

УДК 621.98:539.376

DOI: 10.30987/article\_5c7434f72d98d2.34602439

**В.Н. Чудин**, д.т.н.,  
(ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»,  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9)  
E-mail: vladimir-chudin@yandex.ru

## Соединение корпусных обечаек при кратковременной ползучести

*Предложены технологическая схема и соотношения для расчета технологии соединения давлением обечаек. Использован метод баланса работ. Приняты уравнения состояний материала в условиях пластичности и кратковременной ползучести. Даны результаты расчетных и технологических работ.*

**Ключевые слова:** пластичность; ползучесть; работа внешних и внутренних сил; прессовое давление; время выдержки и релаксации.

**V.N. Chudin**, Dr. Sc. Tech.  
(FSBEI HE "Russian University of Transport (MITE), Build.9, 9, Obraztsov Str, Moscow, 127994)

## Case shell joint at short-term creep

*A technological system and proportions for the technology computation of shell pressure joint are offered. A method of work balance is used. The equations of material state under conditions of the plasticity and short-term creep are adopted. The results of computation and technological works are given.*

**Keywords:** plasticity; creep; work of internal external forces; press pressure; time of delay and relaxation.

Ряд корпусных узлов летательных аппаратов (обтекатели, топливные емкости, клапаны и др.) изготавливают из обечаек и входящих элементов, которые соединяют неразъемно сваркой плавлением. Сварка плавлением понижает прочность конструкций и не всегда обеспечивает требуемую герметичность соединения. В этой связи перспективны процессы соединения давлением [1]. Процессы реализуют на гидропрессовом оборудовании с нагревом зоны соединения до 0,4...0,6 температуры плавления материалов.

Соединение происходит на диффузионном уровне без плавления зерен материалов, т.е. в твердой фазе. Режимы технологии зависят от температурно-скоростных условий процесса. Этот фактор связан с проявлением вязких свойств (ползучести) нагретого материала, находящегося под внешним давлением [2]. Технология сварки давлением состоит из сборки

входящих деталей, осадки, выдержки во времени под давлением, разгрузки. Расчетно-технологическая схема соединения по торцам двух оболочек показана на рис. 1.

Рассмотрим процесс поэтапно.

**Локальная осадка.** Осадка сборки в зоне сварки производится давлением гидропресса на величину рабочего хода  $\Delta_1$ . Рассчитаем деформационные и силовые параметры осадки. Используем метод работ в соответствии с энергетическим уравнением равновесия [3]:

$$A_1 = A_2 = q\Delta_1 \int dS = \int \sigma_i \varepsilon_i dW. \quad (1)$$

Здесь  $A_1$ ,  $A_2$  – работа внешних и внутренних сил соответственно;  $q$  – давление осадки;  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  – интенсивности напряжений и деформаций;  $\Delta_1$  – величина осадки;  $S$  – площадь приложения давления;  $W$  – объем зоны деформаций. Состояние деформируемого мате-

риала при кратковременной осадке является жестко-пластическим, что определяется уравнением

$$\sigma_i = k_1 \varepsilon_i^m, \quad (2)$$

где  $k_1, m$  – константы упрочнения материала.

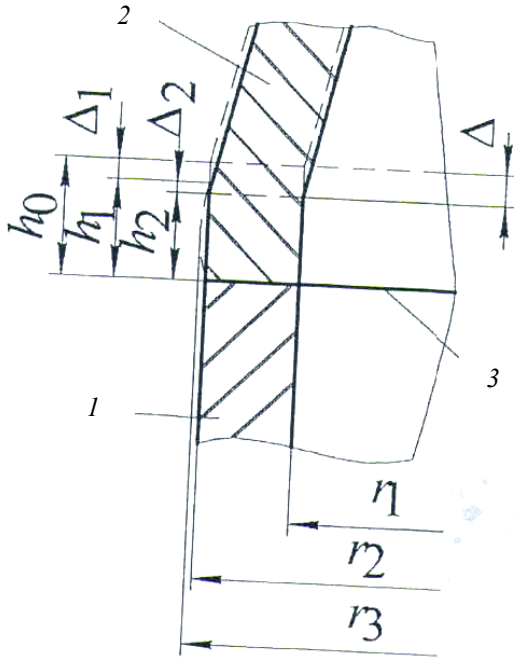


Рис. 1. Расчетно-технологическая схема соединения: 1, 2 – обечайки; 3 – поверхность сварки

Схему деформаций считаем плоской, т.е.

$$A_2 = 2\pi k_1 \left( \frac{2}{\sqrt{3} r_1} \right)^{1+m} h_1 \int_0^{r_3} dh_1 \int_{r_1}^{r_3} r^{2+m} \left( 1 - (1+m) \frac{r_1}{r} \right) dr = 2\pi k_1 K r_1^2 h_1 \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+m}. \quad (6)$$

Здесь

$$K = \left\{ \left[ \left( \frac{r_3}{r_1} \right)^{3+m} - 1 \right] - \left[ \left( \frac{r_3}{r_1} \right)^{2+m} - 1 \right] \right\}.$$

Давление осадки получим в соответствии с уравнением (1) при подстановке выражений (5), (6) в следующем виде:

$$q = 2 \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+m} k_1 K r_1^2 h_1 / \Delta_1 (r_2^2 - r_1^2). \quad (7)$$

**Выдержка под давлением.** На следующем этапе технология предусматривает выдержку заготовок под давлением. Давление осадки может быть уменьшено при увеличении дли-

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_h = \ln \frac{r}{r_1},$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_1}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_r, \varepsilon_i$  – радиальная деформация и деформация по высоте;  $r < r_0 < r_1$  – текущий радиус точки в зоне осадки;  $r_1, r_2$  – внутренний и внешний радиусы заготовки.

В соответствии с уравнением (2) и выражением (3) имеем

$$\sigma_i = k_1 \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_1} \right)^m. \quad (4)$$

Работа внешних сил определяется как

$$A_1 = \pi q \Delta_1 (r_3^2 - r_1^2), \quad (5)$$

где  $r_3 = [c r_2^2 - (c-1) r_1^2]^{1/2}$  – внешний радиус зоны деформаций после осадки;  $c = h_0 / h_1$ ;  $h_0, h_1$  – высота зоны деформаций до и после осадки.

Работу внутренних сил представим в соответствии с уравнением (3) с учетом выражения (4) соотношением

тельности выдержки. На данном этапе интенсивность напряжений постоянна и определяется выражением (4). Развиваются деформации ползучести. Состояние материала при этом определяется как кратковременная ползучесть при полученной пластической деформации осадки (3):

$$\xi_i = \frac{d\varepsilon_i}{dt} = \frac{d\varepsilon_{i\text{пл.}}}{dt} + \xi_{i\text{полз.}}. \quad (8)$$

Здесь  $\varepsilon_i, \xi_i$  – интенсивности накопленных конечных деформаций и их скоростей;  $\varepsilon_{i\text{пл.}}$  – интенсивность пластических деформаций (3);  $\xi_{i\text{полз.}}$  – интенсивность скоростей деформаций ползучести;  $t$  – время.

Так как на данном этапе

$$\sigma_i = \text{const}; \varepsilon_{i\text{пл.}} = \text{const}, \text{ то } \frac{d\varepsilon_{i\text{пл.}}}{dt} = 0,$$

то из уравнения (8) следует, что

$$\xi_i = \xi_{i\text{полз.}} = \frac{d\varepsilon_{i\text{полз.}}}{dt} = k_2 \sigma_i^n, \quad (9)$$

где

$$\varepsilon_{i\text{полз.}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{h_0 - \Delta_1}{h_2} - 1 \right) \quad (10)$$

– интенсивность деформаций ползучести;  $h_2$  – конечная высота зоны деформации после выдержки;  $k_2, n$  – константы ползучести материала.

Ползучесть материала происходит при ходе  $\Delta_2$  и накладывается на пластическую деформацию в зоне осадки. Длительность этапа ползучести определяется по уравнению (9) при подстановке выражения (10), т.е.

$$t_{\text{полз.}} = \frac{2}{\sqrt{3} k_2 \sigma_i^n} \left( \frac{h_0 - \Delta_1}{h_2} - 1 \right). \quad (11)$$

**Релаксация напряжений.** После окончания времени выдержки (11) давление на заготовки снимают. При этом, следовательно,

$$\varepsilon_i = \text{const}; \xi_i = \frac{d\varepsilon_i}{dt} = 0$$

и уравнение (8) получает вид

$$\frac{d\varepsilon_{i\text{пл.}}}{dt} + \xi_{i\text{полз.}} = 0. \quad (12)$$

Происходит релаксация напряжений.

В уравнение (12) внесем производную по времени уравнения (2). С учетом уравнения (9) после интегрирования получим время релаксации напряжений:

$$t_{\text{рел.}} = \left( \frac{1}{k_1} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{1}{(1-mn)k_2} \sigma_i^{\frac{1}{m}-n}. \quad (13)$$

Таким образом, процесс заканчивается при конечной осадке:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = h_0 - h_1$$

и полностью снятом напряжении.

Готовое изделие охлаждается и извлекается из оснастки.

**Технологические данные.** Расчеты выполнены применительно к соединению давлением двух обечаек из алюминиевого сплава АМг6 при температуре 500 °С и полусфер из титанового сплава ВТ14 при 900 °С. Размеры заготовок:  $r_1 = 147$  мм;  $r_2 = 150$  мм; высоты зоны деформаций:  $h_0 = 12$  мм;  $h_1 = 10$  мм;  $h_2 = 9$  мм. Рабочий ход при осадке  $\Delta_1 = 2,0$  мм; при ползучести  $\Delta_2 = 1,0$  мм. Константы уравнений приняты по данным работы [2].

Процесс состоит из следующих операций:

- подготовка заготовок (травление, меднение и др.) и сборка составных элементов изделия;
- вакуумирование и нагрев сборки в оснастке;
- локальная осадка;
- выдержка под давлением;
- разгрузка в закрытой оснастке;
- охлаждение и съём изделия;
- контроль качества.

Технологические работы проводили на гидропрессе мод. ДБ2432. Зону сварки нагревали кольцевым индуктором ТВЧ. Параметры технологии по этапам процесса приведены в табл. 1.

### 1. Параметры технологии по этапам процесса

Материал	Давление при осадке $q$ , МПа	Время осадки $t_{\text{ос}}$ , мин	Давление при ползучести $q_{\text{полз.}}$ , МПа	Время ползучести $t_{\text{полз.}}$ , мин	Деформация $\varepsilon_i$
АМг6	17...20	0,05...0,1	15...18	45	0,35
ВТ14	12...15	0,05...0,1	10...12	30	0,25

Качество сварки по прочности и герметичности соответствовало требованиям эксплуа-

тации. Образцы корпусных изделий представлены на рис. 2.



Рис. 2. Корпусные изделия, полученные соединением обечаек из сплавов АМг6, ВТ14, ВТ6С

### Вывод

Соединение обечаек давлением в твердой фазе эффективно для изготовления корпусов изделий ответственного назначения. Технология процесса проводится поэтапно: осадка, выдержка под давлением, разгрузка. При этом должны быть обеспечены режимы процесса по деформации, давлению, времени.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чудин, В.Н. Научноёмкая технология соединения давлением листовых деталей // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. – 2017. – №3(69). – С. 45-47.
2. *Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов* / Яковлев, С.П., Чудин, В.Н. и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 427с.
3. *Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов* / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С.

Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.

4. Работнов, Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела*. – М.: Наука, 1979. – 744 с.

### REFERENCES

1. Chudin, V.N. Science intensive technology of sheet steel connection by pressure // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No. 3(69). – pp. 45-47.
2. *Isothermal Deformation of High Strength Anisotropic Materials* / Yakovlev, S.P., Chudin, V.N. et al. – M.: mechanical Engineering, 2003. – pp. 427.
3. *Theory of Metal Pressure Forming: college textbook* / V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev, S.A. Golovin, S.S. Yakovlev, V.D. Kukhar; under the editorship of V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 442.
4. Rabotnov, Yu.N. *Mechanics of Deformable Solid*. – M.: Science, 1979. – pp. 744.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

