

УДК 621.98:539.376
DOI: 10.12737/24965

В.Н. Чудин, д.т.н.
(Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ),
г. Москва, ул. Часовая, 22/2, стр. 1)
E-mail: vladimir-chudin@yandex.ru

Научноёмкая технология соединения давлением листовых деталей

Предложены процессы и расчет режимов соединения давлением деталей конструкций в изотермических условиях. Состояние деформируемого материала принято ползуче-пластическим. Применен энергетический метод расчета параметров технологии. Приведены технологические данные и образцы изделий.

Ключевые слова: ползуче-пластичность; интенсивности деформаций и напряжений; давление; релаксация; время.

V.N. Chudin, D. Eng.
(Moscow State University of Communications (MIET), Building 1, 22/2, Chasovaya Str., Moscow)

Science intensive technology in steel plates pressure joint

The processes and computation of modes for the pressure joining of parts and structures under isothermal conditions are offered. The state of material under deformation is assumed to be creeping-plastic. The power method for the computation of technology parameters is used. The technological data and samples of products are shown.

Keywords: creeping plasticity; intensities of deformations and stresses; pressure; relaxation; time.

В конструкциях узлов летательных аппаратов применяют неразъемные соединения входящих деталей и их элементов. Соединения осуществляют, как правило, аргоно-дуговой электросваркой. Сварка плавлением не в полной мере гарантирует необходимый уровень прочности и герметичности соединений.

Альтернативой сварки плавлением является соединение давлением, которое производят ниже температуры плавления, т.е. в твердой фазе без оплавления и роста зерен материала, что обеспечивает качество соединения по названным параметрам. Соединение давлением производят на гидропрессовом оборудовании в изотермических условиях при регламентированных скоростях деформирования [1]. Такой процесс, в частности, используют при формообразовании давлением газа корпусных ячеистых оболочек [2].

Рассмотрим на базе сварки давлением процесс изготовления сложных по конструкции деталей из высокопрочных сплавов. Материал деталей в зоне деформирования при проведении процесса находится в состоянии ползуче-пластичности [3], что выражается уравнением

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \xi_{i \text{ пл}} + \xi_{i \text{ полз}}, \quad (1)$$

где ε_i – интенсивность деформаций при завершении операции; $\xi_{i \text{ пл}}$ – интенсивность скоростей пластических деформаций; $\xi_{i \text{ полз}}$ – интенсивность скоростей деформаций ползучести; t – время.

Процесс осуществляется поэтапно: пластическое сжатие входящих в конструкцию деталей в местах контакта; выдержка под давлением при развитии деформаций ползучести; сня-

тие давления и охлаждение изделия. Расчетно-технологические схемы процесса для сварки объемных и листовых деталей приведены на рис. 1.

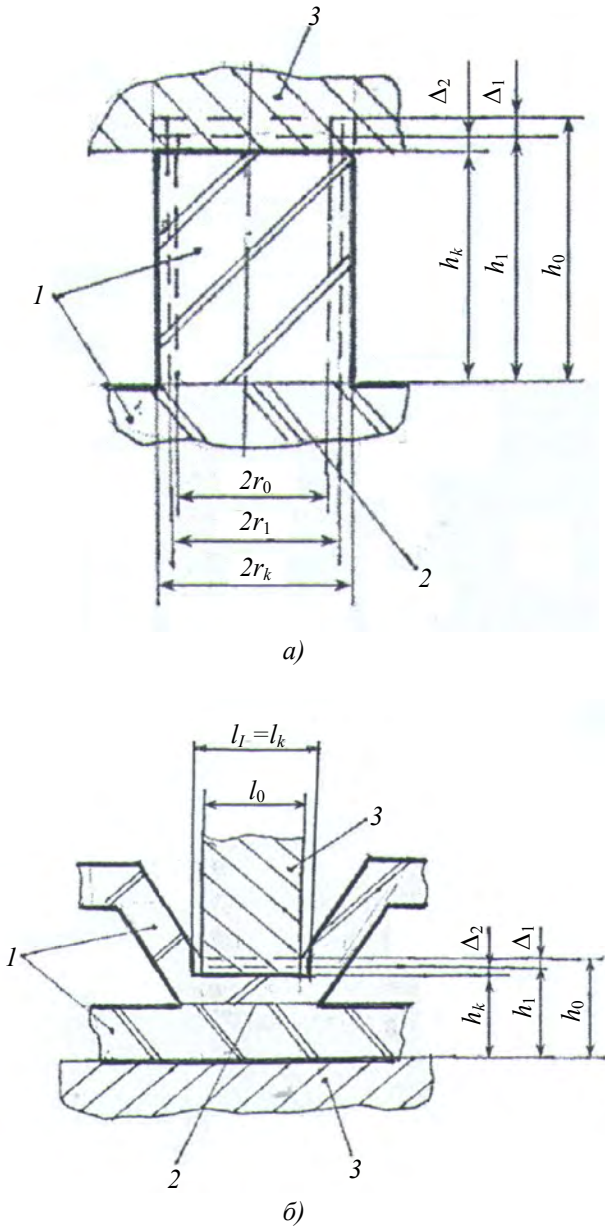


Рис. 1. Расчетно-технологические схемы процесса: а – осесимметричные объемные детали; б – листовые детали; 1 – соединяемые детали; 2 – поверхность соединения; 3 – штамп

Пластическое сжатие. На данном этапе производится кратковременная осадка сборки деталей при ходе штампа Δ_1 . При этом происходит пластическая деформация в зоне контакта деталей. Ползучесть отсутствует, т.е. $\varepsilon_{i\text{ полз}} = 0$; $\xi_{i\text{ полз}} = 0$.

В этой связи уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \xi_{i\text{ пл}} = \frac{d\varepsilon_{i\text{ пл}}}{dt}, \text{ где } \varepsilon_{i\text{ пл}} = A\sigma_i^m, \quad (2)$$

что соответствует состоянию пластичности с упрочнением; $\varepsilon_{i\text{ пл}}$, σ_i – интенсивности деформаций и напряжений при осадке соответственно; A , m – константы упрочнения материала.

В зависимости от формы соединяемых деталей схемы деформаций примем осесимметричной для цилиндрических деталей (рис. 1, а) и плоской для листовых деталей (рис. 1, б). Интенсивности деформаций и скоростей деформаций на этапе осадки запишем в виде

$$\varepsilon_{i\text{ пл}} = k \ln \frac{h_0}{h}, \quad (3)$$

$$\xi_{i\text{ пл}} = \frac{d\varepsilon_{i\text{ пл}}}{dt} = \frac{kv_0}{h}, \quad (4)$$

где $k = 1$ – для осесимметричной схемы; $k = \frac{2}{\sqrt{3}}$ – для плоской схемы; h_0 , h – высота деталей до начала осадки и текущая высота соответственно; v_0 – скорость перемещения нажимного инструмента.

Интенсивность напряжений при этом в соответствии с уравнением (2) и выражением (3) определяется соотношением

$$\sigma_i = \left(\frac{\varepsilon_{i\text{ пл}}}{A} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{k}{A} \ln \frac{h_0}{h} \right)^{\frac{1}{m}} = \left[\frac{k}{A} \left(\frac{h_0}{h} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (5)$$

Для расчета давления осадки используем метод баланса мощностей внешних и внутренних сил [1] в соответствии с уравнением

$$q = \frac{1}{Sv_0 w} \int \sigma_i \xi_{i\text{ пл}} dW,$$

где q – давление; S – площадь приложения давления; W – объем зоны деформаций.

Внося в это уравнение выражения (4), (5) и разложив под интегральную функцию в виде

$$\frac{1}{h} \left(\ln \frac{h_0}{h} \right)^m = h_0^m h^{-1-\frac{1}{m}} \left(1 - \frac{h}{mh_0} \right),$$

получим после интегрирования

$$q = k^{1+\frac{1}{m}} \left(\frac{h_0}{Ah_1} \right)^{\frac{1}{m}} h_1 \int_0^{\frac{1}{h}} \left(1 - \frac{h}{mh_0} \right)^{\frac{1}{m}} dh = k^{1+\frac{1}{m}} \left(\frac{h_0}{Ah_1} \right)^{\frac{1}{m}} \left[\frac{h_1}{(1-m)h_0} - m \right], \quad (6)$$

где $h_1 = h_0 - \Delta_1$ – высота (толщина) деталей после осадки.

Давление осадки, как следует из выражения

(6), зависит от степени формоизменения.

Выдержка под давлением. На данном этапе сборку деталей выдерживают во времени под давлением осадки. Выдержка под давлением вызывает развитие деформаций ползучести материала соединяемых деталей при величине хода нажимного инструмента штампа Δ_2 .

Состояние материала определяется уравнением (1), в котором $\xi_{i\text{пл}} = 0$, т.е.

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \xi_{i\text{полз}} = B\sigma_i^n \text{ при } \sigma_i = \text{const.} \quad (7)$$

Интенсивность деформаций ползучести при конечной высоте (толщине) h_k деталей составляет

$$\varepsilon_{i\text{полз}} = k \ln \frac{h_1}{h_k} = \frac{k\Delta_2}{h_k}. \quad (8)$$

На этапе выдержки давление (6) может быть уменьшено. При этом интенсивность напряжений принимается на 20...25% меньше расчетного (5) при увеличении времени выдержки. При учете выражений (5), (8) из уравнения (7) следует время (длительность) выдержки (ползучести):

$$t_{\text{полз}} = \frac{\varepsilon_{i\text{полз}}}{B\sigma_i^n} = \frac{k\Delta_2}{Bh_k\sigma_i^n}, \quad (9)$$

где

$$\sigma_i = (0,75...0,8) \frac{k}{A} \left(\frac{h_0}{h_1} - 1 \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (10)$$

Снятие давления. На данном этапе давление снимают полностью, не раскрывая оснастки. Делается выдержка во времени при достигнутой за счет осадки и ползучести интенсивности деформаций

$$\varepsilon_i = k \ln \frac{h_0}{h_k} = k \left(\frac{h_0}{h_k} - 1 \right).$$

Происходит релаксация напряжений. На этом этапе

$$\varepsilon_i = \text{const}, \quad \frac{d\varepsilon_i}{dt} = 0.$$

В соответствии с уравнением (2)

$$\xi_{i\text{пл}} = \frac{d\varepsilon_{i\text{пл}}}{dt} = mA\sigma_i^{m-1} \frac{d\sigma_i}{dt}. \quad (11)$$

Внеся выражение (11) и уравнение ползучести (7) в уравнение состояния (1), получим

$$\frac{Am}{B} \sigma_i^{m-n-1} d\sigma_i = -dt.$$

В конце релаксации $\sigma_i \rightarrow \sigma_{i\text{рел}} = 0$. Интегрирование этого уравнения приводит к зависимости для расчета времени релаксации, т.е.

$$t_{\text{рел}} = \frac{mA}{(m-n)B} \sigma_i^{m-n}. \quad (12)$$

Технологические данные. Расчетные и экспериментальные результаты получены для соединения деталей из титанового сплава ВТ14 при 900 °С и алюминиевых сплавов АМг6, 1201 при 500 °С. Сплавы мелкозернистые. Приняты следующие размеры: для цилиндрических деталей (рис. 1, а) $r_0 = 20$ мм; $h_0 = 40$ мм; $h_k = 35$ мм; для листовых деталей (рис. 1, б) $l_0 = 5$ мм; $h_0 = 6$ мм; $l_k = 5,5$ мм; $h_k = 5$ мм. При этом $(\Delta_1 + \Delta_2) / h_0 = 0,15...0,20$.

Давление кратковременной осадки уменьшали и выдерживали сборки деталей на этапе соединения. Процесс осуществляли на гидропрессе, оснащенной системами нагрева, вакуумирования и подачи в штамп аргона от баллона [1]. Режимы давления и времени по этапам процесса указаны на графиках рис. 2.

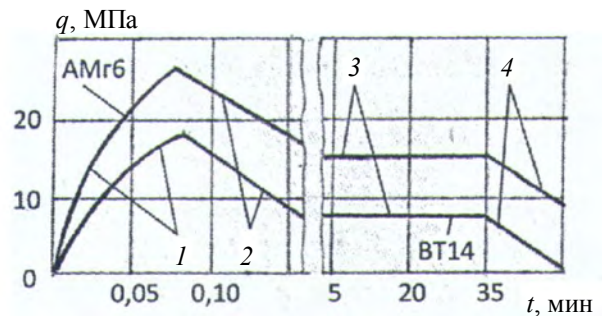


Рис. 2. Графики «давление – время»:

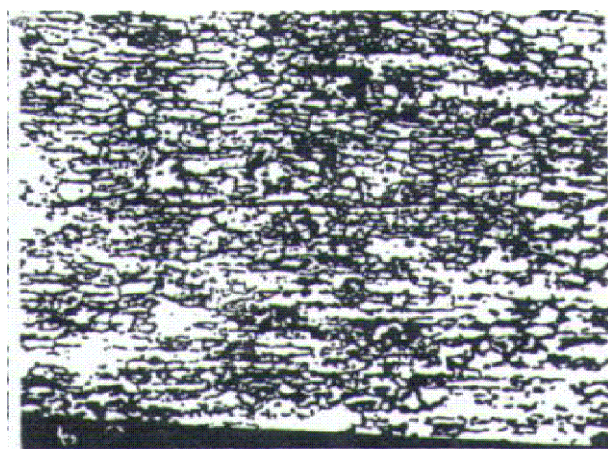
1 – осадка; 2 – сброс давления; 3 – выдержка под давлением; 4 – снятие давления

Соединение деталей из алюминиевых сплавов происходит при больших величинах давления и деформации, чем деталей из титана. Давление при выдержке уменьшается при увеличении ее длительности. На качество соединения деталей из алюминиевых сплавов влияет наличие окисной пленки на контактных поверхностях.

Для обеспечения качества соединения применяли медный подслои. Соединение деталей производили в вакууме при остаточном давлении $0,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Соединение деталей из титановых сплавов стабильно в вакууме или в нейтральном газе. Металлография и механические испытания показали [1, 2], что на контактных границах соединяемых деталей образуются общие зерна (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Металлография соединений: сплав АМг6 (а); сплав ВТ14 (б)

Характеристики прочности в местах соединений соответствуют прочности исходных материалов и составляют $(0,9...1,1) \cdot 10^{-3}$ МПа для титанового сплава ВТ14 и $0,25 \cdot 10^{-3}$ МПа для алюминиевого сплава АМг6.

Процесс сводится к следующей последовательности операций:

- подготовка исходных деталей, в том числе меднение поверхностей соединения деталей из алюминиевых сплавов;

- нагрев и вакуумирование в оснастке сборки деталей;
- осадка сборки на величину $\Delta_1 / h_0 \leq 15...20$ и выдержка под давлением в течение 30...45 мин;
- выдержка при снятом давлении в течение 10...15 мин;
- охлаждение и удаление изделия из штампа.

Выводы

1. Процессы соединения давлением в условиях ползуче-пластичности применимы для изготовления сложных деталей и конструкций при высоких требованиях по герметичности и коррозионной стойкости.

2. Расчетная модель соединения давлением учитывает факторы (давление, деформации, время), формирующие качество изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / Яковлев С.П., Чудин В.Н. и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 427 с.
2. Чудин, В.Н. Формообразование газом корпусных ячеистых конструкций // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №9(51). – С. 35–38.
3. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.

REFERENCES

1. *Isothermal Deformation of High-Strength Anisotropic Materials* / Yakovlev S.P., Chudin V.N. et al. – М.: Mechanical Engineering, 2003. – pp. 427.
2. Chudin, V.N. Case-shaped cellular structure gas shaping // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №9(51). – pp. 35–38.
3. Rabotnov, Yu.N. *Mechanics of Deformable Solid*. – М.: Science, 1979. – pp. 744.

Рецензент д.т.н. В.А. Дёмин

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 09.02.2016. Выход в свет 31.03.2017.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Брянский государственный технический университет"
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16