

то из нормального уравнения (16) получим вектор  $\tilde{\beta}$ :

$$\tilde{\beta} = (2.8, 0.5, 0.5, \sqrt{2}, 0).$$

Вектор наблюдений  $y$  сформирован по аналогии с вектором наблюдений для функции отклика (9).

Если из системы координат  $O_1x_1x_2\tilde{x}_3\tilde{x}_4$  вернуться к начальной системе координат  $Ox_1x_2x_1^2x_2^2$ , то значения  $\beta_0, \beta_{11}, \beta_{22}$  при  $\phi = \frac{\pi}{4}$  примут вид:

$$\begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \beta_0 = \bar{\beta}_0 - \beta_{11}c - \beta_{22}c = 2.$$

Таким образом, вектор  $\beta$  равен  $\beta = (2, 0.5, 0.5, 1, 1)$ .

Мы получили тот же самый вектор  $\beta$ , что и для центрального композиционного плана (10).

Применение предлагаемого подхода и метода получения главных центральных осей показано на примере расширения множества центральных композиционных планов для  $k = 2$ . Однако данный подход и метод могут быть применены для расширения множества центральных композиционных планов при  $k > 2$ .

### Выводы

1. Предложен подход к расширению множества центральных композиционных планов.
2. Указанный подход основан на представлении задачи построения планов как задачи конструирования точечного материального тела, состоящего из точек единичной массы и координаты которых равны координатам точек плана.
3. Предложен метод, обеспечивающий ортогональное планирование для исходного плана, который основан на построении главных центральных осей для точечного материального тела.
4. Предложенный подход продемонстрирован на примере построения плана на базе центрального композиционного плана при  $k = 2$ ,  $\alpha = 1$ , который обеспечивает ортогональное планирование.

### Литература

1. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. М., Радио и связь, 1974. – 248 с.
2. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статических данных. М., Юрайт, 2012. – 399 с.
3. Петкевич В.В. Теоретическая механика. М., Наука, 1981.

### **Изотермическая осадка бруса при плоской деформации**

д.т.н. проф. Соболев Я.А., д.т.н. проф. Чудин В.Н.

Университет машиностроения, МГУ «Путей сообщения»

8 (909) 159-6460, [Yasobolev@mail.ru](mailto:Yasobolev@mail.ru), 8 (917) 532-2613, [vladimir-chudin@yandex.ru](mailto:vladimir-chudin@yandex.ru)

*Аннотация.* Предложены отношения для расчета технологических параметров изотермической осадки бруса. Материал принят вязко-пластичным, повреждаемым. Использован энергетический метод расчета и метод осредненных напряжений. Приведены расчетные данные.

*Ключевые слова:* вязкость, поле скоростей, линии разрыва, мощность, давление.

При обработке давлением заготовок из высокопрочных сплавов применяют операцию изотермической осадки на гидропрессовом оборудовании. При этом силовые и деформаци-

онные параметры обработки зависят от скоростного режима, т.к. деформационное упрочнение материала заготовки сопровождается релаксационным разупрочнением во времени [1, 2]. Кроме того, в процессе обработки нарастает повреждаемость материала, что влияет на качество изделия. Эти факторы определяют технологический режим обработки.

Рассмотрим осадку бруса. Будем использовать энергетический метод расчета применительно к разрывному полю скоростей перемещений [2, 3]. Материал заготовки принимаем вязко-пластичным, чему соответствует уравнения состояния

$$\sigma_3 = A \cdot \varepsilon_3^m \cdot \xi_3^n \quad (1)$$

где:  $\sigma_3, \varepsilon_3, \xi_3$  – соответственно эквивалентные напряжения, деформация и скорость деформации.

$A, m, n$  – константы материала.

Схема осадки, разрывное поле и план скоростей приведены на рисунке 1. Поле состоит из жестких блоков "0" и блоков деформаций "1". Скорости перемещения блоков соответственно  $V_0/2$  и  $V_1$ . Блоки разделены линиями разрыва скорости, симметричными относительно осей координат. Уравнение линии разрыва  $y(x)$  для четверти сечения бруса определяется в ходе расчетов. Рассчитаем мощности в блоке деформаций и на поверхности разрыва скорости.

Скорости в блоке деформаций, исходя из плана скоростей (рисунок 1б),

$$V_1 = \frac{V_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{V_0}{2} \cdot y' \quad (2)$$

где:  $\alpha = \arctg y'$ ;  $\alpha$  – угол между касательной к линии разрыва в произвольной точке и осью "x";  $y'$  – первая производная по "x" уравнения линии разрыва  $y(x)$ .

В соответствии с выражением (2) и уравнением состояния (1) имеем в этом блоке:

$$\xi_x = \xi_y = 0, \xi_{xy} = \frac{V_1 y}{dx} = \frac{dV_1}{dx} = \frac{V_0}{2} \cdot y'', \xi_3 = \frac{V_0}{2\sqrt{3}} y'', \varepsilon_3 = \xi_3 \cdot \frac{\Delta}{y_0} = \frac{\Delta_1}{2\sqrt{3}} y'', \quad (3)$$

$$\sigma_3 = A \cdot \Delta^m \cdot V_0^m \cdot \left( \frac{1}{2\sqrt{3}} y'' \right)^{m+n} \quad (4)$$

здесь:  $\xi_x, \xi_y, \xi_{xy}$  – компоненты скоростей деформаций;  $\Delta$  – двухсторонний ход штампа;  $y''$  – вторая производная уравнения линии разрыва.

Используя соотношения (3) и (4), представим мощность в блоке деформаций одной четверти выражением:

$$N_d = L \cdot \int_S \sigma_3 \cdot \xi_3 \cdot ds = \frac{A \cdot L \cdot \Delta^m \cdot V_0^{1+n}}{(2\sqrt{3})^{1+m+n}} \cdot \int_0^{h/2} \left( \frac{a}{2} - y \right) \cdot (y'')^{1+m+n} dx, \quad (5)$$

где:  $L$  – длина бруса,

$S$  – площадь четверти поперечного сечения блока деформаций (рисунок 1а).

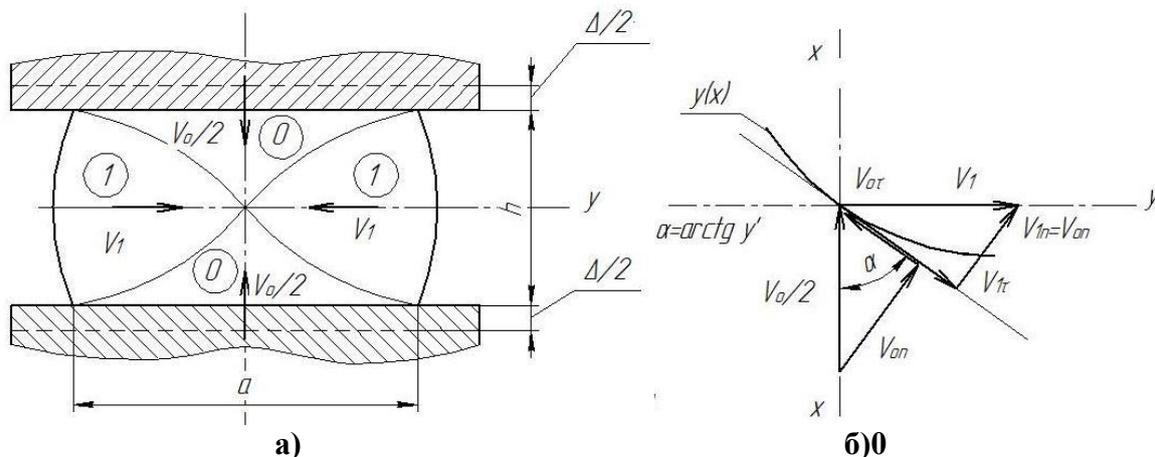


Рисунок 1. Схема осадки, поле (а) и план скоростей (б) на линии разрыва

На линии разрыва касательная и нормальная скорости:

$$V_\tau = V_{0\tau} + V_{1\tau} = \frac{V_0}{2} \cdot \cos \alpha + V_1 \cdot \sin \alpha = \frac{V_0}{2} \cdot \sqrt{1 + (y')^2}, \quad (6)$$

$$V_n = \frac{V_0}{2} \cdot \sin \alpha = \frac{V_0 \cdot y'}{2\sqrt{1+(y')^2}}. \quad (7)$$

Учитывая выражения (6), (7) и уравнение (1), запишем, что на линии разрыва:

$$\varepsilon_3 = \frac{V_\tau}{\sqrt{3} \cdot V_n} = \frac{1+(y')^2}{\sqrt{3} \cdot y'}, \quad \xi_3 = \frac{V_0}{\Delta} \cdot \varepsilon_3, \quad (8)$$

$$\tau_p = \frac{A}{(\sqrt{3})^{1+m+n}} \left(\frac{V_0}{\Delta}\right)^n \cdot \left(\frac{1+(y')^2}{y'}\right)^{m+n}. \quad (9)$$

Мощность на поверхности одной четверти разрыва скорости выразим, используя соотношения (6) и (7) для скоростей, как:

$$N_p = L \int_{l_p} \tau_p V_1 dl_p = \frac{A \cdot L \cdot \Delta^{-n}}{2(\sqrt{3})^{1+m+n}} \cdot V_0^{1+n} \cdot \int_0^{h/2} \left(\frac{1}{y'}\right)^{m+n} \cdot (1+(y')^2)^{1+m+n} \cdot dx. \quad (10)$$

В соответствии с энергетическим методом расчета давление осадки с учетом соотношений (5) и (10) представим зависимостью:

$$q \leq \frac{4 \cdot a}{L \cdot V_0} \cdot (N_d + N_p) = \frac{A V_0^n}{a \cdot \Delta^n \cdot (\sqrt{3})^{1+m+n}} \cdot \int_0^{h/2} F(y, y', y'') dx, \quad (11)$$

где:  $F = 4 \cdot \Delta^{m+n} \cdot \left(\frac{a}{2} - y\right) \cdot \left(\frac{y''}{2}\right)^{1+m+n} + \left(\frac{1}{y'}\right)^{m+n} \cdot (1+(y')^2)^{1+m+n}$ .

Для расчета давления необходимо определить минимизирующую функцию  $y(x)$ , линии разрыва, входящую в интеграл (11). Данная задача является вариантной и сводится к решению уравнения:

$$\frac{dF}{dy} - \frac{d}{dx} \cdot \frac{dF}{dy'} + \frac{d^2}{dx^2} \cdot \frac{dF}{dy''} = 0. \quad (12)$$

При выполнении предписанных уравнением (12) действий приходим к нелинейному дифференциальному уравнению [3]:

$$f(y, y', y'', y''', y^{IV}) = 0, \quad (13)$$

с граничными условиями:

$$y(0) = 0, \quad y'(0) = \pi/4, \quad y(h/2) = a/2, \quad y'(h/2) = 0.$$

Решение уравнения (13) производится методом коллокации [4]. При выборе подходящей для уравнения (13) функции, определяющей линию разрыва скорости, рассчитываются кинематика и давление осадки. С другой стороны, давление осадки можно получить методом осредненных напряжений [5,6], решением системы уравнений равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\tau_{xy}}{dx} &= 0, \\ \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} &= 0, \end{aligned}$$

и условия текучести для плоской деформации:

$$-\sigma_x + \sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_3.$$

Принимается, что напряжение  $\sigma_y$  зависит только от координаты "y"; касательное напряжение – только от координаты "x"; напряжение трения  $\tau_{тр.} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_3$ . Принимается также, что

$$\varepsilon_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta}{h}\right), \quad \xi_3 = \frac{\varepsilon_3}{t_k}, \quad \sigma_3 = \frac{A}{t_k^n} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta}{h}\right)\right]^{m+n}. \quad (14)$$

Исходная система при этом сводится к первому из уравнений равновесия, которая дает решение:

$$q_{cp.} = \frac{2\sigma_3}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \frac{a}{4h}\right). \quad (15)$$

Сделаем оценку конечной повреждаемости заготовки при осадке по уравнениям энергетической и деформационной теории прочности [1, 2]. Используя эти уравнения и выражения (14) получим соответственно:

$$\omega = \frac{1}{A_{np.}} \cdot \int_t \sigma_3 \cdot \xi_3 \cdot dt = \frac{A}{A_{np.} \cdot t_k^n} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot l_n \cdot \left(1 + \frac{\Delta}{h}\right)\right]^{1+m+n}, \quad (16)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_{3 \text{ пр.}}} = \frac{2}{\varepsilon_{3 \text{ пр.}} \sqrt{3}} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta}{h} \right), \quad (17)$$

здесь:  $0 \leq \omega \leq 1$  – повреждаемость материала заготовки;

$t_k$  – конечное время (длительность) осадки;

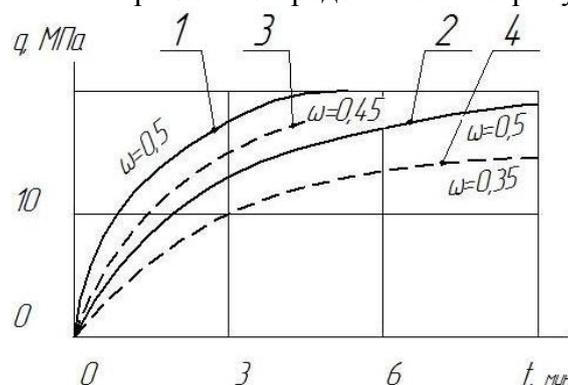
$A_{\text{пр.}}$ ,  $\varepsilon_{3 \text{ пр.}}$  – предельная удельная работа разрушения и предельная эквивалентная деформация.

Критические режимы осадки определяются из зависимостей (16), (17) при  $\omega=1$  т.е. по энергетической теории:

$$\left( \frac{\Delta}{h} \right)_{\text{кр.}} = -1 + \exp \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left( \frac{A_{\text{пр.}}}{A} \cdot t_k^n \right)^{\frac{1}{1+m+n}} \right], \quad (18)$$

$$\left( \frac{\Delta}{h} \right)_{\text{кр.}} = -1 + \exp \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \varepsilon_{3 \text{ пр.}} \right]. \quad (19)$$

Расчетные графики зависимости давления осадки бруса от времени конечного для сплавов АМг6 при 415 °С и ВТ14 при 900 °С представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2. Графики давления при осадке:**  
сплав АМг6: 1 – 5 мин., 2 – 10 мин.; сплава ВТ14: 3 – 5 мин., 4 – 10 мин.

Константы сплавов приведены в работах [1, 2]. Приняты размеры бруса:  $a=100$  мм,  $h=70$  мм,  $\Delta=30$  мм. Из расчетных результатов следует, что давление осадки зависит при заданной деформации от времени (скорости). Снижение скорости приводит к уменьшению давления. Повреждаемость сплава ВТ14 составила  $\omega=0,45$  и  $\omega=0,35$  за время осадки, соответственно, 5 мин и 10 мин. Повреждаемость сплава АМг6 составила  $\omega=0,5$  независимо от времени. Критическая (конечная) деформация, связанная с развитием повреждаемости материала при данных температурах, для алюминиевого сплава от времени не зависит, а для титанового сплава определяется временем. Увеличение длительности операции для данного титанового сплава при данной температуре способствует уменьшению повреждаемости и, следовательно, увеличению критической степени осадки. Технологические данные по горячей осадке заготовок приведены в работе [2].

### Выводы

1. Давление при изотермической осадке уменьшается при увеличении длительности операции.
2. Повреждаемость материала заготовок растет в процессе деформирования. Для одних материалов она зависит от степени и скорости осадки, для других – только от степени осадки.
3. Степень осадки может быть увеличена при снижении скорости операции для материалов, деформирование которых зависит от времени.

### Литература

1. Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. М., Машиностроение. 1993. 240 с.

2. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / Яковлев С.П. и др. М., Машиностроение. 2003. 440 с.
3. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М., Металлургия, 1980. 456 с.
4. Смирнов В.И. Курс высшей математики. М. Наука. т. 4. 1974. 336 с.
5. Численные методы анализа / Демидович Б.П. и др. М.Наука. 1967. 368 с.
6. Методы анализа процессов пластического формоизменения / Яковлев С.П. и др. ТулГУ. Тула. 2002. 146 с.

### **Модульный принцип в инструментальном производстве**

д.т.н. проф. Таратынов О.В., к.т.н. доц. Болотина Е.М., д.т.н. проф. Клепиков В.В.

МГИУ

(495)2763328

*Аннотация.* В данной статье представлен модульный принцип в инструментальном производстве, который позволит распределить весь спектр металлорежущего инструмента, применяемого в настоящее время в машиностроении, в восемь основных модулей. Ограниченная номенклатура модулей должна обеспечивать множество различных инструментальных компоновок путем многообразия сочетаний и положений модулей.

*Ключевые слова:* модульный принцип, металлорежущий инструмент, инструментальный модуль.

Модульный принцип давно и широко применяется в разных отраслях промышленности (производство станков, технологии и др.), однако до сих пор не разработаны его научные основы. Практически отсутствует строгий методологический аппарат, в литературе можно встретить самые разнообразные, нередко противоречащие друг другу понятия модуля, модульного принципа и др., отсутствует классификация модулей и т.д. Все это затрудняет внедрение модульного принципа в инструментальное производство и требует проведения научных исследований в этой области.

Под модульным принципом будем понимать построение различных технических систем с разнообразными характеристиками путем компоновки их из типовых модулей ограниченной номенклатуры.

Металлорежущие инструменты представляют собой широкий спектр инструментальных модулей, являющихся конструктивно и функционально законченной единицей.

Разработка инструментальных модулей даст возможность проектировать металлорежущие инструменты со значительным сокращением времени и трудоемкости, увеличит надежность работы металлорежущего инструмента за счет отработанности составляющих элементов модуля, а также уменьшит разнообразие конструкций режущего инструмента, что приведет к улучшению условий эксплуатации и ремонтпригодности металлорежущего инструмента.

Инструментальный модуль должен быть составляющим звеном технологического модуля, как показано на рисунке 1, только в таком случае будет достигнут наивысший эффект от применения модульного принципа в машиностроительном производстве. При этом подразумевается, что модульный принцип будет пронизывать все составляющие звенья производственной цепочки, начиная с изделия и заканчивая организацией производственного процесса.

Эффективность производства во многом зависит от уровня производственной цепочки: изделие – технологический процесс – технологическая система – организационная форма производственного процесса. При этом на эффективность производства влияет не только уровень развития каждого звена, но и в не меньшей степени равномерность их развития. Как