута узла обтекателя летательного аппарата в соответ-

ствии с конструктивными требованиями и технологическими возможностями осуществления сварочного процесса разработано два типа нестандартных соединений:

- в замок – круговой шов в основании шпангоута;
- тавровое – продольный шов по образующей внутренней обечайки.

Такое расположение швов и их геометрия позволяют получить изделие с заданными физико-механическими параметрами.

При сварке контрольных образцов было установлено, что наличие в литом суперинваре газовых пор размером выше 200–300 мкм вызывает образование пор в металле сварного шва. Поэтому осуществляли надлежащий входной контроль наличия этих дефектов в образцах литого суперинвара. Были проведены макро- и микроисследования образцов, определен химический состав металла шва и механические свойства полученных сварных соединений.

Для dilatометрических исследований использовался автоматизированный кварцевый dilatометр научно-производственного центра «ЛИНВАР».

Исследования макроструктуры шва показали, что геометрия шва соответствует требуемой. В шве отсутствуют дефекты: газовые поры, трещины, непровары, подрезы и шлаковые включения. При анализе микроструктуры установлено, что в шве нет микротрещин, волосовин, микропор и несплошностей. Структура металла шва представляет собой дендритную аустенитную матрицу с включениями феррита. Дендриты мелкие разориентированные без транскристаллитных образований. При двухпроходной сварке после второго прохода первый слой частично рекристаллизуется. Рекристаллизованный слой в основном имеет полиэдрическую аустенитную структуру. В зоне термического влияния на границе суперинвар – металл шва структура переходит из ячеистой в ячеисто-дендритную. На границе аустенитная сталь – металл шва дендриты металла шва начинают свой рост с зерен текстуры проката.

При механических испытаниях на прочность (статическое растяжение) образцы разрушались по основному металлу – суперинвару. Временное сопротивление разрыву составило 390 МПа, что несколько ниже прочности суперинвара (440 МПа). Это объясняется тем, что в литом суперинваре имелись газовые поры. Твердость металла шва оказалась близкой к твердости нержавеющей стали и составила 52 HRB (ГОСТ 9013).

ТКЛР металла шва равен $14,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что соответствует ТКЛР нержавеющей стали и отвечает проектным требованиям.

Таким образом, проведенные исследования и испытания контрольных сварных соединений показали, что описанная технология сварки обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к сварному соединению сварно-литого шпангоута, и может быть использована как базовая при изготовлении опытных образцов изделия.

Для создания баз данных по определению математической зависимости ТКЛР от химического состава металла шва были проведены плавки и отлиты

образцы для измерения ТКЛР, определен их химический состав. Построены графики зависимости ТКЛР от содержания никеля:

- 1) после литья;
- 2) после литья и высокотемпературной термической обработки.

Построена математическая модель зависимости ТКЛР от содержания элементов *C, Mn, Si, Ni* с учетом неаддитивного влияния этих элементов на тепловое расширение литого металла и получено следующее выражение этой зависимости:

$$\alpha = 181,779201 - 9,818227[\text{Ni}] + 0,134089[\text{Ni}]^2 - 4,714331[\text{C}] + 5,28452[\text{C}]^2 + 2,838798[\text{Si}] + 0,493595[\text{Si}]^2 + 1,801255[\text{Mn}] + 1,576901[\text{Mn}]^2.$$

Литература

1. Соединительный неразъемный узел/С. В. Рабинович, М. Д. Харчук, В.И.Черменский//Описание изобретения к патенту RU №2145005, приоритет от 14.04.1998: Офиц. бюл. Рос. агентства по пат. и товар. знакам. Изобрет. Полез. модели. – 2000. – № 3. С. 23–25.
2. Сюкасов Г. М., Близник М. Г., Харчук М. Д. Присадочный материал для сварки деформируемых и литейных сплавов //Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 1997. – С.39–41.
3. Технология изготовления сварно-литой конструкции платформы спектрометра из литейного сплава системы Fe–Ni–C / Г. М. Сюкасов, М. Г. Близник, В. И. Черменский и др.// Совершенствование литейных процессов: Материалы междунар. конф. литейщиков, 18–19 марта 1999 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 1999. – С. 191–196.
4. Разработка технологии сварки литейных суперинваров с нержавеющейми сталями для получения крупногабаритных деталей высокой термостабильности/ М. Г. Близник, Г. М. Сюкасов, М. П. Шалимов, В. И. Черменский // Конструирование и технология изготовления машин: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 2000. – С. 75–76.