

УДК 621.791.722:658.56

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СБОРКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

©Малицкий И. Ф., Смирнов И. П.

Українська інженерно-педагогічна академія

## Інформація про авторів:

**Маліцький Ігор Федорович:** ORCID: 0000-0003-0026-2791; malickiy1925@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Смирнов Ігор Петрович:** ORCID: 0000-0002-5982-8123; smirnov\_ip@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

В процессе сварки для получения качественного сварочного соединения необходимо надежная взаимная фиксация свариваемых частей изделия.

Одним из методов фиксации двух элементов изделия, которые имеют вид тел качения, исключающих смещение в процессе сварки, предложена их предварительная сборка с гарантированным натягом. В статье приводится теоретическое обоснование выбора величины натяга охватывающего элемента (втулки) при сборке с термовоздействием в зависимости от температурных осевых, радиальных и окружных деформаций, вызванных электронно-лучевой сваркой. Для обоснования выбора оптимального натяга были проведены экспериментальные исследования на группе образцов. Теоретически решена пространственная задача о температурных напряжениях. В результате теоретических и экспериментальных исследований получена зависимость для определения требуемой величины натяга.

Данный метод расчета позволяет получить упрощенные выражения температурных деформаций, а также необходимый натяг соединения для сборки методом термовоздействия с помощью индукционного нагрева охватываемой детали, исходя из условий не раскрытия стыка привалочных плоскостей. Рассмотренный метод определения величины натяга позволяет обеспечить качественное соединение при электронно-лучевой сварке.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка; стык; натяг; температурные напряжения; температурная деформация.

**Маліцький І. Ф., Смирнов І. П.** «Забезпечення якості складання електроно-проміневою зваркою».

У процесі зварювання для отримання якісного зварювального з'єднання необхідно надійна взаємна фіксація зварювальних частин виробу.

Одним з методів фіксації двох елементів виробу, які мають вигляд тіл качення, що виключають зсув в процесі зварювання, запропонована їх попередня збірка з гарантованим натягом. У статті наводиться теоретичне обґрунтування вибору величини натягу елемента, що охоплює (втулки), при складанні з термовпливом в залежності від температурних осьових, радіальних і кільцевих деформацій, викликаних електронно-променевої зварюванням. Для обґрунтування вибору оптимального натягу були проведені

експериментальні дослідження на групі зразків. Теоретично вирішена просторова задача про температурні напруження. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень отримано залежність для визначення необхідної величини натягу.

Даний метод розрахунку дозволяє отримати спрощені вирази температурних деформацій, а також необхідний натяг з'єднання для збірки методом термовпливу за допомогою індукційного нагріву деталі, що охоплюється, виходячи з умови не розкриття стику приварювальних площин. Розглянутий метод визначення величини натягу дозволяє забезпечити якісне з'єднання при електронно-променевому зварюванні.

**Ключові слова:** електронно-променеве зварювання; стик; натяг; температурні напруження; температурна деформація.

*Malickiy I., Smirnov I. "Ensuring the quality of electron beam welding assembly".*

In the process of welding, to obtain a quality welding joint, reliable mutual fixation of the welded parts of the product is necessary.

One of the methods of fixing the two elements of the product, which have the form of rolling bodies, excluding the displacement during welding, offered their pre-assembly with guaranteed negative allowance. The theoretical justification of the choice of the preload of the female element (bushing) during the assembly with the thermal action depending on the temperature axial, radial and circumferential deformations caused by electron beam welding is given in the article. To substantiate the choice of the optimal pull, experimental studies were carried out on a group of samples. The spatial problem of temperature stresses is solved theoretically. As a result of theoretical and experimental studies, a dependence was obtained to determine the required value of the preload.

This method of calculation makes it possible to obtain simplified expressions for temperature deformations, as well as the necessary preload of the joint for assembly by the thermal action method, by induction heating of the male part, based on the conditions for not opening the welded joint. The considered method of determining the value of preload allows us to ensure high-quality electron-beam welding.

**Key words:** electron beam welding; butt; negative allowance; preload; prestressing; temperature stresses; temperature deformation.

## **1. Постановка проблеми**

При сварке для получения качественного сварочного сопряжения необходимо постоянное взаимное положение свариваемых частей изделия. Вследствие этого способ фиксации свариваемых элементов должен обеспечить неподвижное взаимное расположение свариваемых деталей, так как температурное поле вызывает перемещения свариваемых элементов относительно друг друга. Эти положения касаются и электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

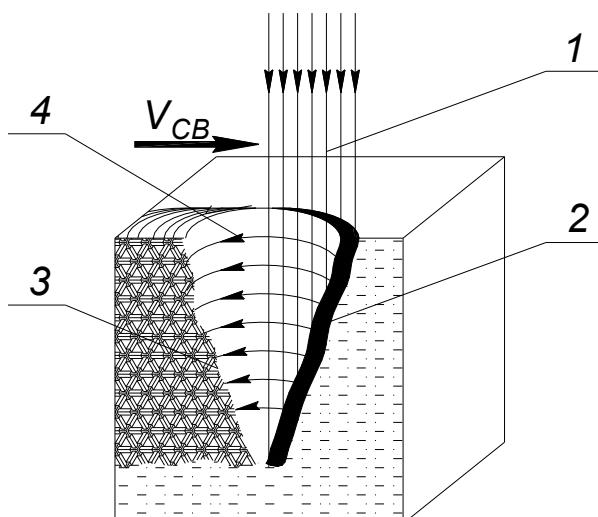
В данной статье рассматривается обеспечение качества электронно-лучевой сварки для особо ответственных изделий, требующих повышенного качества сварочного шва.

## 2. Аналіз последніх ісследований

Сущность процесса ЭЛС состоит в использовании кинетической энергии потока электронов, движущихся с высокими скоростями. Для уменьшения потери кинетической энергии электронов за счет соударения с молекулами воздуха, а также для химической и тепловой защиты катода в электронной пушке, создают вакуум порядка 1...10 Па.

При сварке электронным лучом проплавление имеет форму конуса (рисунок 1). Плавление металла происходит на передней поверхности кратера, а расплавленный металл перемещается по боковым стенкам к задней поверхности, где и кристаллизуется.

Проплавление при электронно-лучевой сварке обусловлено в основном давлением потока электронов с выделением теплоты, реактивным давлением испаряющегося металла, вторичных и тепловых электронов и излучением. Сварка электронным лучом производится непрерывно или импульсно. Импульсная применяется для сварки легкоиспаряющихся металлов (алюминия, магния и др.) с большой плотностью энергии и частотой импульсов 100...500 Гц.



**Рис. 1 – Схема переноса жидкого металла при ЭЛС:**

1 – електронний луч, 2 – передня поверхность кратера, 3 – зона кристаллизации, 4 – путь движения расплавленного металла

В результате повышается глубина проплавления. При правильной установке соотношения времени паузы и импульса можно сваривать очень тонкие листы. Благодаря теплоотводу во время пауз уменьшается протяженность зоны термического влияния.

Сварка электронным лучом имеет следующие преимущества:

- высокая концентрация ввода теплоты в изделие, которая выделяется не только на поверхности изделия, но и на некоторой глубине в объеме основного металла. Фокусировкой электронного луча можно получить пятно нагрева диаметром 0,0002...5 мм, что позволяет за один проход

сваривать металлы толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм. В результате можно получить швы, в которых соотношение глубины провара к ширине до 20:1 и более. Появляется возможность сварки тугоплавких металлов (вольфрама, tantalа и др.), керамики и т.д. Уменьшение протяженности зоны термического влияния снижает вероятность рекристаллизации основного металла в этой зоне.

- малое количество вводимой теплоты. Как правило, для получения равной глубины проплавления при электронно-лучевой сварке требуется вводить теплоты в 4...5 раз меньше, чем при дуговой сварке. В результате резко снижаются коробления изделия.
- отсутствует насыщение расплавленного и нагреветого металла газами.

**3. Цель статьи** – найти зависимость для определения требуемой величины натяга охватывающего элемента (втулки) при сборке с термовоздействием в зависимости от температурных осевых, радиальных и окружных деформаций, вызванных электронно-лучевой сваркой.

#### 4. Основной материал.

Для обеспечения качества сварного шва необходимо сохранение постоянного взаимного расположения свариваемых элементов изделия. Поэтому выбор метода фиксации имеет большое значение, учитывая то, что при сварке возникает температурное поле, вызывающее радиальные, осевые и окружные деформации.

Одним из самых надежных методов фиксации двух элементов изделия, исключающим их смещение в процессе сварки ЭЛС, предложена сборка с гарантированным натягом методом термовоздействия на охватывающий элемент (втулку) [1].

В статье приводится теоретическое обоснование выбора натяга при сборке с термовоздействием в зависимости от температурных деформаций, вызванных ЭЛС, которые действуют вдоль оси сопряжения принятых из условий постоянства зазора между привалочными плоскостями свариваемых элементов.

Для расчетной схемы выбрана цилиндрическая оболочка с изменением температуры вдоль оси (рисунок 2). При этом используется метод, в котором принято, что в каждой точке на поверхности прикладываются силы на единицу площади.

Размер  $d$  (рисунок 2) следует выбирать, исходя из глубины сварного шва и с учетом рекомендаций, данными в [2].

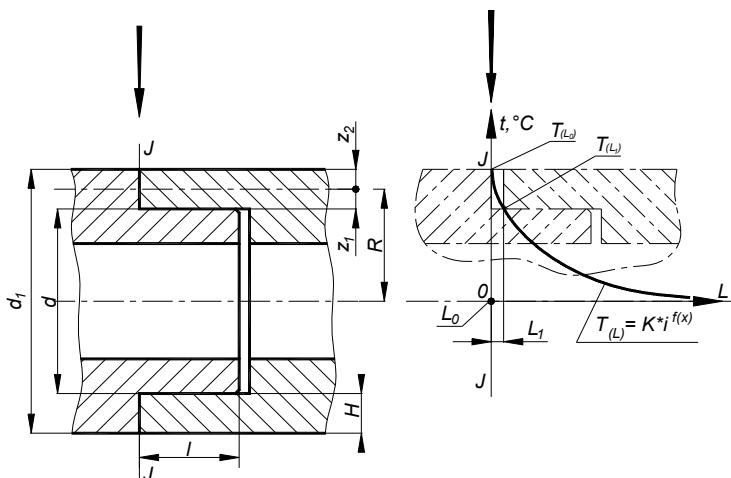


Рис. 2 – Расчетная схема:

а – эскиз сопряжения; б – кривая распределения температуры; стрелка – направление пучка ЭЛС; J – привалочная плоскость

где  $W$  – радиальное перемещение точки на средней поверхности оболочки (втулки) охватывающей детали, мм;

$R$  – средний радиус втулки, мм;

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения, 1/град;

Решение пространственной задачи о температурных напряжениях, заменено решением плоскостной задачи, т.к. поперечные размеры рассматриваемой оболочки малы по сравнению с продольными размерами, что существенно не влияет на результат. Таким образом, решение данной задачи сводится к решению дифференциального уравнения [3].

$$\frac{d^4 W}{dx^4} + 4W = 4R\alpha T, \quad (1)$$

$T$  – температура нагрева деталей.

На основании экспериментальных данных и графиков принят закон распределения температур

$$T(L) = Kl^{f(x)};$$

где  $k$  – коэффициент;

$l = 7,6$  – характеристическая длина для охватывающей детали, в мм;

$f$  – коэффициент трения;

$x$  – отношение осевой координаты оболочки втулки) к характеристической длине.

При  $L_0 = 0$  и  $X_0 = \frac{L_0}{l}$  получим  $T_{(L_0)} = 1000$  °C, а при  $L_1 = 5$  мм и  $X_1 = \frac{5}{7,6} = 0,658$ ,

соответственно,  $T_{(L_1)} = 400$  °C. Тогда:  $T_{(L_0)} = Kl^{f((X_0))} = 1000$  °C;

Если принять  $k = 1000$ , то  $l^{f((X_0))} = 1$ ,  $\alpha l^{f((1_0))} = \frac{4000}{1000} 0,4$  ( $\alpha$  – коэффициент).

В этом случае  $f(x) = \ln 0,4 = -0,916$ . Пусть функция  $f(x)$  в линейном виде  $f(x) = \alpha x$ , тогда  $f(x_1) = \alpha x_1 = \alpha 0,658 = -0,916$ , и, соответственно,  $\alpha = -1,395$ .

Закон распределения температуры для данных деталей может быть записан в виде:

$$T(L) = 1000^{-1,395X}$$

Решение уравнения (1) сводится к общему решению однородного дифференциального уравнения:

$$\frac{d^4 x}{dx^4} + 4w = 0 \quad (2)$$

и частному решению неоднородного дифференциального уравнения

$$W_2 = Cl^{-1,395X} \quad (3)$$

Отсюда определяем коэффициент  $C = -0,12$ . Корни характеристического уравнения

$$h_{1,2} = 1 \pm i$$

Решение уравнения (2) представлено в виде

$$W_1 = l^x (c_1 \cos x + c_2 \sin x) + l^{-x} (c_3 \cos x + c_4 \sin x)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – коэффициенты дифференциального уравнения.

Общее решение дифференциального уравнения выполняется по формуле:

$$W = W_1 - 0,12 l^{-1,395X} \quad (4)$$

Коэффициенты  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – коэффициенты определяются из граничных условий, учитывая, что в сечении шва  $X=0$ , при этом

$W_0$  – перемещение средней поверхности;

$W' = 0$  – угол поворота средней поверхности;

$W'' = 0$  – изгибающий момент на свободном конце насадки;

$W''' = 0$  – перерезывающая сила.

Подставив граничные условия в уравнение (4) и решив систему линейных уравнений методом Крамера, получим:

## Технологія машинобудування

$$W = l(5,13 \times 10^5 \cos x + 1,3 \times 10^4 \sin x) + l^{-x}(0,12l \cos x - 0,425 \sin x) - 0,12l^{-1.395x} \quad (5)$$

В работе [3] осевая деформация оболочки (втулки) определяется по формуле:

$$\sum_x = \mu \frac{W}{R} - \frac{W}{l_2} \frac{d^2 W}{dx^2} Z + (1 + \mu) \alpha T,$$

а так же деформации связаны с перемещениями зависимостью (4)

$$\sum_x = \frac{du}{dx}. \quad (5)$$

Решая уравнение (5), с числовыми значениями параметров, получим перемещение свободного конца оболочки. На внутренней поверхности оболочки при  $Z_1$  и  $Z_2$  получим, соответственно  $u_1, u_2$  ( $z_1$  и  $z_2$  - радиальные координаты оболочки (втулки) измеряемые от средней поверхности в мм;  $u_1, u_2$  - перемещения на внутренней и внешней поверхности оболочки (втулки), мм).

В последующих расчетах принимаем больше по абсолютной величине перемещение на внутренней поверхности  $u_1$ . Усилие, необходимое для устранения относительного перемещения собранных деталей (усилие запрессовки) определяемое по формуле

$$P = \frac{u E R F}{L}; \text{Н} \quad (6):$$

где  $R$  – площадь поверхности сопряжения,  $\text{м}^2$ ;

$E$  – модуль продольной упругости,  $\text{Н/м}^2$ ;

$L$  – длина поверхности сопряжения, м.

Усилие сдвига, определяемое через контактное давление, определяется по формуле, Н

$$P = \pi d L f p_k \quad (7)$$

При решении двух уравнений (6) и (7) контактное давление буде иметь вид, Н/кв.м:

$$p_k = \frac{u E P}{\pi d L^2 f} \quad (8)$$

В работе [4] контактное давление выражено по формуле

$$p_k = \frac{E \delta}{2 d_1 d} (d_1^2 - d^2) \text{ Н/м}^2 \quad (9)$$

где  $\delta$  – натяг в мм;

$d_1$  – наружный диаметр охватывающей детали (мм)

$d$  – диаметр сопряжения (мм)

Определяем величину натяга ( $\delta$ ), используя формулы (8) и (9), мм

$$\delta = \frac{d_1^2}{2 f L^2} \quad (10)$$

Зная степень точности деталей, определяем упрощенное выражение для деформаций, при этом закон распределения температур в виде  $T = Kl^{-nx}$  в интервале от 0 до  $m$  (где,  $m$  – отношение длины посадочной поверхности к характеристической длине):

$$u = \int_0^m (1 + \mu) \alpha k l^{-nx} dx$$

$$u = \frac{(1 + \mu) \alpha k}{n} [1 - l^{-nm}];$$

Решение совместно уравнений (9) и (10) позволяет получить формулу величины натяга, обеспечивающего прочность сопряжения с тепловым воздействием по привалочной плоскости при сварке:

$$\delta = \frac{\sigma_1^2 (1 + \mu) \alpha k}{2 f L^2 n} (1 - l^{nm}) \quad (11)$$

Для проверки правильности выбора оптимального натяга были проведены экспериментальные исследования на группе образцов, собранных с использованием индукционной установки [5], измерены радиальные и осевые биения. Затем все образцы были сварены по привалочным плоскостям на следующих режимах (таблица 1).

**Таблица 1 – Режимы сварки ЭЛС**

| Проходы  | Напряжение $U_{ecr}$ , кВ | Ток электронного пучка $I_p$ , МА | Скорость сварки $u_{cd}$ , м/ч | Вакуум, мм.рт.ст.  |
|--|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 1-й, фокус пучка на уровне поверхности образца           | 25                        | 120                               | 40                             | $5 \times 10^{-5}$ |
| 2-й, поверхность шва расплавлена расфокусированным лучом | 25                        | 40                                | 20                             | $5 \times 10^{-5}$ |

После сварки все образцы снова были измерены и определен натяг, при котором устраняются температурные деформации при постоянных режимах ЭЛС. Натяг, полученный экспериментально, отличался от расчетного не более 6,5 %.

## Выводы

Рассмотренный метод позволяет обеспечить качественное соединение при электронно-лучевой сварке, сохраняя постоянное взаимоположение собираемых деталей. Для надежной фиксации поверхностей деталей относительно друг друга необходим предварительный натяг, обеспечивающий прочность и надежность сохранения положения поверхностей собираемых деталей относительно друг друга с учетом температурных деформаций в процессе сварки. В результате теоретических и экспериментальных исследований получена формула для определения требуемого натяга.

### Список использованных источников:

1. Андреев Г. Я. Тепловая сборка колесных пар / Г. Я. Андреев. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1965. – 227 с.
2. Смирнов И. П. Оптимальный размер диаметра соединений с натягом / И. П. Смирнов, И. Ф. Малицкий // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2017. – № 18. – С. 139-144.
3. Мэнсон С. Температурные напряжения и цикловая усталость / С. Мэнсон; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1974. – 344 с.
4. Дарков А. В. Сопротивление материалов : учеб. / А. В. Дарков, А. С. Шапиро. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1989. – 624 с.
5. Смирнов И. П. Развитие технологии ремонта подъемно-транспортного оборудования / И. П. Смирнов // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2009. – № 4. – С. 170-177.

### References

1. Andreyev, G 1965, *Teplovaya sborka kolesnykh par*, Izdatelstvo KhGU, Kharkiv.
2. Smirnov, I & Malitskiy, I 2017, 'Optimalnyy razmer diametra soyedineniy s natyagom', *Mashynobuduvannia*, no. 18, pp. 139-144.
3. Menson, S 1974, *Temperaturnye napryazheniya i tsiklovaya ustalost*, Mashinostroyeniye, Moskva.
4. Darkov, A & Shapiro, A 1951, *Soprotivleniye materialov*, Vysshaya shkola, Moskva.
5. Smirnov, I 2009, 'Razvitiye tekhnologii remonta podyemno-trasportnogo oborudovaniya', *Mashynobuduvannia*, no. 4, pp. 170-177.

Стаття надійшла до редакції 29 березня 2017 р.