

УДК 621.7.016.2: 669. 715

Скрябин С. А., Гунько И. В., Бубновская И. А.

Винницкий Государственный аграрный университет. Украина, г. Винница

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОЙ
ЗАГОТОВКИ ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И РАБОТЫ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛ ТРЕНИЯ**

Анотація

В статті відмічено, що для здійснення процесу обробки металів тиском необхідно затратити визначену кількість енергії, частина якої перетворюється в тепло, а частина залишається в деформуючому металі у стані потенційної енергії.

Наводяться формули для визначення загальної кількості енергії, витраченої на про-

цес деформування; коефіцієнта виходу тепла; підвищення температури металу внаслідок енергії пластичної деформації; значень параметрів осередку деформації і розрахунку температурного поля, з урахуванням розвитку деформації в часі; теплового потоку через поверхню заготовки, викликаного роботою проти зовнішніх сил тертя.

Наведені таблиці з наданими значеннями параметрів і температури приросту в осередку

деформації, за рахунок енергії пластичної деформації і роботи сил тертя, з урахуванням розвитку деформації в часі.

Описані складові приходних і витратних статей теплового балансу.

Annotation

It is pointed out in the given article, that certain amount of energy should be consumed for processing metals by pressure, meanwhile part of the energy is converted into heat, and another part is kept in the deformed metal as potential energy.

The formulas are given for determining general amount of energy consumed for the process of deformation, heat output coefficient, metal temperature increase resulted from energy of plastic flow, values of parameters of the deformation zone and calculation of the temperature field subject to the deformation development in time, thermal stream through surface of the billets caused by the operation against external friction forces.

The given values of parameters and increment temperature in the zone of deformation at the expense of plastic flow energy and operation of friction forces subject to the development of deformation in time are demonstrated in the tables.

The components of income and expense sheet account of the thermal balance are described.

Актуальность разработки и внедрения малоотходных технологических процессов штамповки поковок из алюминиевых сплавов на предприятиях машиностроения, особенно в авиационной промышленности, обусловлена значительным применением в изделиях различных отраслей этих сплавов, повышенным расходом металла (КИМ 0,15–0,3), высокой трудоемкостью, длительным циклом изготовления качественных штампованных поковок (как правило, 2–3 штамповки с промежуточными операциями нагрева, обрезки облоя, травления, зачистки) и задачами по совершенствованию металлосберегающих технологий [1].

Детали из алюминиевых сплавов, применяемые в изделиях авиационной промышленности, отличаются конструктивной сложностью (наличие тонких высоких ребер, малых радиусов сопряжения, тонких полотен, открытых и закрытых сечений с глубокими ребрами и т.д.) и большим коэффициентом вытяжки. Среди этой номенклатуры значительный объем занимают детали удлиненной формы с большим перепадом площадей поперечных сечений вдоль оси. Процесс вальцовки заготовок под последующую штамповку необходим, как подготовительная операция объемной штамповки, служащая для перераспределения

металла исходной заготовки, с целью: устранения чрезмерной неравномерности деформации и распределения температурных полей в очаге деформации, которая приводит к появлению на сложно оребренных штампованных поковках дефектов в виде складок, прострелов, зажимов, трещин, обрыва волокна и др. нарушений сплошности; одновременного заполнения металлом полости штампа, которое вызывает излишние высокие усилия доштамповки; изготовления качественных штампованных поковок с высоким коэффициентом использования заготовки (КИЗ), низкой трудоемкостью и, в целом, снижению их себестоимости; изготовления некоторых видов профилей симметричного и ассиметричного сечений, а также заготовок с криволинейной осью. Кроме этого, вальцовка заготовок обеспечивает хорошую всестороннюю проработку структуры, и, как следствие, уменьшает разброс свойств в объеме заготовки.

Работа выполнялась в соответствии с „Державною комплексною програмою розвитку авіаційної промисловості України до 2010 року”, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 12.12. 2001 р., № 1665-25, п. 6.1.3. — „Нові технології та матеріали, стандартизація, системи якості, нормативне забезпечення виробництва та ремонту авіаційної техніки”.

Для осуществления процесса обработки металлов давлением необходимо затратить определенное количество энергии. Часть этой энергии превращается в тепло, а часть остается в деформируемом металле в виде потенциальной энергии. Согласно работе [2], коэффициент выхода тепла определяется по формуле

$$\eta_{\text{вых}} = \frac{A_T}{A}, \tag{1}$$

где A_T — количество энергии, затрачиваемой на процесс пластической деформации;

A — общее количество энергии, затрачиваемое на процесс формоизменения.

Значения коэффициента выхода тепла $\eta_{\text{вых}}$ для различных металлов, по данным работ [2–4], представлены в табл. 1.

Таблица 1
Значения коэффициента выхода тепла

Дюралюминий при 20°С	0,77
Технический алюминий	0,93
Медь	0,92
Цветные металлы	0,85–0,90
Сплавы из цветных металлов	0,75–0,85

Для заготовок из стали, коэффициент выхода тепла по данным различных авторов составляет 0,84–0,94, а в отдельных случаях может быть равным единице.

Общее количество энергии, затрачиваемой на процесс деформирования, определяется по формулам представленным в работах [5, 6]

$$A = p \nu \ell n \frac{h_0}{h_1}, \quad (2)$$

где p — сопротивление металла деформированию, кг/мм²;

ν — объём деформированного металла, мм³;

h_0, h_1 — высота заготовки, соответственно, до и после пропуска, мм.

А. И. Целиков в работе [7] подчеркивает, что при горячей прокатке сопротивление линейной деформации зависит главным образом от температуры и скорости деформации. Влияние этих факторов может быть учтено введением соответствующих коэффициентов, приведенных в формуле

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \eta_\sigma \eta_T \eta_\nu \sigma_T, \quad (3)$$

где η_σ — коэффициент напряженного состояния;

$\eta_T \eta_\nu$ — коэффициенты, учитывающие влияние на сопротивление деформации температуры и скорости деформации;

σ_T — предел текучести данного материала, кг/мм².

Следует отметить, что общая энергия деформации A_T определенная по формуле (4), дает представление о суммарном тепловом эффекте пластической деформации и определяется по формуле

$$A_T = \eta_{\text{вых}} p \nu \ell n \frac{h_0}{h_1}. \quad (4)$$

Однако, по этой формуле можно рассчитать только повышение средней температуры заготовки. В то же время известно, что в большинстве случаев вальцовки, пластические деформации по сечению заготовки распределены неравномерно. Следовательно, общая энергия деформации A_T также распределена по сечению неравномерно. Неравномерным будет и распределение тепловыделения от энергии пластического формоизменения.

Нагрев деформируемого тела, за счет энергии пластического формоизменения, можно представить как результат действия объёмно-распределенного теплового источника. Обычно считают, что этот источник имеет постоянную мощность по сечению деформируемого тела. Такое допущение возможно только в том случае, если толщина деформируемого тела незначительна. В общем случае источник тепла является функцией координат. Функция распределения мощности теплового источника по сечению деформируемого тела может быть определена по формуле (5), представленной в работе [6].

$$W_{(x,y,z)} = \tau_T \iiint_\nu J_{(x,y,z)} d\nu, \quad (5)$$

где W — мощность тепловых источников, Вт/мм³;

τ_T — предел текучести сдвига материала, кг/мм²;

J — интенсивность скоростей сдвиговых деформаций, с⁻¹;

x, y, z — координаты, мм;

ν — объём, мм³.

В некоторых случаях оказывается возможным, используя какой-нибудь косвенный метод, установить качественный закон распределения интенсивности скоростей сдвиговых деформаций по сечению деформируемого металла. Так, в работе [6], средняя по высоте деформируемого тела, мощность тепловых источников определяется по формуле

$$W_p = \frac{\sigma_p \xi}{t_2}, \quad (6)$$

где $\sigma_p = k_f \left(1 + c \mu \frac{\ell_d}{h} \sqrt{v_b} \right)$ — среднее удельное

давление на валки [6];

$k_f = 0,015(1400 - T)$ — сопротивление деформации, кг/мм²;

$\mu = 0,9400 - 0,0005T$ — коэффициент трения;

C — постоянная;

T — средняя по объёму деформируемого тела температура, °С;

ℓ_d — длина дуги формата, мм;

h — средняя за пропуск высота заготовки, мм;

v_b — окружная скорость валков, м/с;

ξ — деформация за пропуск, мм;

t_2 — время деформирования, с.

В частности, рассматривая деформированные координаты сетки посередине ширины алюминиевых образцов [6], можно заключить, что деформации по высоте заготовки распределяются по закону, близкому к параболическому. Следовательно, мощность теплового источника будет определяться по формуле

$$W_{(x)} = \frac{3\sigma\xi}{t_2} \left(\frac{x}{R} \right)^2. \quad (7)$$

Полученные таким образом значения функции $W_{(x)}$ следует считать ориентировочными. Точное определение этой функции можно получить, если известно правильное определение значения $J_{(x)}$.

Нагрев металла, вызванный работой поверхностных сил трения между валком и металлом, можно представить, как результат прохождения через поверхность заготовки теплового потока $g_{Tр}$. Обычно считают, что этот тепловой поток равномерно распределен по контактной поверхности

заготовки, хотя в действительности такое положение не всегда имеет место на практике. Кроме того, считают, что все тепло от трения идет на повышение температуры прокатываемого металла.

Независимо от вида обработки давлением, между поверхностью металла и рабочим инструментом (валком) при деформации всегда имеет место контактный теплообмен в системе трёх тел: деформируемый металл, прослойка, валок.

Данная задача является сложной, требующей для своей реализации знания теплофизических свойств, кроме деформируемого металла, инструмента, прослойки, её высоты, но и других факторов. Однако, ввиду небольшого промежутка времени контакта ($t \approx 10^{-2}$ с) и невысоких потерь, конвективный теплообмен можно не учитывать, а при определении температурного поля на поверхности заготовки, будем учитывать только температуру нагрева до деформации, температуру заготовки за счет энергии пластического формования и нагрев металла, вызванный работой поверхностных сил трения. В общем случае это будет выражаться зависимостью:

$$T = T_n + T_s + T_f, \quad (8)$$

где T_n – температура нагрева заготовки до деформации, °С;

T_s – температура заготовки вызванная энергией пластического деформирования °С;

T_f – температура заготовки вызванная работой поверхностных сил трения, °С.

В частности, для овального калибра, повышение температуры металла в результате энергии пластической деформации определяется по формуле (9) для слоя d_z (рис. 1).

$$\Delta T = 0,233 \cdot \eta_{\text{вых}} \frac{\pi}{4} h_{\text{об}}^{(i)} \cdot b_{\text{об}}^{(i)} \cdot \sigma_{\text{ф}}^{(i)} \ln \frac{h_{\text{об}}^{(i)}}{h_{\text{об}}^{(i+1)}} \cdot R_p \times \\ \times [\sin \alpha - \sin(\alpha - \alpha_i)], \quad (9)$$

где $\eta_{\text{вых}}$ – коэффициент выхода тепла (для технического алюминия $\eta_{\text{вых}} = 0,98$);

$h_{\text{об}}^{(i)}$ – текущая высота деформируемой заготовки, мм;

$b_{\text{об}}^{(i)}$ – текущая ширина деформируемой заготовки, мм;

$\sigma_{\text{ф}}$ – фактическое сопротивление пластической деформации, кг/мм²;

R_p – рабочий радиус валка, мм;

α_i – текущий угол контакта, рад.

В качестве примера расчета и распределения температурного поля в очаге деформации, с учетом развития деформации во времени, рассмотрим вальцовку заготовок с размерами $\varnothing 25 \times 150$ мм из алюминиевого сплава АК6 в овальном калибре, имеющего размеры: высота 13 мм, ширина 29 мм, радиус калибра 20,5 мм, рабочий радиус валков 66,5 мм, зазор между валками 1,0 мм. Температура вальцовки 450°С. Частота вращения валков 37 мин⁽⁻¹⁾.

В табл. 2 приведены формулы для определения значений параметров очага деформации и расчета температурного поля, с учетом развития деформации во времени.

В табл. 3 приводятся текущие значения параметров и температур приращения в очаге деформации, за счет энергии пластической деформации, с учетом развития деформации во времени.

Согласно работам [8–11], тепловой поток через поверхность заготовки, вызванный работой против внешних сил трения, определяется по формуле:

$$q_{\text{тр}} = V_f \cdot \mu_f \cdot p, \quad (10)$$

где V_f – относительная средняя скорость поступательного движения поверхности заготовки, м/с;

μ_f – коэффициент трения;

p – сопротивление деформации, кг/мм².

Для получения эмпирической формулы по определению нагрева металла, вызванного работой поверхностных сил трения, примем следующие допущения:

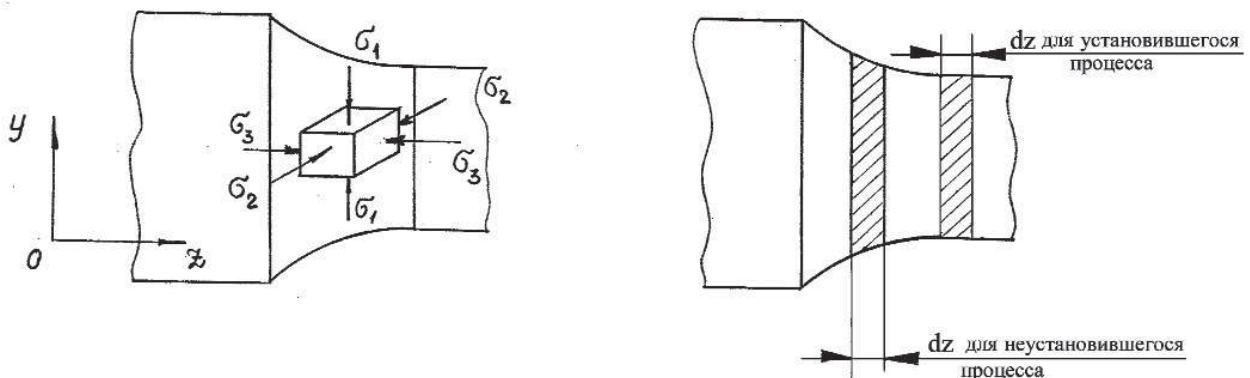


Рис. 1. Схема напряженного состояния в переходной зоне вальцуемой заготовки

Формулы для определения значений параметров очага деформации и расчета температурного поля

Параметр	Обозначение	Расчетная формула
Угол контакта, рад	α	$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{2R_3 - \Delta h}{2R_p} \right)$
Время деформации, с	t	$t = 10^{-3} \frac{R_p \alpha}{V_b}$
Радиус калибра, мм	R_k	$R_k = \frac{\Delta \eta^2 + \beta_k^2}{4\rho \eta}$
Ширина овального калибра, мм	$b_{об}$	$b_{об} = b_k + \frac{2\delta(2R_k - \Delta h)}{b_k}$
Высота овального калибра, мм	$h_{об}$	$h_{об} = 2\Delta h + \delta$
Временный промежуток деформирования, с	t_i	$t_i = \frac{t \cdot \alpha_i}{\alpha}$
Угол контакта в поперечном сечении очага деформации, рад	φ_i	$\varphi_i = \frac{V_b \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\Delta h}{2R_k} \right)}{R_p \cdot \alpha}$
Ширина овала, мм	$b_{об}^{(i)}$	$b_{об}^{(i)} = \frac{b_{об} + 2R_k}{\alpha R_k} V_b \cdot t_i + 2R_3$
Высота овала, мм	$h_{об}^{(i)}$	$h_{об}^{(i)} = 2 \{ R_3 - R_p [\cos(\alpha - \alpha_i) - \cos \alpha] \} + \delta$
Площадь контакта, мм ²	$F_k^{(i)}$	$F_k^{(i)} = R_k \frac{V_b \cdot t_i}{R_p} \left[(R_p + R_k) \frac{\varphi \cdot V_b \cdot t_i}{2R_p \cdot \alpha} - R_k \sin \left(\frac{\varphi \cdot V_b \cdot t_i}{2R_p \cdot \alpha} \right) \right]$
Сопротивление деформации, $\sigma_\phi^{(i)}$	$\sigma_\phi^{(i)}$	Задается
Коэффициент выхода тепла	$\eta_{вых}$	Задается, $\eta_{вых} = 0,93$
Температура в очаге деформации за счет энергии пластической деформации, °С	ΔT_ϕ	$\Delta T_\phi = 2,3^{-3} \eta_{вых} \frac{\pi}{4} h_{об}^{(i)} b_{об}^{(i)} \sigma_\phi^{(i)} \ln \frac{h_{об}^{(i)}}{h_{об}^{(ii)}} \times$ $\times R_p [\sin \alpha - \sin(\alpha - \alpha_i)]$

Примечание:

Значения величин $b_{об}^{(i)}$, $h_{об}^{(i)}$, $F_k^{(i)}$, φ_i , ΔT_ϕ определяются в заданный промежуток времени.

Таблица 3

Значения параметров и температуры приращения в очаге деформации, за счет энергии пластической деформации, с учетом развития деформации во времени

t_i ,	0,029	0,058	0,087	0,116	0,145
α_i , рад	0,08721	0,174	0,261	0,3480	0,4350
φ_i , рад	0,1312	0,2624	0,3936	0,5248	0,6561
$b_{об}^i$, мм	26,2	27,3	28,5	29,7	31,0
$h_{об}^{(i)}$, мм	21,9	18,38	15,8	14,1	13,5
$F_k^{(i)}$, мм ²	16,7	66,9	157,9	268,9	431,5
$\sigma_\phi^{(i)}$, кг/мм ²	80,3	39,6	25,36	19,8	15,4
T_ϕ , °C	56,12°C	32,88°C	16,1°C	8,62°C	2,46°C

1. В порядке первого приближения принимаем, что силы нормального давления и трения приложены посередине текущего угла контакта.

2. Коэффициент трения определяется по формуле

$$\mu_f = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_i}{2}\right).$$

3. Вся энергия при работе против сил трения в очаге деформации переходит в тепловую.

Принимая во внимание изложенные допущения, нагрев металла, вызванный работой поверхностных сил трения, в частности для овального калибра, будет выражаться формулой

$$T_f = 2,3 \times 10^{-3} \alpha_i \sin \frac{\alpha_i}{2} \times R_p \times F_k^{(i)} \sigma_\phi^{(i)}, \quad (11)$$

где R_p – рабочий радиус валков, мм;

α_i – угол контакта, рад;

$F_k^{(i)}$ – площадь контакта, мм²;

$\sigma_\phi^{(i)}$ – фактическое сопротивление пластической деформации, кг/мм².

Таблица 4

Текущие значения исходных параметров и температур приращения в очаге деформации, за счет работы сил трения, с учетом развития деформации во времени

t_i , с	0,029	0,058	0,087	0,116	0,145
α_i , рад	0,08721	0,1740	0,2610	0,3480	0,4350
$\sigma_\phi^{(i)}$, кг/мм ²	80,3	39,6	25,36	19,8	15,4
$F_k^{(i)}$, мм ²	16,7	66,9	157,9	268,9	431,5
T_f , град	0,7802	6,1443	20,865	49,2101	25,6922

В табл. 4 представлены текущие значения исходных параметров и температур приращения в очаге деформации, за счет работы поверхностных сил трения, с учетом развития деформации во времени.

Тепловой баланс в очаге деформации состоит из приходных и расходных статей.

К приходным статьям теплового баланса относятся:

- нагрев заготовок в печи, Q_1 ;
- нагрев заготовки в очаге деформации в результате пластического деформирования, Q_2 ;
- нагрев заготовки в очаге деформации за счет работы против сил трения, Q_3 .

Расходные статьи теплового баланса состоят из потерь тепла:

- в результате переноса заготовки от печи к вальцовочным штампам, за счет теплообмена между поверхностью заготовки и окружающей среды (лучистый – Q_4 ; конвективный – Q_5 ; контактный – Q_6 – составляющие теплообмена);
- время деформирования, Q_7 .

В итоге тепловой баланс в очаге деформации будет иметь вид

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7. \quad (12)$$

Выводы

1. Установлено, что часть энергии, необходимой для осуществления процесса обработки металлов давлением, превращается в тепло, а часть остается в деформированном металле в виде потенциальной энергии.

2. Приводятся формулы для определения: общего количества энергии, затрачиваемой на процесс деформирования; повышения температуры

металла в результате энергии пластической деформации; значений параметров очага деформации и расчета температурного поля, с учетом развития деформации во времени; теплового потока через поверхность заготовки, вызванной работой против внешних сил трения.

3. Приводятся таблицы с данными значениями пара-

метров и температуры приращения в очаге деформации, за счет энергии пластической деформации и работы сил трения, с учетом развития деформации во времени.

4. Описаны составляющие приходных и расходных статей теплового баланса.

Литература

1. *Скрябин С.А., Полохов В.Н., Скрябин К.С.* Применение процесса вальцовки и подготовительных ручьев при изготовлении горячим деформированием штампованных поковок из алюминиевых сплавов с вытянутой осью и закрытыми сечениями / Скрябин С.А. // К.: Технологические системы. — 2003. — № 4. — С. 32–37.

2. *Юдаев Б.Н.* Теплопередача / Юдаев Б.Н. // М.: Высшая школа, 1981. — 319 с.

3. *Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Шукин Г.А.* Термодинамика и теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. // Болгарский А.В. // М.: Высшая школа, 1975. — 495 с.

4. *Столович Н.Н., Маницкая Н.С.* Температурные зависимости теплофизических свойств неко-

торых металлов / Столович Н.Н. // Минск: Наука и техника, 1975. — 160 с.

5. *Вукалович М.П., Новиков И.И.* Термодинамика / Вукалович М.П. // М.: Машиностроение, 1972. — 700 с.

6. *Зарубин В.С.* Инженерные методы решения задач теплопроводности / Зарубин В.С. // М.: Наука, 1983. — 328 с.

7. *Целиков А.И.* Теория прокатки / Целиков А.И., Гришков А.И. // М.: Metallургия, 1980. — 329 с.

8. *Никитенко Н.И.* Теория тепломассопереноса / Никитенко Н.И. // Киев: Наукова думка, 1983. — 352 с.

9. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия / Джонсон К. // М.: Наука, 1980. — 400 с.

10. *Балакин В.А.* Трение и износ при высоких скоростях скольжения / Балакин В.А. // М.: Машиностроение, 1980. — 136 с.

11. *Бери, Варбер.* Распределение тепла, выделяемого при трении / Бери // Путь к изучению природы контактных явлений при скольжении. Проблемы трения, т. 106, № 3, 1984. — С. 83–96.