УДК 539.374; 621.983
С.С. Яковлев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, (4872) 35-14-82,
mpf-tula@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),
В.Н. Чудин, д-р техн. наук, проф., (499) 901-51-44,
mpf-tula@rambler.ru (Россия, Москва, МИИТ),
А.А. Перепелкин, асп., (4872) 35-14-82,
mpf-tula@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Предложены расчетные соотношения для проектирования технологии горячей сварки давлением. В основу расчета положены уравнение кратковременной ползучести и верхнеграничный метод расчета.

Ключевые слова: оребренные панель, сила, сварка, повреждаемость, технологические режимы, поле скоростей, время, технологические параметры.

Корпуса отсеков ракетно-космических аппаратов являются сборно-панельнами ячеистыми конструкциями. Панели могут быть вафельного или гофрового типов: обшивка с элементами внутреннего набора. Их изготовление связано с фрезерованием и аргонодуговой сваркой. Эффективна технология изготовления панелей путем сварки давлением ребер и гофр с основным полотном панели взамен традиционной технологии. Операция сварки проводится с нагревом в вакууме или в среде нейтрального газа в зависимости от материала заготовки [1, 2].

Процесс соединения давлением проводится по этапам: «мгновенная» пластическая деформация, выдержка под давлением (ползучесть), выдержка на конечном уровне деформаций (релаксация). Механическое состояние материала определяется уравнением кратковременной ползучести [3]

$$\xi_e = (\xi_e)_{пл} + (\xi_e)_{полз.},$$

где ξ_e, $(\xi_e)_{пл}$, $(\xi_e)_{полз.}$ - соответственно эквивалентные скорости суммарной пластической деформации и деформации ползучести.

Если состояния пластичности и ползучести выразить уравнениями

$$\sigma_e = A\varepsilon_e^m \tag{1}$$

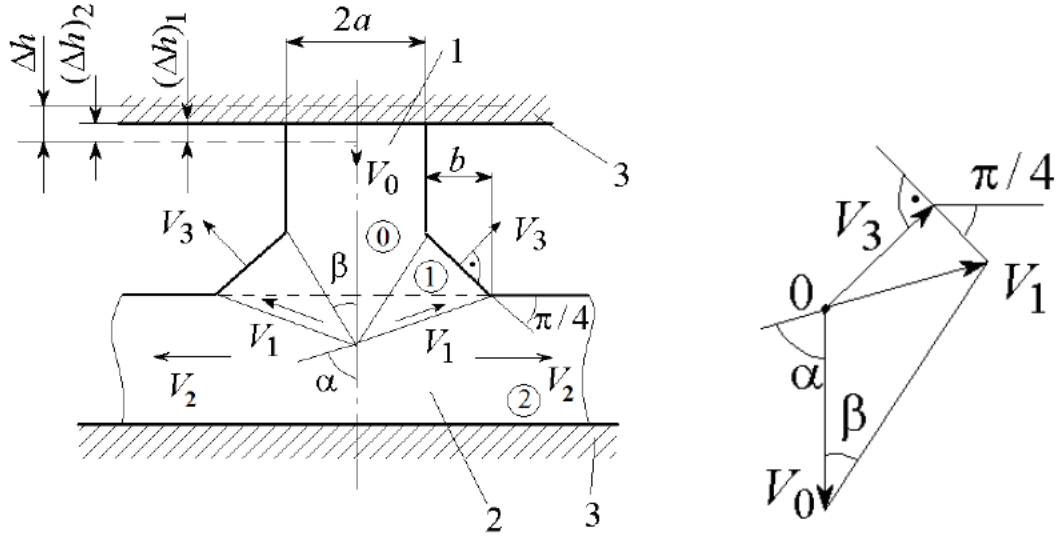
$$\xi_{полз.} = B\sigma_e^n, \tag{2}$$

то исходное уравнение получит вид

$$\xi_e = \frac{1}{m}\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_e^{\frac{1}{m}-1}\frac{d\sigma_e}{dt} + B\sigma_e^n. \tag{3}$$

Здесь σ_e - эквивалентной напряжение; ε_e - конечная эквивалентная деформация; t - время (длительность) процесса; ξ_e - эквивалентная скорость деформации; A, B, m, n - константы материала.

Рассмотрим вариант расчета соединения давлением ребер с полотном (обшивкой) ячеистой вафельной панели. На первом этапе процесса осуществляется «мгновенная» пластическая деформация, ползучесть при этом отсутствует. Процессу соответствует уравнение состояния (1). Используем энергетический метод расчета [4] с привлечением разрывного поля скоростей перемещений в условиях плоской деформации. Жесткоблочное поле скоростей перемещений и его годограф представлены на рис. 1 для вафельной панели.



а *б*

Рис. 1. Схема операции, поле скоростей (а) и годограф (б) на стадии «мгновенной» деформации (при $(\Delta h)_1$) вафельной панели: 1 – ребро; 2 – полотно; 3 – оснастка

Все блоки поля жесткие. Блок «0» перемещается со скоростью V_0, блок «1» - со скоростью V_1, блок «2» неподвижен. Деформации имеют место только на линиях разрыва скорости. Такое поле реализуется, как это следует из годографа скоростей, при условии

$$\frac{\sin\beta \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}+\alpha\right)}{\sin\frac{\pi}{4}\cdot\sin(\alpha-\beta)} = \frac{a}{b},$$

где

$$b = \sqrt{2a(\Delta h)_1},\ \ \beta = arcctg\left[\frac{b}{a}+\left(1+\frac{b}{a}\right)ctg\alpha\right].$$

Длины линий разрыва скоростей, исходя из поля скоростей,

$$l_{01} = \frac{a}{\sin\beta},\ l_{12} = \frac{a+b}{\sin\alpha}. \tag{4}$$

В соответствии с годографом скорости блоков определяются выражениями

$$V_1 = \frac{V_0 \sin\beta}{\sin(\alpha-\beta)},\ V_2 = 0,\ V_3 = \frac{aV_0}{b}\sin\frac{\pi}{4}.$$

На линиях разрыва скоростей имеем

$$(V_{01})_\tau = \frac{V_0 \cdot \sin\alpha}{\sin(\alpha-\beta)} \text{ -} \tag{5}$$

касательная скорость на линии «01»,

$$(V_{12})_\tau = V_1 = \frac{V_0 \cdot \sin\alpha}{\sin(\alpha-\beta)} \text{ -} \tag{6}$$

то же на линии разрыва «12».

Эквивалентные деформации на линиях разрыва выразим, используя соотношения (4) - (6), как

$$\left.\begin{aligned}(\varepsilon_e)_{01} &= \frac{2(V_{01})_\tau \cdot t}{\sqrt{3}\cdot l_{01}} = \frac{2(\Delta h)_1 \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta}{a\sqrt{3}\sin(\alpha-\beta)},\\ (\varepsilon_e)_{12} &= \frac{(V_{12})_\tau \cdot t}{\sqrt{3}\cdot l_{12}} = \frac{(\Delta h)_1 \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta}{(a+b)\sqrt{3}\sin(\alpha-\beta)}.\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Для панели гофрового типа схема операции приведена на рис. 2, где эквивалентные деформации на линиях разрыва скорости выражаются как

$$\left.\begin{aligned}(\varepsilon_e)_{01} &= \frac{2(\Delta h)_1 \sin\alpha \cdot \sin\beta}{a\sqrt{3}\sin(\alpha-\beta)},\\ (\varepsilon_e)_{12} &= \frac{(\Delta h)_1 \cos\alpha \cdot \sin\beta}{c\sqrt{3}\sin(\alpha-\beta)},\\ (\varepsilon_e)_{13} &= \frac{-a(\Delta h)_1 \cos\delta \cdot \cos(\beta+\gamma)}{b^2\sqrt{3}\sin(\beta+\delta)}.\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

В соотношениях (7) и (8) $(\Delta h)_1$ - рабочий ход, соответствующий этапу пластической деформации.

Эквивалентные напряжения на линиях разрыва получим в соответствии с уравнением (1) при учете выражений (7), (8) в виде

$$(\sigma_e)_p = A(\varepsilon_e)_p^m \tag{9}$$

где $(\varepsilon_e)_p$ – эквивалентные деформации соответственно (7) и (8) на первом этапе.

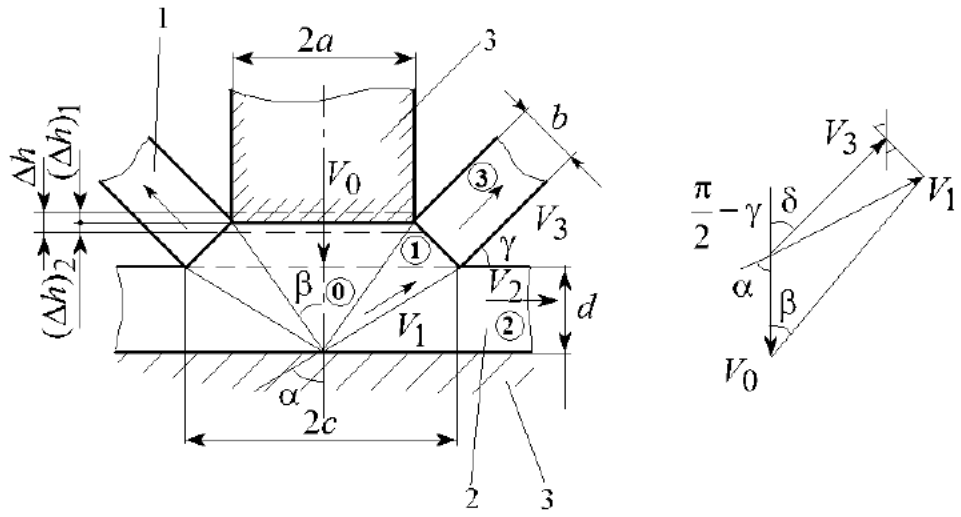


Рис. 2. Схема операции для соединения гофровой панели: 1 – гофровый лист; 2 – полотно; 3 – оснастка

Сделаем далее оценку давления, используя экстремальную верхнеграничную теорему пластичности. Запишем ее в виде

$$qaV_0 \le \frac{1}{\sqrt{3}}\left[(\sigma_e)_{01}\cdot(V_{01})_\tau \cdot l_{01} + (\sigma_e)_{12}\cdot(V_{12})_\tau \cdot l_{12} + (\sigma_e)_{13}\cdot(V_{13})_\tau \cdot l_{13}\right].$$

Подстановка выражений (4), (5), (6), (9) в это неравенство приводит к следующим оценкам:

для вафельной панели

$$q \le A\left(\frac{2(\Delta h)_1}{a\sqrt{3}}\right)^m \left(\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha-\beta)}\right)^{1+m}\left(\frac{1}{\sin\beta}\right)^{1-m} \times$$
$$\times\left[1+\left(\frac{1}{2}\right)^m\left(\frac{a+b}{a}\right)^{1-m}\left(\frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\right)\right]; \qquad (10)$$

для гофровой панели

$$q \le \frac{A(\Delta h_1)^m}{(\sqrt{3})^{1+m}}\left[\left(\frac{2}{a}\right)^m\left(\frac{1}{\sin\beta}\right)^{1-m}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha-\beta)}\right)^{1+m} +\right.$$
$$\left. + \frac{1}{a}\left(\frac{c}{\cos\alpha}\right)^{1-m}\left(\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha-\beta)}\right) + \left(\frac{b}{\cos\delta}\right)^{1-m}\left(\frac{a\cdot\cos(\beta+\gamma)}{b\cdot\sin(\beta+\delta)}\right)^{1+m}\right]. \qquad (11)$$

Соотношения (10) и (11) определяют давление «мгновенного» деформирования на этапе сжатия жесткопластического упрочняющегося материала при $(\Delta h)_1$.

На следующем этапе производится выдержка заготовок во времени под постоянным давлением пресса. На всех линия разрыва поля скоростей достигнутые напряжения остаются постоянными, т.е.

$$\sigma_e = const,\ \frac{d\sigma_e}{dt} = 0. \qquad (12)$$

В условии (12) $\sigma_e = (\sigma_e)_p$ - эквивалентные напряжения (9) на соответствующих линиях разрыва. Происходит ползучесть, и механическое состояние материала определяется уравнением (2). Накапливаемая конечная эквивалентная деформация при этом

$$\varepsilon_e = (\varepsilon_e)_{пл} + (\varepsilon_e)_{полз} = (\varepsilon_e)_{пл} + B\sigma_e^n \cdot t, \qquad (13)$$

где $(\varepsilon_e)_{пл}$ - эквивалентная «мгновенная» пластическая деформация (7) или (8) на рассматриваемых линиях разрыва при ходе $(\Delta h)_1$; $(\varepsilon_э)_{полз}$ - деформация ползучести при ходе $(\Delta h)_2$.

Если состояние свариваемости заготовок оценивать как

$$\psi = \frac{\sigma_e \cdot \varepsilon_e}{A_{пр}},\ \text{где}\ 0 \le \psi \le 1,\ 0 \le t \le t_k,$$

то полная свариваемость произойдет при конечном ходе Δh. При этом $\psi = 1$ и, следовательно,

$$\psi_k = \frac{\sigma_e}{A_{пр}}\left((\varepsilon_e)_{пл} + B\sigma_e^n \cdot t\right) = 1.$$

Здесь ψ_k, t_k - конечные величины, соответствующие $\Delta h = (\Delta h)_1 + (\Delta h)_2$.

Отсюда следует, что минимальное конечное время выдержки

$$(t_k)_{\min} = \frac{A_{пр} - A(\varepsilon)_{пл}^{1+m}}{A^{1+n} \cdot B(\varepsilon)_{пл}^{(1+n)m}}. \qquad (14)$$

Для другой группы материалов полную свариваемость определим условием

$$\psi_к = \frac{\varepsilon_e}{(\varepsilon)_{пр}} = 1,$$

откуда

$$(t_k)_{\min} = \frac{(\varepsilon_e)_{пр} - (\varepsilon)_{пл}}{B\sigma_e^n}. \qquad (15)$$

Рассмотрим выдержку заготовок при постоянной деформации. При этом

$$\varepsilon_e = const,\ \xi_e = \frac{d\varepsilon_e}{dt} = 0. \qquad (16)$$

В условии (16) $\varepsilon_e = (\varepsilon_e)_{пл} + (\varepsilon_e)_{полз}$ в соответствии с (13). Происходит релаксация напряжений при постоянных деформациях, и уравнение (3) получает вид

$$\frac{1}{m}\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{m}}\frac{1}{B}\int_{(\sigma_e)_{рел}}^{\sigma_e}\sigma_e^{\frac{1}{m}-n-1}d\sigma_e = t\,. \qquad (17)$$

Здесь σ_e - эквивалентное напряжение (12) в соответствии с уравнением (9); $(\sigma_e)_{рел}$ - текущее эквивалентное напряжение при релаксации.

Как следует из уравнения (17), текущее напряжение на линиях разрыва

$$(\sigma_e)_{рел} = A^{\frac{1}{m}}\left[\frac{1}{A^n}(\varepsilon_e)_p^{1-mn} - (1-mn)Bt\right]^{\frac{m}{1-mn}}, \qquad (18)$$

где $(\varepsilon_e)_p$ - определено выражениями (7) и (8).

Время полной релаксации следует из соотношения (18) при $(\sigma_e)_{рел} = 0$, т.е.

$$t_{рел} = \frac{1}{(1-mn)A^n \cdot B}(\varepsilon_e)_p^{1-mn}. \qquad (19)$$

Предложенная математическая модель может быть использована для оценки технологических параметров изотермической сварки давлением элементов корпусных панелей в режиме кратковременной ползучести.

Работа выполнена по ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)», грантам РФФИ и по государственному контракту в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Список литературы

1. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С.П. Яковлев [и др.]. М.: Машиностроение: 2003. 427 с.

2. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев [и др.]. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

3. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М. Наука, 1979. 744 с.

4. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков [и др.]; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева.

М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

S.S. Yakovlev, V.N. Chudin, A.A. Perepelkin

THE MATHEMATICAL MODEL OF ISOTHERMAL CORPSE PANELS ELEMENTS PRESSURE WELDING

The calculation ratios for hot pressure welding technologies designing are offered. As the basis. The short durated creeping equation and for upper limit estimating method were used.

Key words: ribbed panel, force, welding, damageability, technological regimes, velocity field, time, technological parameters.

Получено 16.09.11

УДК 621.983; 539.374

С.С. Яковлев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой (4872) 35-14-82,
mpf-tula@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),
В.Н. Чудин, д-р техн. наук, проф., (499) 901-51-44,
mpf-tula@rambler.ru (Россия, Москва, МИИТ),
С.Н. Ларин, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-14-82,
mpf-tula@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Описаны технологические процессы изготовления типовых одно- и многослойных конструкции формообразованием с диффузионной сваркой.

Ключевые слова: многослойные конструкции, лист, пневмоформовка, ползучесть, деформирование, сварка давлением.

Технологические процессы производства деталей и узлов авиакосмических летательных аппаратов имеют основную задачу – обеспечение проектных тактико-технических характеристик изделий при оптимальных сроках освоения серийного производства. Эта задача ставится на стадии проектно-конструкторских разработок и опытного изготовления. В этой связи для создания новых летательных аппаратов необходимы конструкторско-технологические решения.

Взаимовлияние конструкции и технологии позволяет совершенствовать оптимальным образом проектно-конструкторские разработки и методы технологии по качеству изделий, трудоемкости и в конечном итоге по стоимости и срокам освоения производства. Реализуя задачи проектировщиков изделий, технологии становятся наукоемкими, так как способы обработки, на которых они построены, требуют теоретических методов