

## Конкурсная работа

**Авторы:** Хамматов Р.Р. (КАЗ им. С.П. Горбунова – филиал ПАО «Туполев»), Потапов А.В. (КАЗ им. С.П. Горбунова – филиал ПАО «Туполев»), Тепаев С.В. (ПАО «Туполев»), Свиридов А.В. (ФГУП «ВИАМ»).

**Название работы:** «Восстановление утерянной технологии электронно-лучевой сварки с последующим вакуумным отжигом габаритных деталей из титановых сплавов».

**Цель:** Изготовление балки центроплана самолета Ту-160.

**Описание работы:** В 2015 году, в рамках принятого решения о восстановлении производства самолета ТУ-160 на КАЗ им. С.П. Горбунова – филиал ПАО «Туполев» г. Казань, появилась необходимость восстановления технологии электронно-лучевой сварки и последующего вакуумного отжига титановых сплавов.

В течение чуть более одного года было необходимо:

1. Создать агрегатно-сварочный цех, расформированный в 90-е годы;
2. Восстановить две уникальные установки: установку электронно-лучевой сварки ЭЛУ 24/16 и печь вакуумного отжига УВН 45-180/8,5;
3. Отработать режимы и начать сварку первых серийных деталей после восстановления.

В течение нескольких месяцев было подготовлено штатное расписание цеха и отдела главного сварщика, начался набор коллектива.

Несколько слов об оборудовании:

### «ЭЛУ-24-16М»

Установка ЭЛУ-24-16М (далее ЭЛУ) является результатом модернизации существующей установки электронно-лучевой сварки ЭЛУ-24-16 и предназначена для электронно-лучевой сварки в вакууме балки центроплана и узлов поворота, а также для других плоских и объемных узлов летательных аппаратов. Сварка осуществляется в нижнем положении на горизонтальной плоскости, на наклонной к горизонту плоскости, на вертикальной плоскости горизонтальных и вертикальных швов (в пределах возможностей перемещений механических узлов установки).

Установка состоит из вакуумной камеры, 2-х энергокомплексов (ускоряющее напряжение по 60 кВ), системы управления, вакуумной системы, механической системы, системы охлаждения, системы видеонаблюдения, пневмосистемы, системы освещения и пр.

Камеру цельносварной конструкции условно можно разделить на центральную часть и примыкающей к ней с двух сторон туннельные части

(см. рис.1). Внутренние размеры камеры центральной части (сварочный блок) составляют 11390×3910×12765 мм; левый и правый туннельный блок имеют одинаковые размеры 17395×3910×5140 мм.



Рисунок 1 - Установка ЭЛУ 24-16М

Сегодня ЭЛУ является самой большой установкой в мире, ее наружные габариты составляют в длину 77 м, в ширину 24 м, в высоту 15 м, что позволяет производить сварку продольных и поперечных швов длиной до 18 м, шириной и высотой до 3,5 м и проплавлением изделия толщиной до 150 мм. Объем рабочей части камеры составляет 1340м<sup>3</sup>. На (рис.2) представлены образцы наиболее сложной геометрии.

Процесс сварки происходит в сварочной камере под давлением 10<sup>-4</sup>-10<sup>-5</sup> мм.рт.ст. (высокий вакуум), что обеспечивает вакуумная система установки.

На ЭЛУ установлены 2 электронно-лучевые аппаратуры ЭЛА-60И с высокостабильными инверторными источниками питания SPELMANN. Установлены пушки ЭЛП-7ПП с двойным лучепреломлением.



Рисунок 2 - Образцы наиболее сложной геометрии

Система видеонаблюдения обеспечивает четкое и контрастное изображение 24 кадра за секунду.

Система управления состоит на базе промышленных компьютеров с установленными в них платами дискретного ввода-вывода и платы интерфейсов связи.

### **«УВН-45-180/8,5»**

Печь вакуумная, модель УВН-45-180/8,5 предназначена для реализации операции вакуумного отжига крупногабаритных сварных титановых конструкций (см. рис. 3). Максимальная температура нагрева печи составляет 900° С. Габариты рабочего пространства 23000х4200х4000 мм, рабочий объем камеры 850 м<sup>3</sup>. Максимально возможная масса садки 15000 кг.



Рисунок 3 - Печь вакуумная, модель УВН 45-180/8,5

Вакуумный отжиг титановых конструкций обеспечивает:

- снижение содержания водорода до безопасного уровня и, как следствие, устранение склонности металла к водородной хрупкости;
- снятие нежелательных остаточных напряжений;
- максимально возможное сохранение циклической прочности;
- нанесение защитных плёнок;
- сохранение геометрии отжигаемого изделия.

Работа печи заключается в нагреве обрабатываемого изделия в вакууме до определенной температуры, выдержке при этой температуре и охлаждении в вакууме.

Система вакуумная предназначена для создания вакуума в камере  $5 \times 10^{-5}$  мм рт. ст.

Вакуумные станции построены на базе механических, роторных, диффузионных, электродуговых геттерных насосов.

Для предотвращения дефектов при термическом процессе отжига в случае выхода из строя одной или нескольких зон нагрева система управления обеспечивается интерполяционное управление температурой по всем зонам установки.

### **Результаты работы**

Проведён выбор и предварительно отработаны технологические режимы электроннолучевой сварки (ЭЛС) с последующим вакуумным отжигом для плит и поковок с различной толщиной из титанового сплава ВТ6ч. Для толщин 38, 82, 90 мм отработана технология электронно-лучевой сварки горизонтальным лучом в горизонтальной (Г) и вертикальной (ГНВ)

плоскостях. Для поковки толщиной 120 мм отработана технология сварки горизонтальным лучом в горизонтальной плоскости. Внешний вид сварных швов приведен на рис.4.

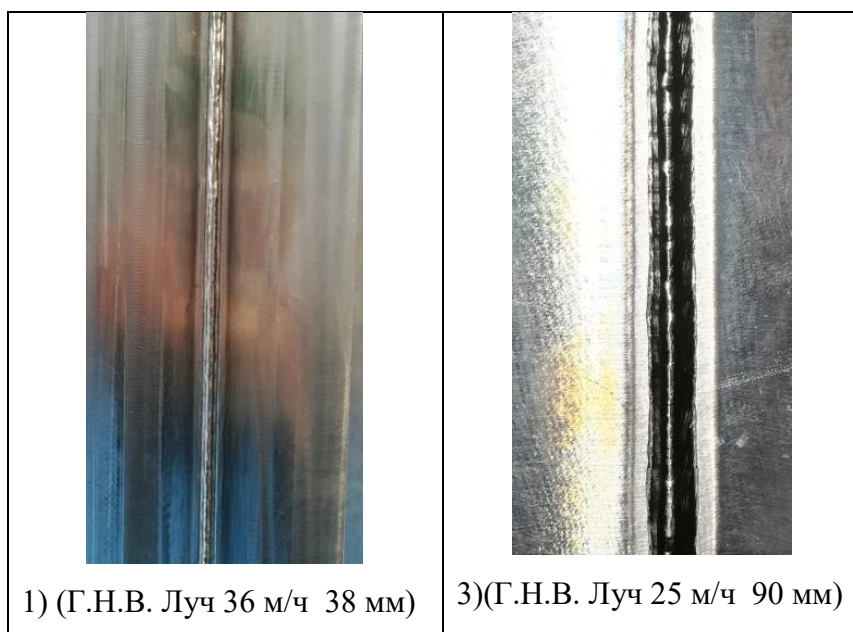


Рисунок 4 - Внешний вид сварных соединений

На КАЗ им. С.П. Горбунова отработаны параметры технологии устранения дефектов сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой, с определением количества подварок на установке ЭЛУ-24-16М.

Проанализировано влияние технологических параметров ЭЛС на качество формирования сварных соединений. В результате ЭЛС и последующего вакуумного отжига получено хорошее формирование металла сварного шва при отсутствии наружных дефектов, макроструктура сварных соединений показана на рис.5.

Проведена оценка качества сварных соединений, выполненных ЭЛС, неразрушающими методами контроля – радиографический контроль, УЗК, цветная дефектоскопия на оборудовании КАЗ. В результате неразрушающего контроля сварных соединений технологического образца, плит и поковки дефектов в сварных соединениях не обнаружено.

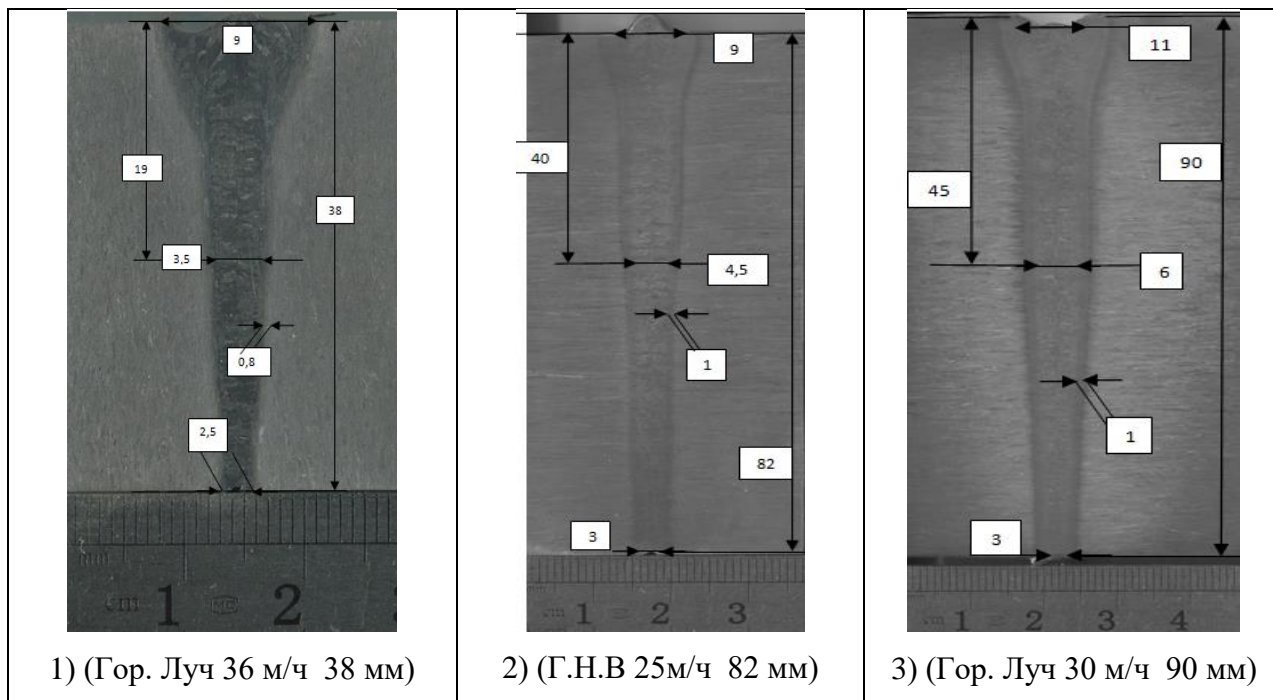


Рисунок 5 - Макроструктура сварных соединений

Проведена оценка качества сварных соединений, выполненных ЭЛС с последующим вакуумным отжигом, неразрушающими методами контроля – радиографический контроль, УЗК, цветная дефектоскопия на оборудовании КАЗ им. С.П. Горбунова.

Исследовано влияние режимов термической обработки на уровень остаточных напряжений и механические свойства сварных соединений. Выполнен выбор режимов термической обработки позволяющих снизить уровень остаточных напряжений. На рис.6. показана базовая циклограмма вакуумного отжига в печи УВН-45-180/8,5.

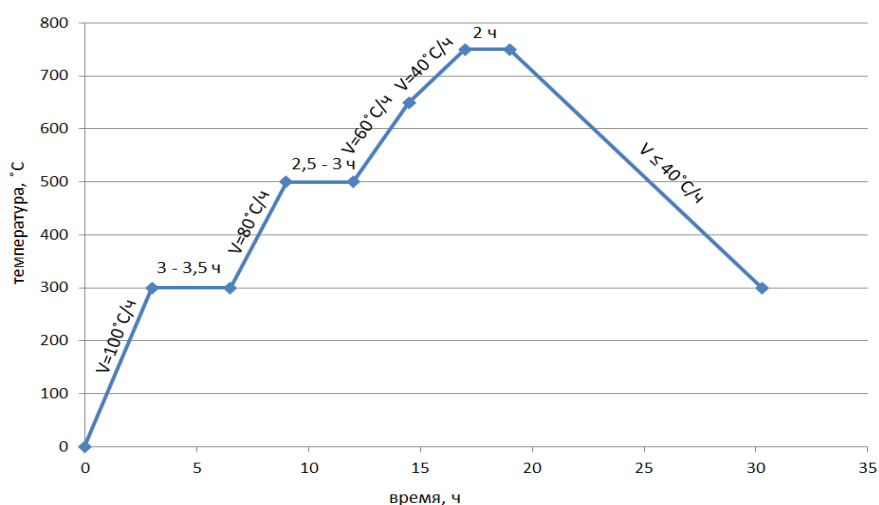


Рисунок 6 – Базовая циклограмма вакуумного отжига в печи УВН-45-180/8,5

**В ходе проведенных работ получено:** предел прочности сварных образцов, изготовленных на всех режимах сварки, составляет более чем 0,9

от предела прочности основного металла соответствующего полуфабриката, что полностью соответствует установленным требованиям.

Долговечность до разрушения сварных образцов, изготовленных на оптимальных режимах сварки, превышает долговечность до разрушения образцов из основного металла на соответствующих уровнях напряжений. На всех режимах сварки долговечность составляет более 200000 циклов при нагрузке 420, 378, 304 МПа.

### **Заключение**

В 2017 году на территории КАЗ им. С.П. Горбунова была восстановлена уникальная технология электронно-лучевой сварки и последующего вакуумного отжига титановых сплавов.

Произведены работы по отработке технологических режимов и подтверждению заявленных прочностных характеристик сварных швов выполненных на ЭЛУ-24-16М практически по всем видам сварных стыков и свариваемых толщин.

На сегодняшний день установка ЭЛУ-24-16М имеет возможность производить сварку габаритных деталей со свариваемыми толщинами свыше 250 мм, что позволяет осуществить сварку основных силовых элементов конструкции стратегического бомбардировщика ТУ-160М с последующим вакуумным отжигом в печи УВН-45-180/8,5.



Коллектив механо-сварочного цеха