

УДК 621.73

Скрябин С.А.

Гулько И.А.

Бубновская И.А.

*(Вінницький національний аграрний університет)*

## ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

*У статті описані вимоги до нагріву заготовок, які забезпечують мінімальну хімічну взаємодію атмосфери нагрівача на поверхню металу (окислення, насичення воднем та інші), завершення структурних перетворень, мінімальний ріст зерна, збереження цілісності металу (відсутність можливості з'явлення внутрішніх тріщин і інших дефектів). Відмічено, що ці вимоги виконуються при дотримванні режимів нагріву деформуючого сплаву, які визначаються температурою робочого простору нагрівача, часом витримки, швидкістю нагріву, а також проміжною витримкою при тій або іншій температурі та часом витримки при кінцевій температурі нагріву.*

*Недотримання вимог до нагріву заготовок призводить до порушення теплового режиму, внаслідок чого заготовки мають недостатню температуру для деформації або її перевищення, які призводять до небажаних явищ (недогрів, перегрів, перепік, термічні тріщини).*

*Описані основні фактори, які впливають на характер розподілу температури по перерізу деформуючого металу.*

*Requirements to heating of billets providing minimal chemical impact of a heater device's atmosphere on metal surface (oxidation, hydrogen saturation and others), completion of structural transformations, minimal grain growth and conservation of metal integrity (disability of structural transformation completion, occurrence of internal cracks, and other defects) are described in the article. These requirements are marked to be accomplished at the observance of the heating modes of the deformed alloy which are determined by the temperature of working surface of a heater device, exposure time, heating rate as well as by intermediate exposure time at one or another temperature and time of exposure at the final temperature of heating.*

*Failure to meet the requirements to|by| heating of billets results in disturbance of the thermal mode|regime|. As a result billets have insufficient temperature for their deformation or its elevation, which leads to undesirable effects (heating, overheating|overburn|, burning|, thermal cracks|quere|).*

*Main factors influencing the character|nature| of temperature allocation on the section of the deformed|destort| metal are outlined.*

### Введение

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 обля, травления, зачистки) и задачами по совершенствованию металлосберегающих технологий.

### Основная часть

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, виробництво та ремонт авіаційної техніки”.

Для улучшения пластичности металла при горячем деформировании, существенную роль в технологическом процессе изготовления качественных вальцованных заготовок, занимают их нагрев до требуемой температуры и теплообмен между поверхностью вальцуемой заготовки и окружающей средой. При этом должно обеспечиваться минимальное химическое воздействие атмосферы нагревательного устройства на поверхность металла (окисление, насыщение водородом и др.), завершение структурных превращений, минимального роста зерна и сохранение целостности металла (отсутствие возможности появления внутренних трещин и других пороков). Эти требования выполняются при соблюдении режимов нагрева деформируемого сплава, которые определяются температурой рабочего пространства нагревательного устройства, временем выдержки, скоростью нагрева, а также промежуточными выдержками при той или иной температуре и времени выдержки при окончательной температуре нагрева [1].

Нагрев заготовок из алюминиевых сплавов необходимо проводить в электрических печах сопротивления с экранированными нагревательными элементами и принудительной циркуляцией воздуха для более интенсивной передачи теплоты на поверхность заготовок и обеспечения равномерности температуры рабочего пространства.

Перепад температур в рабочей зоне не должен превышать 15 - 25°C после достижения печью температурного интервала горячей деформации конкретного сплава.

Печи должны быть оборудованы автоматическими регулирующими и самопишущими приборами, и температура атмосферы печи должна контролироваться в каждой зоне в течение всего процесса нагрева. Так как алюминиевые сплавы обладают высокой теплопроводностью (в 3 - 4 и более раза превышающей теплопроводность стали) и малым коэффициентом поглощения (0,11-0,18), заготовки можно загружать в электрическую печь холодными, без снижения температуры печи для их предварительного подогрева, не опасаясь нарушения их целостности при нагреве.

Во время работы необходимо соблюдать точно установленный технологическим процессом режим нагрева заготовок, не допуская подачи для горячей деформации перегретого или недогретого металла.

Температуру нагрева заготовок в процессе отработки необходимо периодически контролировать контактной штыковой термопарой.

В процессе нагрева заготовок двери загрузочного окна держать плотно закрытыми.

Охлаждение изделий после деформации производится на воздухе.

Несоблюдение требований к нагреву заготовок приводит к нарушению теплового режима, в результате чего заготовки имеют недостаточную температуру для их деформации или ее превышение. К нежелательным явлениям, возникающим в результате неправильного нагрева заготовок, относятся недогрев, перегрев, пережог, термические трещины.

*Недогрев* металла возможен в следующих случаях:

а) при недостаточном времени выдержки заготовок в печи при заданной температуре; металл не успевает прогреться по всему сечению и сердцевина будет иметь пониженную по сравнению с поверхностью пластичность;

б) при заниженной температуре нагрева металла;

в) недогрев с какой-нибудь одной стороны, что является причиной неправильной укладки заготовок, на под печи или подстыванием температуры печи.

При штамповке недогретых или неравномерно нагретых по сечению заготовок появляются большие внутренние напряжения, которые могут привести к образованию разрывов, трещин. Недогрев металла может привести к браку, то есть незаполнению ручья штампа при последующей штамповке заготовок. Для того, чтобы избежать неравномерности нагрева и вредного влияния подсосываемого в печь воздуха, заготовки располагают на расстоянии 250—300 мм от загрузочного окна печи и примерно 50 - 100 мм от нагревателей в печах сопротивления, во избежание замыканий тока или повреждения нагревателей.

*Перегрев* возникает при незначительном превышении допустимой максимальной температуры деформации металла, или при слишком большой выдержке заготовок в печи, в результате чего наблюдается интенсивный рост зерна в металле. Крупнозернистая структура снижает механические свойства. Перегретый металл имеет низкую пластичность при деформировании и, как правило, вызывает появление трещин, а иногда может вызвать разрушение заготовки.

*Пережог* возникает при нагреве металла до температуры, близкой к температуре плавления, сопровождается окислением межкристаллитных оболочек и потерей прочных связей между зернами. Пережог является неисправимым браком. В связи с этим необходимо тщательно следить за температурой печи и временем выдержки в ней заготовок.

*Термические трещины* возникают в результате чрезмерно быстрого нагрева металла, вследствие чего появляются термические напряжения, значения которых превышают предел прочности сплава.

При исследовании теплообмена между поверхностью деформируемого металла и окружающей средой, из – за многих факторов, влияющих на характер распределения температуры по сечению деформированного металла, принимают ряд допущений, что позволяет использовать при анализе процесса теплопроводности феноменологический метод, основанный на установлении некоторых общих соотношений между параметрами, определяющими рассматриваемый процесс в целом.

Схематически весь комплекс явлений теплопереноса при обработке металлов давлением осуществляется следующим образом. Извлеченная из нагревательной печи заготовка, по мере перемещения в валках, охлаждается за счет лучистого и конвективного теплообмена с окружающей средой, а также за счет контактного теплообмена.

При подаче заготовки в вальцовочные штампы происходит охлаждение заготовки в результате теплопередачи штампам и ее нагревание вследствие диссипации механической энергии пластического формоизменения, а также за счет работы против внешних сил трения. Выйдя из очага деформации, металл вновь подвергается лучистому и конвективному теплообмену с окружающей средой.

Интенсивность охлаждения заготовки тем больше, чем больше отношение ее поверхности к объему. Степень охлаждения заготовки зависит от ее размеров и числа переходов при обработке. Поэтому при большом числе переходов вводят дополнительный подогрев заготовок, который увеличивает цикл технологического процесса, снижает качество деталей и полуфабрикатов. При этом увеличивается расход энергии и время нагрева заготовок, ухудшается структура металла, его пластичность и прочностные свойства.

Обычно при расчете потерь тепла через поверхность деформируемого металла, за время паузы (переноса заготовки из печи в штамп и др.) пользуются формулой:

$$Q = a_1 \cdot F \cdot t_1 \cdot (T_n - T_c), \quad (1)$$

где  $Q$  - тепло, потерянное деформируемым материалом за время паузы, кал.;

$a_1$  - коэффициент теплоотдачи между поверхностью металла и окружающей средой;

$F$  - контактная площадь, мм<sup>2</sup>;

$t_1$  - длительность паузы, с;

$T_n$  - средняя температура поверхности, °С;

$T_c$  - средняя температура окружающей среды, °С.

Суммарное значение коэффициента теплоотдачи  $a_1$ , между поверхностью прокатываемого металла и окружающей средой в течении паузы обусловлено лучистой ( $a_l$ ), конвективной ( $a_k$ ) и контактной ( $a_k'$ ) составляющими, т.е.

$$a_1 = a_l + a_k + a_k' \quad (2)$$

Остановимся на способах определения каждой из этих составляющих.

#### Лучистый теплообмен

Удельный тепловой поток, проходящий через поверхность деформируемого металла вследствие теплообмена излучения, определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$q_l = c_{\text{прив.}} \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где  $c_{\text{прив.}}$  - коэффициент излучения системы «прокатываемый металл – окружающая среда», определяется по формуле (4)

$$c_{\text{прив.}} = \frac{\varphi_{12} \cdot c_0}{1 + \varphi_{12} \left[ \frac{1}{\xi_1} - 1 + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\xi_2} - 1 \right) \right]}, \quad (4)$$

где  $\varphi_{12}$  - коэффициент облучения поверхностью заготовки окружающей среды;

$c_0$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\xi_1$  - степень черноты поверхности;

$\xi_2$  - степень черноты окружающей среды;

$F_1$  – излучающая поверхность заготовки, мм<sup>2</sup>;

$F_2$  – поверхность теплопоглощающей среды, мм<sup>2</sup>.

Поскольку  $F_1/F_2 < 1$ , то  $c_{\text{прив.}} = \xi_1 \cdot c_0$ , а коэффициент теплоотдачи определяется по формуле (5):

$$\alpha_l = \frac{\xi_1 \cdot c_0 \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_n - T_c} \quad (5)$$

#### Конвективный теплообмен

Коэффициент теплоотдачи конвекцией зависит от множества факторов, в том числе от формы теплоотдающей поверхности, скорости движения и температуры окружающей среды. Поэтому для различных видов обработки давлением, указанный коэффициент будет иметь различные значения. В частности:

а). Поперечное сечение деформируемого металла близко к круглому или отношение  $b/h$  близко к единице ( $b$  – ширина, мм;  $h$  – высота заготовки, мм).

Определение  $a_k$  для подобной формы заготовки может быть рассчитано по формуле [2]:

$$Nu = 0,18 Re^{0,62} \varphi, \quad (10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5) \quad (6)$$

где  $Nu = \alpha_k d / \lambda_g$  - критерий Нуссельта;

$\lambda_g$  - коэффициент теплопроводности воздуха;

$d = 4 F / \pi$  – приведенный диаметр поперечного сечения заготовки, мм;

$F$  - площадь поперечного сечения заготовки, мм<sup>2</sup>;

$\pi$  - периметр, мм;

$Re = wd/v$  – критерий Рейнольдса;

$w$  – скорость перемещения потока воздуха относительно поверхности заготовки, мм/с;

$v$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха;

$\varphi$  - функция угла атаки [3], для данного случая  $\varphi \approx 0,5$ .

б). Поперечное сечение деформируемого металла близко к прямоугольному, причем отношение  $b/h$  значительно больше единицы.

В этом случае применяют формулы, полученные для теплообмена при движении потока вдоль плоской стенки [4]:

$$Nu = 0,66 Re^{0,50} \quad (Re < 10^5); \quad (7)$$

$$Nu = 0,032 Re^{0,80} \quad (Re > 10^5), \quad (8)$$

где  $Re = \omega l / \nu$  – критерий Рейнольдса;

$Nu = \alpha_k \ell / \lambda_g$  – критерий Нуссельта;

$\omega$  – скорость перемещения воздуха относительно теплоотдающей поверхности, м/с;

$l$  – теплоотдающая длина поверхности заготовки по направлению прокатки, мм.

Для турбулентного режима обтекания воздухом движущей полосы рекомендуется формула (9): [3]

$$a_k = 5,04 \frac{\omega^{0,80}}{\ell^{0,20}} \quad (9)$$

Результаты, полученные по этой формуле, выражаются в технической системе единиц (ккал/м<sup>2</sup> ч. град). Для системы СИ имеем:

$$a_k = 5,86 \cdot \frac{\omega^{0,80}}{\ell^{0,20}} \quad (\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град.}) \quad (10)$$

#### *Контактный теплообмен*

В процессе обработки давлением металл в течение пауз подвергается контактному теплообмену с некоторыми элементами технологического оборудования. Однако ввиду небольшого времени контакта и невысоких значений, наблюдающихся при этом тепловых потерь, обычно контактную составляющую коэффициента теплоотдачи между поверхностью деформируемого металла и окружающей средой не берут для расчета. Следовательно, суммарный коэффициент теплоотдачи в течение пауз определяется по формуле

$$\alpha_1 = \alpha_l + \alpha_k \quad (12)$$

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 (лучистая –  $Q_4$ ; конвективная –  $Q_5$ ; контактная –  $Q_6$  составляющие теплообмена);
- время деформирования,  $Q_7$ .

В итоге тепловой баланс в очаге деформации будет иметь вид

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 \quad (13)$$

#### **Выводы**

1. Существенную роль в технологическом процессе изготовления качественных вальцованных заготовок занимают их нагрев до требуемой температуры, теплообмен между поверхностью вальцуемой заготовки и окружающей средой, неравномерность деформации и

распределения температурных полей в очаге деформации. При этом должно обеспечиваться минимальное химическое воздействие атмосферы нагревательного устройства на поверхность металла (окисление, насыщение водородом и др.), завершение структурных превращений, минимальный рост зерна и сохранение целостности металла (отсутствие возможности появления внутренних трещин и других пороков).

2. Несоблюдение требований к нагреву заготовок приводит к нарушению теплового режима, в результате чего заготовки имеют недостаточную температуру для их деформации или ее превышение. К браку возникающему в результате неправильного нагрева заготовок, относятся недогрев, перегрев, пережог, термические трещины.

3. Рассмотрен тепловой баланс в очаге деформации, который состоит из:

- приходных статей (нагрев заготовок в печи, нагрев заготовки в очаге деформации в результате энергии пластического деформирования, нагрев заготовки в очаге деформации за счет работы против сил трения);
- расходных статей (потерь тепла: в результате переноса заготовки от печи к вальцовочным штампам, за счет теплообмена между поверхностью заготовки и окружающей средой (лучистая, конвективная, контактная составляющие теплообмена);
- времени деформирования.

### *Литература*

1. Скрябин С.А. Изготовление поковок из алюминиевых сплавов горячим деформированием. Скрябин С.А. // - К.: "Квіц". – 2004. – 346 с.
2. Юдаев Б.Н. Теплопередача. / Юдаев Б.Н.// - М.: Высшая школа, 1981. 319 с.
3. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. /Никитенко Н.И.// - Киев: Наукова думка, 1983. – 352 с.
4. Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. /Зарубин В.С.// - М.: Наука, 1983, - 328 с.