

УДК 621.7.016.2: 669. 715

Скрябин С. А.
Крищук Н. Г.
Гуныко И. В.
Бубновская И. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕРМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ КРУГЛЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ОВАЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

Одним из актуальных направлений в развитии машиностроения является разработка и совершенствование технологических процессов изготовления заготовок, основной задачей которого является максимальное приближение их формы и размеров к форме и размерам готовых деталей, при обеспечении необходимых физико-механических свойств [1]. Кроме этого, внедрение малоотходных технологических процессов штамповки поковок из алюминиевых сплавов на предприятиях машиностроения, особенно в авиационной промышленности, обусловлено значительным применением в изделиях отрасли 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 [2, 3].

Цель исследования – оценка технологических факторов и параметров термосилового нагружения в процессах вальцовки круглых, нагретых до температуры 450 °С заготовок из алюминиевого сплава АК6, для определения коэффициентов неравномерности распределения термических деформаций в зоне деформирования.

В качестве объекта исследования выбран технологический процесс вальцовки заготовок ($\text{Ø}25 \times 150$ мм) из алюминиевого сплава АК6 в овальном калибре, имеющем размеры: высоту – 13 мм, ширину – 29 мм, радиус калибра – 20,5 мм, рабочий радиус валков $R_p = 66,5$ мм, зазор между валками 1,0 мм, частоту вращения валков 26 мин⁻¹ [1]. Заготовка нагревалась в электропечи сопротивления до температуры $T_3 = 450$ °С. Материал вальцовочного штампа – сталь 5ХНВ. Скорость перемещения заготовки в вальцах составляет $J = 0,257$ м/с, продолжительность вальцовки $t = 0,58$ с, длина дуги очага деформации (ОД) составляет $l_{\text{д}} = 23,4$ мм.

Расчетная схема сформирована на основе объемной (трехмерной) конечно-элементной модели вальцуемой заготовки в ОД. Объемная твердотельная дискретная трехмерная модель ОД (рис. 1), содержащая 97182 тетраэдральных конечных элементов соединенных 18326 узлами, построена с помощью программного комплекса Autodesk Inventor и экспортирована в ANSYS.

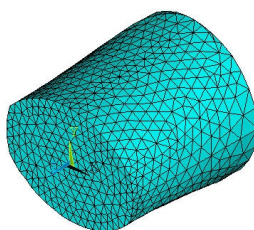


Рис. 1. Дискретная модель очага деформации заготовки в процессе вальцовки

Для разработанной имитационной модели ОД при вальцовке введены следующие гипотезы и упрощения.

При переносе нагретой заготовки из печи и ее подачи в вальцовочные штампы изменение температурного состояния не учитывали из-за незначительного (менее 2 с) времени ее

охлаждения в окружающем пространстве. Для определения величин коэффициентов неравномерности термических деформаций вдоль и поперек зоны деформации используется гипотеза об упругой не сжимаемости материала.

Разработанные математические модели термомеханического состояния сформированной зоны вальцуемой заготовки (рис. 2) в очаге деформации для заданного периода времени технологического процесса содержат аналитические соотношения для описания теплофизических и механических граничных условий, уравнения в частных производных для численного определения нестационарных тепловых процессов и термических деформаций. Вычислительный эксперимент проведен с применением комплексов программ на основе проекционно-сеточных методов конечных элементов и конечных разностей [3].

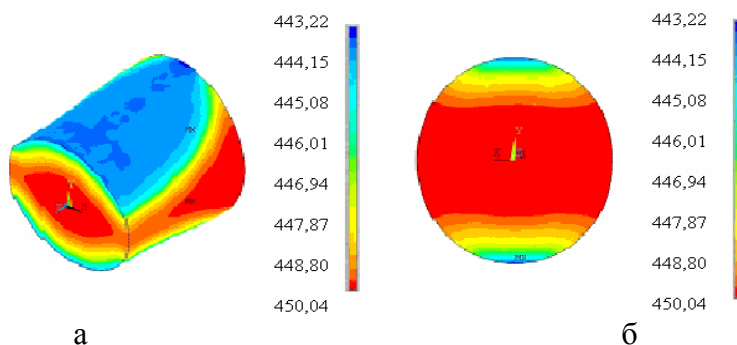


Рис. 2. Поле температур в зоне деформации вальцуемой заготовки (шестой) при стабилизации теплового режима, °С:

а – объемная модель; б – поперечное сечение на входе в вальцы

Согласно работе [1], шероховатость заготовки $h_{cp} = 6,3$ мкр, калибра вальцовочного штампа $h_{cp2} = 0,8$ мкм, усилие на ковочных вальцах – 800 кН, среднее удельное усилие при вальцовке – 245 МПа.

Удельные усилия и тепловые потоки на контактных поверхностях зоны ОД заготовки со штампами не постоянны. Их значения определяли для каждой из 10-и контактных площадей в расчетной схеме ОД. Предел прочности менее пластичного из двух контактирующих материалов – штампа (5ХНВ) и заготовки при температуре $T = 450$ °С, равен 1029 МПа. Температуру поверхности вальцовочных штампов на каждом шаге интегрирования уравнения теплового баланса принимали равной температуре заготовки для времени предшествующем данному этапу термического нагружения.

Исходные данные для расчета теплового состояния и термических деформаций при вальцовке заготовок, были получены согласно методике, описанной в работе [1], и приведены в табл. 1.

Полученные результаты расчетов теплового состояния и термических деформаций вальцуемых заготовок на протяжении времени, от начала процесса до окончания стабилизации теплового режима системы контактируемых тел «заготовка – вальцовочный штамп», представлены на рис. 2–4.

В результате вычислительного эксперимента установлено [4], что нагрев заготовки в течение времени $t = 0,58$ с при вальцовке под действием пластической деформации и сил трения, приводит к ее нагреву в неоднородном поле температур не более чем на 5 °С.

На рис. 3 представлены поля деформаций шестой вальцуемой заготовки в поперечном, продольном и вертикальном направлениях, которые позволяют оценить вклад температурной составляющей на уширение и опережение при вальцовке заготовок $\varnothing 25 \times 150$ мм из сплава АК6 в овальном калибре. Из его анализа видно, что максимальная температура находится на боковой поверхности зоны деформации во входном сечении, а минимальная – в этом же сечении в зоне контакта с вальцовочным штампом. Разность температур составляет около 7 °С, что свидетельствует о выравнивании температур.

Таблица 1

Исходные данные для расчета теплового состояния и деформаций при вальцовке заготовок из сплава АК6 с учетом оксидной пленки (температура заготовки 450 °С)

Номер вальцуемой заготовки	Нач. темп. вальцов. штампа в зоне контакта $T_{M2}, ^\circ\text{C}$	Ср. темп. среды в зоне контакта $T_c, ^\circ\text{C}$	Термическая проводимость среды $a_c \cdot 10^{-2}, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	Термическая проводимость металлич. конт. $a_m \cdot 10^{-2}, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	Общая проводимость контакта $a_{км} \cdot 10^{-2}, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
1	25	237,5	11,72	19,22	30,94
2	50	250	11,96	19,32	31,28
3	100	275	12,44	19,41	31,85
4	150	300	12,9	19,6	32,50
5	200	325	13,46	19,85	33,31
6	250	350	13,88	20,11	33,99
7	300	375	14,31	20,39	34,70
8	350	400	14,74	20,84	35,58
9	400	425	15,12	21,31	36,43
10	450	450	15,5	24,81	40,31

Подтверждением изложенного являются кривые изменения температуры в центре и на периферии зоны деформации (во входном сечении), изображенные на рис. 4. Здесь видна динамика изменения указанных температур и их разности при вальцевании ряда заготовок, начиная от температуры штампа, равной 25 °С. Анализ рис. 4 показывает, что выравнивание температур по сечению ОД в вертикальном направлении имеет место только для заготовок, расположенных в табл. 1, после шестой вальцуемой заготовки. Результаты расчетов теплового состояния ОД заготовки, на основе плоской модели ее продольного сечения, подтвердили адекватность параметров разработанной расчетной схемы.

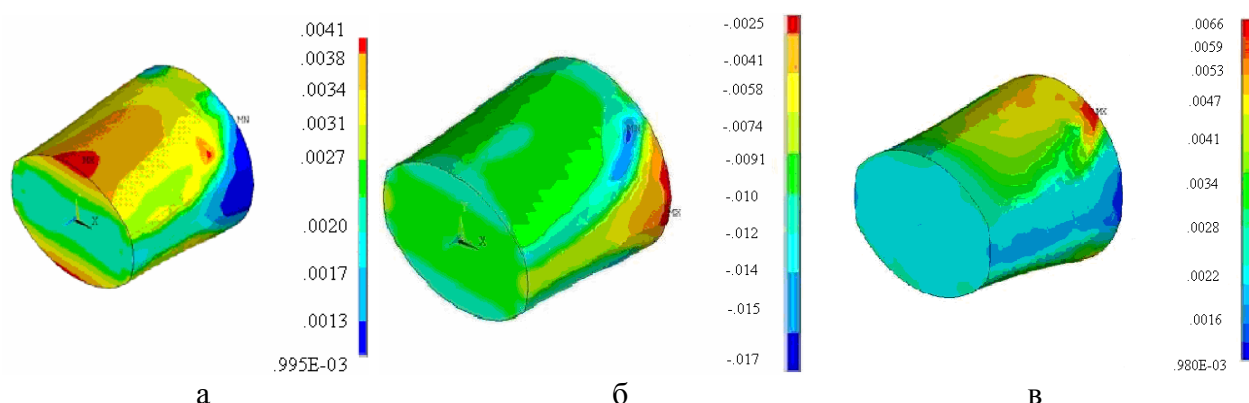


Рис. 3. Поля температурных деформаций шестой вальцуемой заготовки в различных направлениях, м:

а – поперечное; б – вертикальное; в – продольное

В нашем примере параметр, характеризующий отношение радиуса овального калибра $R_k^{ob} = 15,4$ мм к радиусу заготовки $R_3 = 12,5$ мм, равен $i = \frac{15,4}{12,5} = 1,232$. Относительная деформация (рис. 3) по ширине в разных сечениях ОД заготовки составляет $e_{x_1} = 0,0014895$ м; $e_{x_2} = 0,0014895$ м; $e_{x_3} = 0,001738$ м, а среднее значение равно $e_{x_{cp}} = 0,001572$ м. Аналогично по высоте $e_{y_1} = 0,007478$ м; $e_{y_2} = 0,012427$ м; $e_{y_3} = 0,01$ м; среднее значение $e_{y_{cp}} = 0,009968$ м. Величина температурной составляющей коэффициента $K_{yш}^{об}$ равна:

$$K_{yш}^{об} = \frac{e_{x_{cp}}}{e_{y_{cp}}} = \frac{0,001572}{0,009968} = 0,1577.$$

Значение коэффициента $K_{yш}^{06}$, учитывающего влияние на уширение неравномерности деформации по ширине и высоте заготовки в зависимости от кривизны овального калибра (i), определяли по формуле, приведенной в работе [1]:

$$K_{yш}^{06} = \sqrt{0,0582i^2 - 0,02123i^2 + 0,2015 + 0,2265i - 0,049}. \quad (1)$$

Подставляя значение коэффициента i для данной заготовки в формулу (1) получили $K_{yш}^{06} = 0,7375$. Разность значений коэффициентов составляет:

$$\Delta K_{yш}^{06} = K_{yш}^{06} - K_{yш}^{Too} = 0,7375 - 0,1577 = 0,5798.$$

Данными численного эксперимента установили, что относительная доля температурной деформации для коэффициента уширения заготовки при термопластической деформации составляет 21,4 %. Зависимости коэффициентов уширения $K_{yш}^{06}$ и его температурной составляющей $K_{yш}^{Too}$ представлены на рис. 5.

Коэффициент K_s^{06} , учитывающий влияние на опережение неравномерности деформации по ширине и длине вальцуемой заготовки в зависимости от кривизны овального калибра определяли по формуле приведенной в работе [1]:

$$K_s^{06} = \sqrt{270,569i^2 - 516,265i + 248,728 - 16,455i + 15,714}. \quad (2)$$

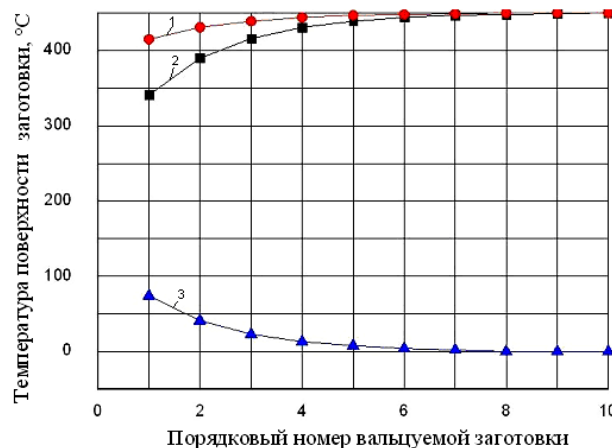


Рис. 4. Температуры по оси, в зоне контакта и разности указанных температур зоны деформации, в сечении при выходе из вальцовочного штампа для ряда заготовок из сплава АК6: 1 – температура по оси; 2 – температура в зоне контакта; 3 – разность температур

Подставляя значение i в формулу (2) получим $K_s^{06} = 0,2750$. Температурную составляющую коэффициента опережения K_s^{06} определим по расчетным данным поля деформаций, приведенным на рис. 6. Деформация по ширине равна $e_{x_{cp}} = 0,001572$ м, а в продольном направлении – $e_{z_{cp}} = 0,00171$ м. Температурная составляющая коэффициента неравномерности опережения при деформации равна:

$$K_s^{06} = 1 - \frac{e_{x_{cp}}}{e_{z_{cp}}} = 1 - \frac{0,00925}{0,0261} = 0,0807.$$

И тогда разность значений составляет: $\Delta K_s^{06} = K_s^{06} - K_s^{Too} = 0,2750 - 0,0807 = 0,1943$.

Таким образом, для коэффициента, учитывающего опережение при деформации вальцуемой заготовки, доля его температурной части составляет 29,3 %. Зависимости коэффициентов опережения K_S^{ov} и его температурной составляющей K_S^{Too} представлены на рис. 6.

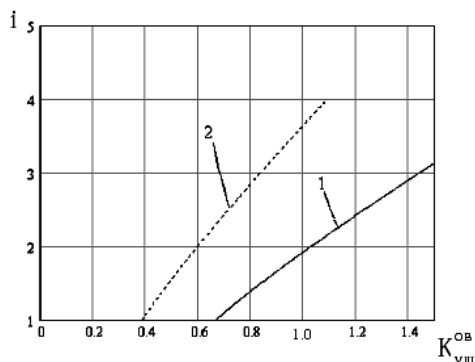


Рис. 5. Зависимости коэффициентов уширения и его температурной составляющей: 1 – $K_{уш}^{ov}$; 2 – $K_{уш}^{ov} - K_{уш}^{Too}$

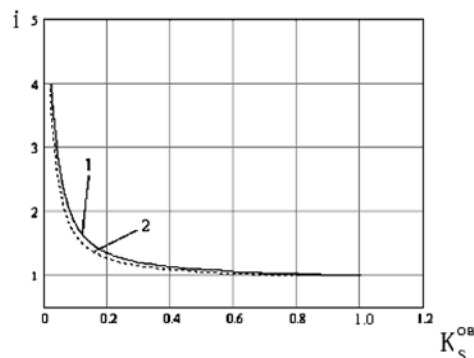


Рис. 6. Зависимости коэффициентов опережения и его температурной составляющей: 1 – K_S^{Too} ; 2 – $K_S^{ov} - K_S^{Too}$

ВЫВОДЫ

Проведено имитационное математическое моделирование тепловых процессов и термических деформаций для технологического процесса вальцовки заготовок из алюминиевого сплава АК6 с использованием полуэмпирических соотношений теории конвективного, лучистого и контактного теплообмена, уравнений тепломассопереноса и механики сплошной среды.

Проведены расчеты процессов деформирования нагретых заготовок из сплава АК6, размером $\varnothing 25 \times 150$ мм, на ковочных вальцах в овальном калибре.

На основе анализа результатов вычислительного эксперимента установлены закономерности распределения полей температур, градиентов температур, удельных тепловых потоков и температурных деформаций вальцуемой заготовки.

Установлены величины температурной составляющей коэффициентов уширения – 21,4 %, опережения – 29,3 % и неравномерности пластической деформации при вальцовке заготовок $\varnothing 25 \times 150$ мм из сплава АК6 на ковочных вальцах в овальном калибре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скрябин С. А. *Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах* / С. А. Скрябин. – Изд-во П. О. Власюк : Винница, 2007. – 282 с.
2. Скрябин С. А. *Изготовление поковок из алюминиевых сплавов горячим деформированием* / С. А. Скрябин. – Киев : КВЦ, 2004. – 346 с.
3. Цибенко О. С. *Системы автоматизованого проектування та інженерного аналізу в машинобудуванні : навчальний посібник* / О. С. Цибенко, М. Г. Крищук. – НТУУ «КПІ». – 100 с.
4. Скрябин С. А. *Определение температурного поля на поверхности деформируемой заготовки за счет энергии пластического формоизменения и работы поверхностных сил трения* / С. А. Скрябин, И. В. Гунько, И. А. Бубновская // *Технологические системы*. – Изд-во Винницкого аграрного университета. – 2010. – № 2. – С. 63–69.

Скрябин С. А. – д-р техн. наук, проф. ВНАУ;
Крищук Н. Г. – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»;
Гуенько И. В. – канд. техн. наук, доц. ВНАУ;
Бубновская И. А. – ассистент ВНАУ.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: bubnovska@mail.ru