

УДК 621.983; 539.974

Перепелкин А. А.
 Чудин В. Н.
 Черняев А. В.
 Яковлев Б. С.

ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С УТОЛЩЕНИЯМИ В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Детальями с краевыми утолщениями являются силовые элементы шпангоутов корпусов летательных аппаратов, днищ емкостей, арматуры трубопроводов двигательной установки. Их изготавливают штамповкой с нагревом или без нагрева в зависимости от обрабатываемых материалов. Последние упрочняются и, с другой стороны, проявляют релаксацию напряжений при деформировании с нагревом. Эти факторы влияют на технологические силы, степени формоизменения, качество изделий. Технология требует обоснованных режимов обработки, что возможно на основе расчетных методов [1–6]. В этой связи рассмотрим процессы формообразования утолщений на осесимметричных деталях операциями изотермического выдавливания и высадки.

Механическое состояние деформируемого материала будем выражать функцией:

$$\sigma_e = A \psi^\eta \varepsilon_e^m \dot{\varepsilon}_e^n, \quad (1)$$

где $\varepsilon_e, \dot{\varepsilon}_e$ – соответственно эквивалентные деформация и скорость деформаций; ψ – сплошность материала при его деформировании; A, m, n – константы упрочнения; η – константа разрушения.

Воспользуемся энергетическим уравнением равновесия деформируемого материала в соответствии с верхнеграничной теоремой пластичности [1, 6]. Применительно к жестко-блочным полям скоростей перемещений при плоской схеме деформаций и условию текучести Мизеса. Это уравнение запишем в виде:

$$qaV_0 \leq \sum \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{ep} V_p l_p + \tau_k V_k l_k \right). \quad (2)$$

Здесь q – внешнее давление на контуре заготовки; σ_{ep} – эквивалентные напряжения на линиях разрыва скоростей перемещений; τ_k – касательное напряжение на границах трения; V_0, V_p, V_k – соответственно скорости движения материала на входе в матрицу, на линиях разрыва скоростей и на контактных границах трения; a, l_p, l_k – соответственно длина линии приложения давления, длины линий разрыва скоростей и границ трения.

Целью работы является изучение влияния технологических параметров при штамповке осесимметричных деталей с утолщениями.

Прямое выдавливание. Схема прямого выдавливания, поле скоростей перемещений и годограф скоростей представлены на рис. 1. Поле принято жестко – блочным. Оно кинематически возможно при условии для углов α, β :

$$\frac{a}{c} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos(\beta - \gamma)}{\cos \beta \cdot \sin(\alpha - \gamma)}, \quad h = a \cdot \operatorname{ctg} \alpha + c \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Установим, используя годограф, кинематику поля скоростей. Скорости движения блоков:

$$V_0, V_1 = \frac{V_0 \sin \alpha}{\sin(\alpha - \gamma)}, \quad V_2 = \frac{a}{c} V_0, \quad V_3 = 0. \quad (3)$$

Касательные скорости на линиях разрыва:

$$(V_p)_\tau = (V_{01})_\tau = \frac{V_0 \sin \gamma}{\sin(\alpha - \gamma)}, \quad (V_{12})_\tau = \frac{aV_0 \sin \gamma}{c \cdot \cos(\beta - \gamma)}, \quad (V_{13})_\tau = V_1, \quad (V_{20})_\tau = V_k = V_2. \quad (4)$$

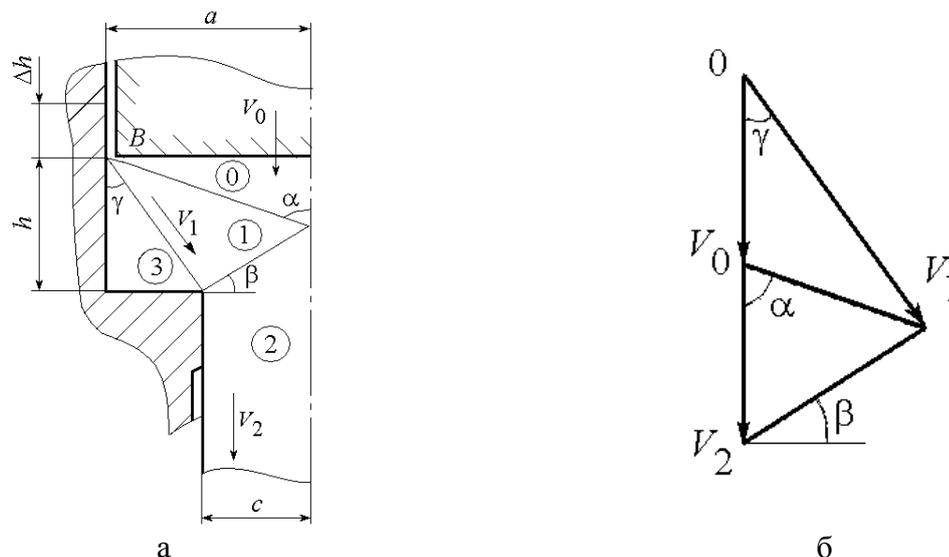


Рис. 1. Схема прямого выдавливания, поле скоростей (а) и годограф (б)

На всех линиях разрыва, в том числе на контактной границе трения эквивалентные скорости деформаций и деформации будем определять в соответствии с выражениями:

$$(\xi_e)_p = \frac{2(V_p)_\tau}{\sqrt{3}l_p}, \quad (5)$$

$$(\varepsilon_e)_p = (\xi_e)_p \cdot \frac{\Delta h}{V_0}, \quad (6)$$

здесь $(V_p)_\tau$ – разрывы касательных скоростей формулам (4); Δh – рабочий ход пуансона;

$$l_p = l_{01} = \frac{a}{\sin \alpha}, \quad l_{12} = \frac{c}{\cos \beta}, \quad l_{13} = \frac{h}{\cos \gamma}, \quad l_{02} = l_k \quad (7)$$

– длины линий разрыва скоростей.

Эквивалентные напряжения на линиях разрыва получим подстановкой выражений (5), (6) в уравнение (1), т. е.

$$(\sigma_e)_p = A \psi^\eta \left(\frac{\Delta h}{V_0} \right)^m \left(\frac{2(V_p)_\tau}{\sqrt{3}l_p} \right)^{m+n}, \quad (8)$$

где $(V_p)_\tau$ – разрывы скоростей (4); l_p – длины линий разрыва (7).

Касательное напряжение трения на матрице примем в виде

$$\tau_k = \mu(\sigma_e)_k, \quad (9)$$

где $(\sigma_e)_k$ – интенсивность напряжений; μ – коэффициент трения.

Здесь контактное нормальному напряжению (9) соответствует выражение (8) при $(V_p)_\tau = V_2$, $l_p = l_k$.

Внесем соотношения (8) и (9) с учетом выражений для скоростей (4) и длин линий разрыва (7) в неравенство (2). Получим следующую оценку давления прямого выдавливания:

$$\begin{aligned}
 q \leq & \frac{A}{2a} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+m+n} \cdot (\Delta h)^m V_0^n (\psi_{01}^\eta)^n \left(\frac{\sin \gamma}{\sin(\alpha - \gamma)} \right)^{1+m+n} \left(\frac{a}{\sin \alpha} \right)^{1-m-n} + \\
 & + \psi_{12}^\eta \left(\frac{a \cdot \sin \gamma}{c \cdot \cos(\alpha + \beta)} \right)^{1+m+n} \cdot \left(\frac{c}{\cos \beta} \right)^{1-m-n} + \psi_{13}^\eta \left(\frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \gamma)} \right)^{1+m+n} \times \\
 & \times \left(\frac{h}{\cos \gamma} \right)^{1-m-n} + \mu \psi_{20} \sqrt{3} \left(\frac{a}{c} \right)^{1+m+n} l_k^{1-m-n}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Здесь $\psi_{01}, \psi_{12}, \psi_{10}, \psi_{20}$ – сплошности материала на соответствующих линиях разрыва, расчет которых рассмотрим ниже. Отметим, что $\psi = 1$ соответствует штамповке без учета потери сплошности.

Высадка фланца. Схема высадки фланца, поле и годограф скоростей показаны на рис. 2. Поле должно удовлетворять условиям:

$$\begin{aligned}
 \frac{a}{h} &= \frac{\sin \alpha \cdot \sin(\beta + \gamma)}{\sin \gamma \cdot \cos(\alpha - \beta)}, \\
 h &= a \cdot \operatorname{ctg} \alpha + c \cdot \operatorname{tg} \beta,
 \end{aligned}$$

из которых устанавливают углы α, β . Скорости в этом поле определяются аналогично изложенному выше соотношениями:

$$\begin{aligned}
 (V_{01})_\tau &= \frac{V_0 \cos \beta}{\cos(\alpha - \beta)}, \quad (V_{12})_\tau = \frac{a V_0 \sin \beta}{h \cdot \sin(\beta + \gamma)}, \\
 (V_{13})_\tau &= V_1 = \frac{V_0 \sin \alpha}{\cos(\alpha - \beta)}, \quad (V_{20})_\tau = V_k = V_2 = \frac{a}{h} V_0.
 \end{aligned} \tag{11}$$

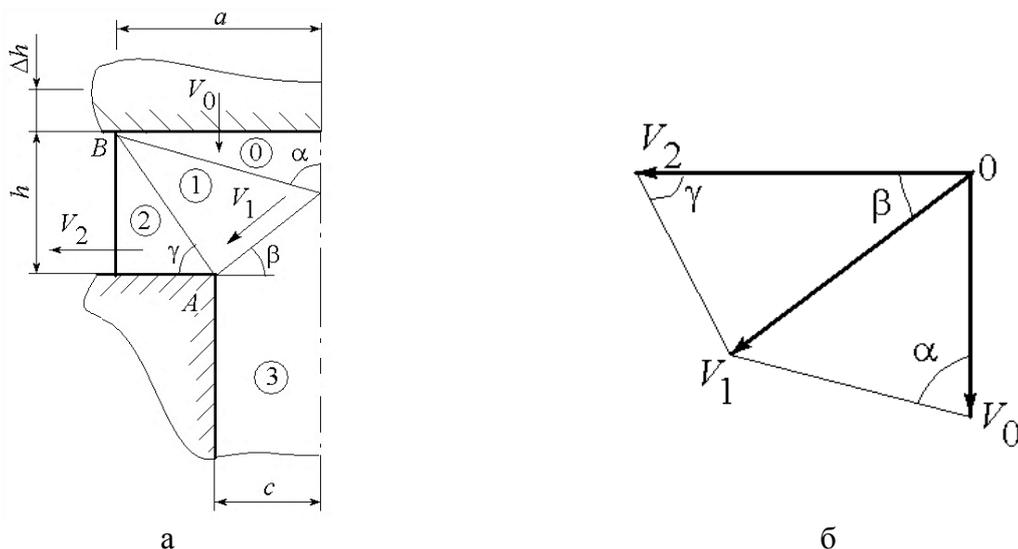


Рис. 2. Схема высадки, поле скоростей (а) и годограф (б)

Эквивалентные скорости деформаций, деформации напряжения записываются в соответствии с выражениями (5), (6), (8), (9). Длины линий разрыва скоростей определяются геометрией поля, т. е.

$$l_{01} = \frac{a}{\sin \alpha}, \quad l_{12} = \frac{h}{\sin \gamma}, \quad l_{13} = \frac{c}{\cos \beta}, \quad l_{02} = l_k = a - c. \tag{12}$$

Подстановка выражений (11), (12) с учетом уравнения (1) в неравенство (2) дает следующую оценку давления высадки:

$$\begin{aligned}
q \leq & \frac{A}{2a} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+m+n} \cdot (\Delta h)^m V_0^n (\psi_{01}^\eta)^n \left(\frac{\cos \beta}{\cos(\alpha - \beta)} \right)^{1+m+n} \left(\frac{a}{\sin \alpha} \right)^{1-m-n} + \\
& + \psi_{12}^\eta \left(\frac{a \cdot \sin \beta}{h \cdot \sin(\beta + \gamma)} \right)^{1+m+n} \cdot \left(\frac{h}{\sin \gamma} \right)^{1-m-n} + \psi_{13}^\eta \left(\frac{\sin \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} \right)^{1+m+n} \times \\
& \times \left(\frac{c}{\cos \beta} \right)^{1-m-n} + \mu \psi_{20}^\eta \sqrt{3} \left(\frac{a}{h} \right)^{1+m+n} (a - c)
\end{aligned} \quad (13)$$

Сплошность материала заготовки. Сплошность деформируемого материала определяет качество изделия и безопасные в части разрушения материала условия штамповки. Воспользуемся уравнениями механики разрушения [2–5].

Ряду материалов соответствует деформационная теория разрушения. При этом состояние сплошности определяется уравнением:

$$d\psi = 1 - \frac{d\varepsilon_e}{d(\varepsilon_e)_{np}}, \quad (14)$$

где $1 \geq \psi \geq 0$ – сплошность материала при эквивалентной деформации $0 \leq \varepsilon_e \leq (\varepsilon_e)_{np}$; $(\varepsilon_e)_{np}$ – предельная деформация материала при данной температуре.

Подстановка выражения (6) с учетом (5) в уравнение (14) приводит к зависимости, определяющей сплошность на линиях разрыва скоростей, т. е.:

$$\psi = 1 - \frac{2(\Delta h)(V_p)\tau}{V_3 l_p V_0}. \quad (15)$$

Расчет по зависимости (15) производится постановкой в него скоростей (4) и длин линий разрыва (7) – для прямого выдавливания или скоростей (11) и линий разрыва (12) – для высадки.

Сплошность, которая оценивается из зависимости (15), определяется степенью формоизменения и не зависит от скорости операций.

Ряду других материалов соответствует кинетическая теория прочности. При учете соотношений (5) и (8) ее можно выразить уравнением:

$$d\psi = -\frac{1}{A_*} \sigma_e \xi_e dt = -\psi^n \frac{A(\Delta h)^m}{A_*(V_0)^{1+m}} \left(\frac{2(V_p)\tau}{\sqrt{3}l_p} \right)^{1+m+n} d(\Delta h). \quad (16)$$

Здесь A_* – константа уравнения для данного материала при заданной температуре.

Из уравнения (17) получим при $\eta = 1$, что

$$\psi = \exp \left[-\frac{A}{A_*(1+m)} \left(\frac{\Delta h}{V_0} \right)^{1+m} \left(\frac{2(V_p)\tau}{\sqrt{3}l_p} \right)^{1+m+n} \right], \quad (17)$$

а при $\eta \neq 1$

$$\psi = \left[1 - \frac{1-\eta}{1+m} \frac{A}{A_*} \left(\frac{\Delta h}{V_0} \right)^{1+m} \left(\frac{2(V_p)\tau}{\sqrt{3}l_p} \right)^{1+m+n} \right]^{\frac{1}{1-\eta}}, \quad (18)$$

Для расчета сплошности на линиях разрыва, в том числе на границе трения, необходимо подставить в зависимости (17), (18) касательные скорости (4) и длины линий разрыва (7) – для выдавливания и соответственно выражения (11) и (12) – для высадки. Состояние

сплошности материала зависит от конечной деформации и скорости проведения операции. Условие $\psi > 0$ в зависимостях (15), (17), (18) определяет отсутствие разрушения и, следовательно, возможность реализации принятой степени формообразования.

Результаты расчетов. Расчеты выполнены для операций прямого выдавливания и высадки фланца для изделий из титановых сплавов ВТ14 при 950 °С и ВТ6С при 860 °С принято нелинейно-вязким. Первому из этих материалов соответствует уравнение сплошности (14) с константами $A = 145 \text{ МПа} \cdot \text{с}^n$, $m = 0$, $n = 0.35$, $(\varepsilon_e)_{np} = 1.23$, $\eta = 0.45$. Второму материалу соответствует уравнение (18) с константами $A = 405 \text{ МПа} \cdot \text{с}^n$, $A_* = 55 \text{ МПа}$, $m = 0$, $n = 0.45$, $\eta = 0,45$ [5]. Размеры заготовок $a = 10 \text{ мм}$, $a = 10 \text{ мм}$, $h = 20 \text{ мм}$, $\Delta h = 10 \text{ мм}$. Коэффициент трения $\mu = 0.15$.

Опасными в части возможного разрушения являются точки A, B – пересечение линий разрыва (рис. 1, 2). Результаты расчета сплошности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величины сплошности материала заготовки

Материал	Операция	Скорость $V_0, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	Точки	
			A	B
			Сплошность, ψ	
ВТ14	Выдавливание (рис. 1, а)	-	0,40	0,75
	Высадка (рис. 2, а)	-	0,15	0,65
ВТ6С	Выдавливание (рис. 1, а)	1,0	0,27	0,48
		0,5	0,35	0,57

Как следует из результатов расчета при выдавливании сплошность материала сохраняется в большей мере, чем при высадке изделий одинаковых размеров. В этой связи здесь могут быть достигнуты большие степени формообразования. Для первого из рассмотренных сплавов сплошность зависит только от накопленной деформации; для второго – от деформации и скорости операции, причем она падает с увеличением скорости.

Рассчитаны также давления операций, что представлено на графиках рис. 3. Давление существенно зависит от скорости операции и при высадке оно меньше чем при выдавливании для тех же размеров изделия.

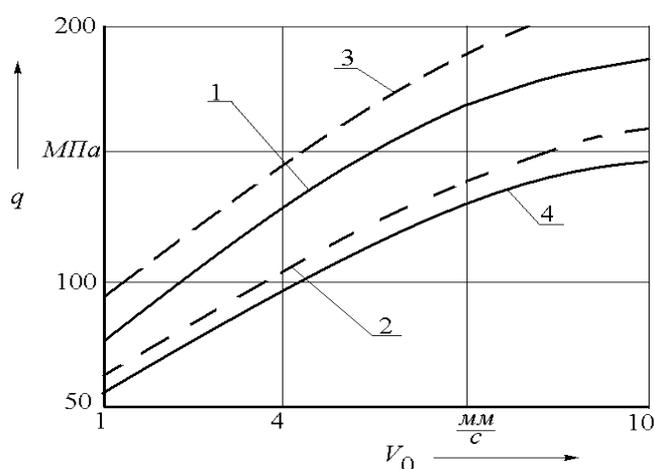


Рис. 3. Зависимости изменения давления от скорости операции (сплав ВТ14): кривые 1, 2 – выдавливание и высадка соответственно с учетом повреждаемости материала; кривые 3, 4 – то же без учета повреждаемости

Потеря сплошности уменьшает давление операции. Значительно снижение давления при низких скоростях штамповки на гидропрессовом оборудовании. Данные по технологии штамповки приведены в работе [5]. Образцы деталей представлены на рис. 4.



Рис. 4. Образцы изделий из алюминиевых и титановых сплавов

ВЫВОДЫ

1. Изотермическая штамповка фланцевых утолщений сопровождается деформационным упрочнением и разрушением в связи с вязкими свойствами материалов, что влияет на силы операций и сплошность материала изделий.

2. Регулирование скорости обработки позволяет уменьшать как технологические силы, так и повреждаемость материала, что способствует обеспечению качества изделий.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания №2014/227 на выполнение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014–2020 годы и гранта РФФИ № 14-08-31225 мол_а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
2. Романов К. И. Механика горячего формоизменения металлов / К. И. Романов. – М. : Машиностроение, 1993. – 240 с.
3. Малинин Н. Н. Ползучесть в обработке металлов / Н. Н. Малинин – М. : Машиностроение, 1986. – 216 с.
4. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев. – М. : Машиностроение, 2004. – 427 с.
5. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С. С. Яковлев, С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, В. И. Трегубов, А. В. Черняев. – М. : Машиностроение, 2009. – 412 с.
6. 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.

REFERENCES

1. Teorija plasticheskih deformacij metallov / E.P. Unksov [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1983. – 598 s.
2. Romanov K. I. Mehanika gorjachego formoizmenenija metallov / K. I. Romanov. – M. : Mashinostroenie, 1993. – 240 s.
3. Malinin N. N. Polzuchest' v obrabotke metallov / N. N. Malinin – M. : Mashinostroenie, 1986. – 216 s.
4. Izotermicheskoe deformirovanie vysokoprochnyh anizotropnyh materialov / S. P. Jakovlev, V. N. Chudin, S. S. Jakovlev, Ja. A. Sobolev. – M. : Mashinostroenie, 2004. – 427 s.
5. Izotermicheskoe formoizmenenie anizotropnyh materialov zhestkim instrumentom v rezhime kratkovremennoj polzuchesti / S. S. Jakovlev, S. P. Jakovlev, V. N. Chudin, V. I. Tregubov, A. V. Chernjaev. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 412 s.
6. Teorija obrabotki metallov davleniem. Uchebnik dlja vuzov / V. A. Golenkov, S. P. Jakovlev, S. A. Golovin, S. S. Jakovlev, V. D. Kuhar'; pod red. V. A. Golenkova, S. P. Jakovleva. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 442 s.

Перепелкин А. А. – канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО ТулГУ

Чудин В. Н. – д-р техн. наук, проф. МИИТ

Черняев А. В. – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО ТулГУ

Яковлев Б. С. – канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО ТулГУ

ФГБОУ ВПО ТулГУ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тульский государственный университет», г. Тула, РФ;

МИИТ – Московский институт инженеров железнодорожного транспорта, г. Москва, РФ.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 16.03.2015 г.