

Ю. А. Марченко, инженер технолог, И. А. Петрик, канд. тех. наук, главный сварщик, (АО «Мотор Сич», г. Запорожье, Украина)

## Разработка технологии электронно-лучевой термической обработки дисперсионно-твердеющих жаропрочных сталей

*Рассмотрены особенности применения технологии электронно-лучевой термической обработки дисперсионно-твердеющих жаропрочных сталей авиационных газотурбинных двигателей.*

**Ключевые слова:** авиадвигатели, электронный луч, термообработка, жаропрочная сталь.

*Розглянуті особливості застосування технології електронно-променевої термічної обробки дисперсійно-твердіючих жароміцних сталей авіаційних газотурбінних двигунів.*

**Ключові слова:** авіадвигуни, електронний промінь, термообробка, жароміцна сталь.

*The features of application of technology of thermal beam-processing of precipitation-hardening heatproof steels aviation turbo-engines are considered.*

**Keywords:** aero-engines, electronic ray, heat treatment, heatproof steel.

В настоящее время в авиадвигателестроении остается актуальной проблема выбора технологий ремонта корпусных деталей, изготовленных из жаропрочных хромоникелевых сплавов, методами сварки. В процессе сварки жаропрочные стали и сплавы склонны к образованию горячих трещин в шве и околошовной зоне. Причиной образования горячих трещин является снижение пластичности из-за высокого содержания в сплавах легирующих элементов, таких как Ti, Al, W, Mo и др., образующих легкоплавкие эвтектики по границам зерен [1]. Детали бывшие в эксплуатации или прошедшие термическое упрочнение (старение) в большей мере склонны к трещинообразованию и имеют ограниченную свариваемость.

Для выполнения ремонта находят применение различные виды сварки, наплавки, напыления. Большинство материалов, используемых в авиационной промышленности, независимо от вида сварки требуют проведения термической обработки для снятия напряжений или получения заданных свойств в металле шва и околошовной зоне. Выполнение печной термообработки сварных швов на окончательно обработанных деталях при ремонте может привести к возникновению недопустимых короблений. В этой связи вызывает интерес опробование

альтернативного метода локальной электронно-лучевой термической обработки сварных швов с целью получения прочностных свойств на уровне основного металла.

На АО «Мотор Сич» проводились опытно-исследовательские работы по ремонту корпуса камеры сгорания методом замены фланца, имеющего недопустимую величину износа (рис. 1). При ремонте изношенный фланец срезается, торцы под сварку обрабатываются с обеспечением требуемых геометрических размеров, на место изношенного, методом электронно-лучевой сварки (ЭЛС), приваривается новый фланец. Материал детали – жаропрочная сталь ВЖ-102.

Для получения необходимых свойств сварных соединений из

хромоникельвольфрамовой стали ВЖ-102 применяется термическая обработка в виде закалки и старения (выдержка в печи при температуре  $750 \pm 10$  °С в течение 16 часов) [1].

На предприятии АО «Мотор Сич» проведены исследования по отработке технологии локального электронно-лучевого старения сварных швов, выполненных на образцах из стали ВЖ-102. При выполнении работ в качестве основного материала использовались кольцевые образцы, полученные методомковки с последующей механической обработкой.

Перед сваркой образцы прошли печную термообработку по режиму:

- закалка при температуре  $1180 \pm 10$  °С;
- старение при температуре  $750 \pm 10$  °С в течение 16 ч.

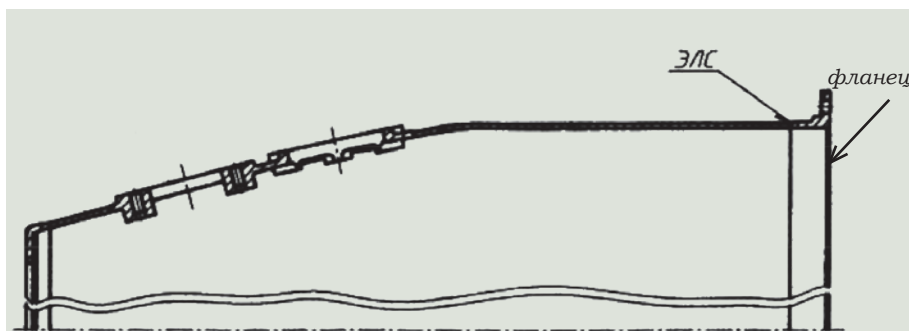


Рис. 1. Схема ремонта корпуса камеры сгорания методом замены фланца

Электронно-лучевая сварка выполнялась в состаренном состоянии образцов.

Методика проведения испытаний предусматривала следующие этапы:

1. Проверка механических свойств основного материала после печного старения.

2. Проверка механических свойств сварных соединений после сварки без последующего старения в печи.

3. Проверка механических свойств сварных соединений после сварки с последующим старением в печи.

4. Проверка механических свойств сварных соединений после сварки с последующим локальным старением электронным-лучом.

Электронно-лучевое старение сварных швов на образцах, прово-

дилось на установке электронно-лучевой сварки LARA-52 (рис. 2) по схеме одновременного нагрева 3/4 сварного соединения двумя электронно-лучевыми пушками, расположенными под углом 90° друг к другу при быстром вращении изделия.

Для бесконтактного замера температуры нагрева использовался оптический инфракрасный термометр «IRCON» с размещением приемника света (места замера температуры) внутри сварочной камеры. Регулировка мощности нагрева (ток эмиссии эл. луча) осуществлялся автоматической системой обратной связи «температура – ток луча». Для линейной развертки ЭЛ использовалась собственная отклоняющая система установки с сохранением требуемой длины развертки.

Температура нагрева составила  $750 \pm 10$  °С, время выдержки варьировалось от 60 до 120 мин.

Сталь ВЖ102 относится к жаропрочным сталям с интерметаллидным упрочнением. Она содержит относительно мало легирующих элементов [ $\Sigma(\text{Ti}+\text{Al})=2,4-2,8$ ] [2], образующих упрочняющую  $\gamma'$ -фазу, поэтому выявить металлографическим методом выделение этой фазы при старении не представляется возможным. Выделение  $\gamma'$ -фазы при старении определялось косвенно по изменению механических свойств.

Сравнительный анализ полученных результатов испытаний проводился на соответствие требованиям нормативной документации предприятия на поставку колец из стали ВЖ-102, в том числе сварных. Свойства основного материала и сварного шва согласно требований документации приведены в табл. 1.

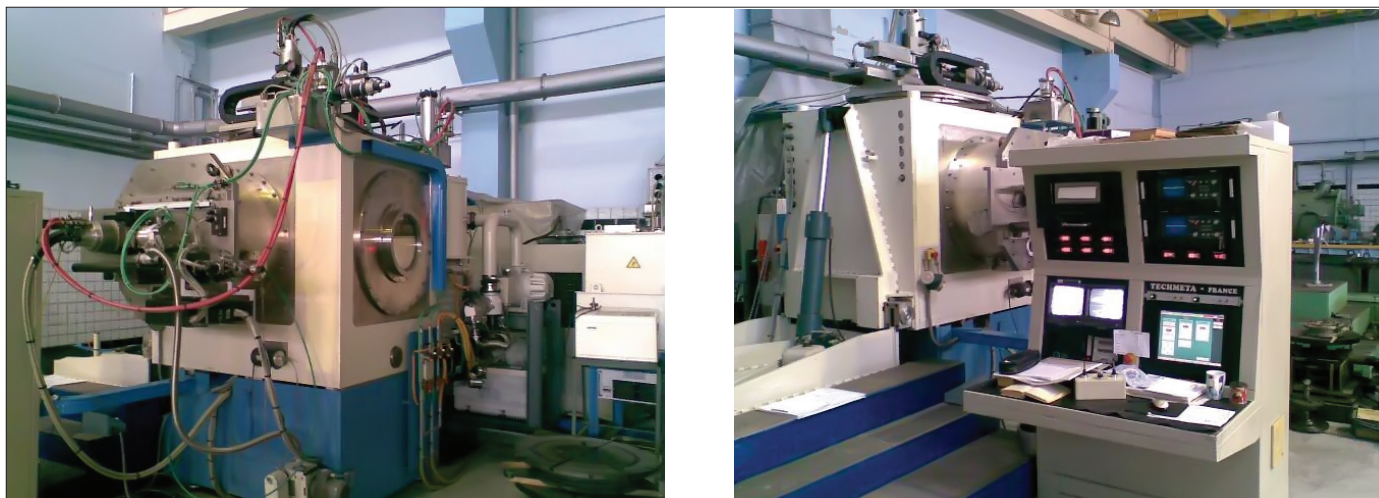


Рис. 2. Внешний вид установки для сварки и лучевой термообработки Lara-52

Таблица 1. Свойства основного материала и сварного шва термически обработанных образцов из стали ВЖ-102

| Режим термической обработки  |                   | Предел прочности, МПа | Предел текучести, МПа | Удлинение, % | Поперечное сужение, % | Ударная вязкость, кгс·м/см <sup>2</sup> | Твердость по Бринеллю, Ø отпечатка, мм |
|--|-------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|---|--|
| Закалка 1160±10 °С, выдержка 2 час. Охлаждение на воздухе. Старение при 730–750 °С в течение 16 ч, охлаждение на воздухе | Основной материал | не менее              |                       |              |                       |   | 3,35–3,85                              |
|  |                   | 950                   | 630                   | 9            | 12                    | 2                                       |  |
|  | Сварной шов       | 900                   | 580                   | 6            | 6                     | 1,5                                     | -                                      |

Результаты механических испытаний образцов из основного материала, сварных швов и швов после локального электронно-лучевого старения приведены в табл. 2 и 3.

### Выводы

Обоснована возможность проведения локального электронно-лучевого старения сварных швов деталей из стали ВЖ-102, обеспечивающего механические свойства сварных соединений в соответствии с нормативной документацией отрасли и АО «Мотор Сич».

Внедрение технологии локального электронно-лучевого старения позволяет сократить цикл обработки деталей при ремонте, а также избежать затрат на изготовление оснастки для печного отжига, что существенно повышает эффективность процесса ремонта изделий (особенно из жаропрочных сталей).

### Список литературы:

1. Химушин Ф. Ф. *Жаропрочные стали и сплавы* / Ф. Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1969.

2. *Справочник – авиационные материалы «Коррозионно-стойкие и жаропрочные стали, и сплавы»*. – М.: Маши.; 1989. – Т.3. – С. 19

Таблица 3. Результаты сравнительных испытаний на длительную прочность образцов из сплава ВЖ-102

| Начальные условия  | Постоянно приложенное напряжение, МПа | Температура испытаний, °С | Количество часов до разрушения, ч |
|--|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Требования нормативной документации  | 400                                   | 700                       | не менее 50                       |
| Сварные швы образцов прошедших печное старение<br>Сварные швы образцов прошедших лучевое старение в течение 120 мин. | 400                                   | 700                       | 99                                |
|  |                                       | 700                       | 109                               |
|  |                                       | 700                       | 107,3                             |
|  |                                       | 700                       | 94                                |
|  |                                       | 700                       | 84,4                              |
|  |                                       | 700                       | 83,4                              |

Таблица 2. Результаты механических испытаний образцов (при комнатной температуре)

|   | Предел прочности, МПа | Предел текучести, МПа | Удлинение, % | Попереч. сужение, % | Ударная вязкость, кгс-м/см <sup>2</sup> | Твердость по Бринеллю, Ø отпечатка, мм |
|---|-----------------------|-----------------------|--------------|---------------------|---|--|
| Основной материал после старения в печи       | 1174                  | 1170                  | 22,0         | 24,6                | 4,13                                    | 3,55                                   |
|   | 1134                  | 825                   | 18,8         | 19,0                | 4,69                                    | 3,55                                   |
| Сварные швы (без последующего старения лучом) | 732                   | 563                   | 11,6         | 55,2                | 10,22                                   | 3,60                                   |
|   | 726                   | 547                   | 14,0         | 60,3                | 10,11                                   | 3,60                                   |
| Старение лучом сварных швов (60 мин.)         | 879                   | 707                   | 14,4         | 33,4                | 10,00                                   | 3,60                                   |
|   | 874                   | 707                   | 11,6         | 33,4                | 3,5                                     |  |
| Старение лучом сварных швов (90 мин.)         | 876                   | 764                   | 11,2         | 39,2                | 5,5                                     | 3,60                                   |
| Старение лучом сварных швов (120 мин.)        | 923                   | 679                   | 12,8         | 36,0                | 6,0                                     | -                                      |
|   | 91,2                  | 66,9                  | 11,2         | 39,2                | 5,33                                    |  |