

УДК 621.961.2
DOI:10.30987/2223-4608-2021-3-16-18

В.Н. Чудин, д.т.н.
(ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
В.И. Платонов, к.т.н., **П.В. Романов**, аспирант
(ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», 300012, пр. Ленина, д. 92)
E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Вариационная оценка режима осадки при сварке давлением*

Предложены соотношения для расчета деформационного и силового режимов осадки при сварке заготовок давлением. Использован энергетический метод расчета давления применительно к плоскому разрывному полю скоростей перемещений. Минимизация давления произведена вариационно. Приведена оценка повреждаемости материала заготовок.

Ключевые слова: осадка; ползучесть; давление; деформации; повреждаемость материала.

V.N. Chudin, Dr. Sc. Tech.
(FSBEI HE "Russian University of Transport (MIIT)", Building 9, 9, Obraztsov Str., Moscow, 127994)
V.I. Platonov, Can. Sc. Tech., **P.V. Romanov**, Post graduate student
(FSBEI HE Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)

Variation assessment of yield mode at pressure welding

There are offered ratios for the computation of deformation and power modes of yielding at billet pressure welding. A power method is used for the computation of pressure with reference to a flat discontinuous field of movement speeds. Pressure minimization is carried out in a variation way. The assessment of billet material damageability is shown.

Keywords: yield; creep; pressure; deformations; material damageability.

Сварка заготовок давлением производится путем их пластического деформирования осадкой и выдержкой под давлением в изотермических условиях нагрева [1–2]. Давление, деформации, время, определяют качество соединения и являются предметом расчета режимов технологии. Расчетная схема процесса осадки-сварки обечаек по торцевым поверхностям приведена на рис. 1, а.

Схема равнозначна односторонней осадке при ходе Δ_1 со скоростью перемещения нажимной плиты v_0 . Деформацию примем плоской, что допустимо при условии $2r \geq (25...30)\delta$. На схеме обозначено: $2r$ – диаметр обечаек; δ – толщина их стенки; $2h$ – размер зоны изотермического нагрева (зона деформаций). Осадка сборки заготовок производится кратковременно. Материал заготовок при этом находится в состоянии пластичности с упрочнением, что выражается уравнением:

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m, \quad (1)$$

где σ_e , ε_e – эквивалентные напряжение и деформация; A , m – константы упрочнения.

Для расчета кратковременной осадки будем

использовать энергетический метод с привлечением разрывного поля скоростей перемещений материала заготовок [3]. Поле изображено на схеме осадки и состоит из блока деформаций «I» и жестких блоков «0». Блоки разделены линиями разрыва скорости «0I». Данные линии выражаются уравнениями $y(\pm x)$, которые определяются в ходе расчета. Принятому полю соответствует энергетическое уравнение:

$$\frac{1}{2} q \delta v_0 \leq \int \sigma_e \xi_e dS + \frac{1}{\sqrt{3}} \int \sigma_{ep} v_\tau dl_p, \quad (2)$$

где q – давление осадки; σ_e , σ_{ep} – эквивалентные напряжения в блоке деформаций площадью S на линиях разрыва скорости длиной l_p ; ξ_e – эквивалентная скорость деформаций в пластическом блоке; v_τ – касательная скорость на линиях разрыва скорости.

В силу симметрии поля неравенство (2) записано для половины этого поля. План скоростей (см. рис. 1, б) соответствует этой части поля. Установим кинематику деформирования, используя план скоростей. В блоке деформаций имеем:

$$v_1 = \frac{v_0}{2} \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_0}{2} y' - \quad (3)$$

– скорость перемещения точек блока;

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{dy}{dx} = \operatorname{arctg} y' -$$

* Работа выполнена в рамках гранта по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2601.2020.8.

– угол между касательной скоростью в произвольной точке линии разрыва и положительным направлением оси x ; y' – производная уравнения линии $y(x)$.

Так как проекции скорости (3) на оси координат $v_{1x} = 0$; $v_{1y} = v_1$, то компоненты скоростей деформаций будут выражены как:

$$\xi_x = \frac{\partial v_{1x}}{\partial x} = 0; \quad \xi_y = \frac{\partial v_{1y}}{\partial y} = 0;$$

$$\xi_{xy} = \frac{\partial v_{1y}}{\partial x} = \frac{v_0}{2} y'',$$

где y'' – вторая производная уравнения $y(x)$.

Компоненты скоростей деформаций и уравнение (1) позволяют представить эквивалентную скорость деформаций, деформацию и напряжение в виде:

$$\xi_e = \frac{v_0}{2\sqrt{3}} y''; \quad \varepsilon_e = \frac{\Delta_1}{v_0} \xi_e; \quad \sigma_e = A \left(\frac{\Delta_1}{2\sqrt{3}} y'' \right)^m \quad (4)$$

$$\int \sigma_e \xi_e dS = A \left(\frac{1}{2\sqrt{3}} \right)^{1+m} \Delta_1^m \cdot v_0 \int_0^h (\delta - y) (y'')^{1+m} dx. \quad (5)$$

На поверхности разрыва скорости в соответствии с планом скоростей имеем нормальные и касательные скорости:

$$\left. \begin{aligned} v_n &= \frac{v_0}{2} \sin \alpha = \frac{v_0}{2} \frac{y'}{\sqrt{1+(y')^2}}; \\ v_\tau &= \frac{v_0}{2} \cos \alpha + v_1 \sin \alpha = \frac{v_0}{2} \sqrt{1+(y')^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Эквивалентные деформацию и напряжение

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \int \sigma_{ep} v_\tau dl_p = \frac{A v_0}{2(\sqrt{3})^{1+m}} \int_0^h \left(\frac{1}{y'} \right)^m [1 + (y')^2]^{1+m} dx. \quad (9)$$

Соотношение для расчета давления осадки следует из неравенства (2) при учете выражений (5) и (9). Таким образом:

$$q \leq \frac{A}{\delta} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^{1+m} \int_0^h F(y, y', y'') dx, \quad (10)$$

где

$$F = \left(\frac{\Delta_1}{2} \right)^m (\delta - y) (y'')^{1+m} + \left(\frac{1}{y'} \right)^m [1 + (y')^2]^{1+m}. \quad (11)$$

Расчет давления связан с нахождением искомой функцией $y(x)$ под интегралом. Это является вариационной задачей по определению функции $f(x)$ (уравнения линии разрыва скорости), минимизирующей интеграл (10). Минимизация следует из уравнений Эйлера [4]

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial F}{\partial y''} \right) = 0 \quad (12)$$

с граничными условиями: $y(0) = 0$; $y(h) = \delta$.

Решим данное уравнение методом коллокации [5]. Первому условию соответствует уравнение вида

$$y = c_1 x^2 + c_2 x.$$

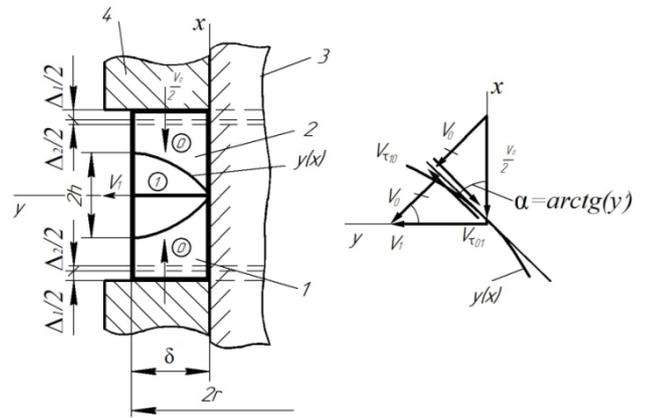


Рис. 1. Схема осадки-сварки давлением, поле (а) и план скоростей (б):

1, 2 – заготовки; 3 – оправка; 4 – нажимная плита

Учитывая выражения (4), запишем:

получим, учитывая выражения (6) и уравнение (1), т.е.

$$\varepsilon_{ep} = \frac{v_\tau}{\sqrt{3} v_n} = \frac{1+(y')^2}{\sqrt{3} y'}; \quad (7)$$

$$\sigma_{ep} = A \left[\frac{1+(y')^2}{\sqrt{3} y'} \right]^m. \quad (8)$$

Используя выражения (6) и (8), запишем:

Выразив отсюда константу c_2 , подставив второе условие и внося в это уравнение, получим

$$y = c_1 x^2 + \left(\frac{\delta}{h} - c_1 h \right) x. \quad (13)$$

В точке коллокации $x = h/2$ уравнение (13) и его производные получают вид:

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{1}{2} \left(\delta - \frac{1}{2} h^2 c_1 \right); \\ y' &= \frac{\delta}{h}; \quad y'' = 2c_1; \quad y''' = y^{(4)} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

В уравнении (12) необходимо произвести заданное дифференцирование, используя выражение (11), внести уравнение (14) и его производные. Далее определяется константа c_1 и записывается минимизирующая функция (13). После этого следует расчет давления (10) при известном уравнении линии «01».

При жестко-блочном поле скоростей все блоки жесткие, деформации происходят только на прямых линиях разрыва скорости. Таким образом:

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta}{h} x; \quad y' = \frac{\delta}{h}; \quad y'' = 0.$$

Зависимость (10) для расчета давления осадки сводится к соотношению

$$q \leq A \left\{ \frac{h}{\sqrt{3}\delta} \left[1 + \left(\frac{\delta}{h} \right)^2 \right] \right\}^{1+m}, \quad (15)$$

Давление (10) уменьшают и осадка на величину хода Δ_2 происходит при постоянном давлении в условиях ползучести. Осадка при ползучести рассмотрена в работах [1, 2] на основе уравнения состояния

$$d\varepsilon_{e \text{ полз.}} = B \sigma_e^n dt,$$

где $\varepsilon_{e \text{ полз.}}$, σ_e – эквивалентные деформация и напряжение при ползучести; B , n – константы материала; t – время.

Оценку конечной повреждаемости материала заготовок в зоне деформаций при кратковременной осадке произведем по критерию [6]

$$\omega = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{e \text{ пр.}}(\eta)} = \frac{\Delta_1}{\sqrt{3}h \cdot \varepsilon_{e \text{ пр.}}(\eta)}. \quad (16)$$

Здесь $0 \leq \omega \leq 1$ – повреждаемость материала; ε_e – эквивалентная деформация при осадке; $\varepsilon_{e \text{ пр.}}(\eta)$ – предельная эквивалентная деформация как функция жесткости схемы напряжений η .

Жесткость схемы напряжений при плоской осадке определяется выражением [3]

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{q}{\sigma_e},$$

где σ_e , q – величины, определяемые выражениями (4) и (10). При известной жесткости предельная эквивалентная деформация устанавливается по экспериментальной диаграмме « $\eta - \varepsilon_{e \text{ пр.}}$ » и рассчитывается повреждаемость (16).

Расчеты выполнены для осадки обечаек из сплавов АМг6 и ВТ14. Константы материалов приведены в табл. 1. Приняты размеры: $\delta = 5$ мм; $2h = 30$ мм; $\Delta_1 = 5$ мм; $\Delta_2 = 3$ мм; $2r = 100$ мм.

1. Механические характеристики материалов

Сплав	Температура деформирования, °С	Константы материала		
		A , МПа	m	$\varepsilon_{e \text{ пр.}}$
АМг6	530	55	0,1	0,8
ВТ14	900	60	0,05	1

Эквивалентная деформация при кратковременной осадке составила $\varepsilon_e = 0,2$. Максимальное давление для обечайки из алюминиевого сплава $q = 59,2$ МПа; для титанового $q = 65,4$ МПа при конечной повреждаемости $\omega = 0,24$ и $\omega = 0,19$ соответственно. Повреждаемость при кратковременной осадке соответствует допустимой ($\omega < 0,5$) для деталей ответственного назначения.

Расчет давления (15) по жестко-блочному полю скоростей с прямыми линиями разрыва дает величины на 15...20 % большие, чем вариационный расчет (10).

Деформационный и силовой режимы осадки определяют качество соединения обечаек при последующей их сварке давлением. На рис. 2 представлены образцы изделий, полученные осадкой и сваркой обечаек. Данные по испытаниям и качеству изделий при осадке и соединению давлением приведены в работе [1].



Рис. 2. Образцы корпуса и торовой емкости, полученные осадкой-сваркой обечаек

Выводы

1. Вариационный расчет режима осадки при сварке давлением более точен, чем расчет по жестко-блочному полю скоростей, что соответствует экстремальной верхнеграничной теореме пластичности.

2. Расчет определяет режим осадки в части кинематики, деформаций, давления и повреждаемости материала соединяемых деталей, что обеспечивает качество изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев, С.П., Чудин, В.Н. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов – М.: Машиностроение, 2003. – 427 с.
2. Чудин, В.Н. Соединение корпусных обечаек при кратковременной ползучести. // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – №3(93). – С. 39 – 42.
3. Платонов, В.И., Романов, П.В., Чудин, В.Н. Расчет режимов осадки ребра на плите при их сборке // Заготовительные производства в машиностроении. – 2020. – №9. – Т.18. – С. 421 – 424.
4. Мышкис, А.Д. Математика для технических ВУЗов. Специальные курсы – СПб.: «Лань», 2009. – 640 с.
5. Демидович, Б.П., Марон, И.А., Шувалова, Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. – СПб.: «Лань», 2010. – 400 с.
6. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.

REFERENCES

1. Yakovlev, S.P., Chudin, V.N. *Isothermal Deformation of High-strength Anisotropic Materials* – M.: Mechanical Engineering, 2003. – pp. 427.
2. Chudin, V.N. Joint of body shells at short-term creep. // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.3. – pp. 39–42.
3. Platonov, V.I., Romanov, P.V., Chudin, V.N. Yield mode computation of rib on slab at slab assemblage. // *Pre-production in Mechanical Engineering*. – 2020. – No.9. – Vol.18. – pp. 421–424.
4. Myshkis, A.D. *Mathematics of Engineering Colleges. Special Courses* – S-Pb.: “Lan”, 2009. – pp. 640.
5. Demidovich, B.P., Maron, I.A., Shuvalova, E.Z. *Numerical Methods of Analysis. Function Approximation, Differential and Integral Equations* – S-Pb.: “Lan”, 2010. – pp. 400.
6. Kolmogorov, V.L. *Metal Forming Mechanics*. Yekaterinburg: USTU-UPI. – 2001. – pp. 836.

Рецензент д.т.н.
Виктор Иванович Трегубов