УДК 669.18.046:621.74.047

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ Алюминиевой полосы совмещенным методом литья и деформации металла\*

В.В. ЧЕРНОМАС, доктор техн. наук, доцент (ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре) С.Н. ХИМУХИН, доктор техн. наук, профессор (ИМ ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск) С.Р. САЛИКОВ, аспирант (ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре) А.В. КОНОВАЛОВ, доктор техн. наук, профессор (ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург)

Статья получена 22 мая 2012 года

**Черномас В.В.** – 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, e-mail: userman10@mail.ru

Приводятся данные экспериментального исследования процесса деформирования металла в кристаллизаторе установки горизонтального литья и деформации металла. Представлена линейная модель, описывающая величину усилия деформирования в зависимости от технологических параметров процесса. Предложена методика оценки длины деформируемого клина при непрерывном процессе получения полосы из расплава технического алюминия марки А7.

**Ключевые слова:** установка горизонтального литья и деформации металла, граница твердой фазы, усилия деформирования.

## Введение

Основной особенностью изготовления металлоизделий совмещенным методом литья и обработки металла давлением с использованием установки горизонтального литья и деформации металла (УГЛДМ) является то, что процесс деформирования металла подвижными боковыми стенками кристаллизатора начинается в твердожидком состоянии, а формирование требуемого профиля поперечного сечения (калибрование) – в твердом [1]. Поскольку процесс реализуется в непрерывном режиме, то металл в различных областях кристаллизатора УГЛДМ одновременно находится в трех состояниях – жидком, твердожидком и твердом. Величина каждой из областей кристаллизатора, в которой металл находится в том или ином состоянии, характеризуется ее протяженностью по длине кристаллизатора. Центральная часть (область подвода расплавленного металла) *L* – область жидкого металла, калибрующая часть S – область твердого металла. Промежуточная часть *L* + *S* – область твердожидкого металла (рис. 1).



*Рис. 1.* Распределение фаз металла по областям кристаллизатора УГЛДМ:

S-твердая фаза; L+S-твердожидкая фаза; L-жидкая фаза

При этом протяженность каждой из областей по длине кристаллизатора характеризуется распределением температур в этих областях и определяется исходя из температурного критерия устойчивости процесса получения металлоизделий [2].

Из-за технических сложностей и погрешностей измерения температуры в зоне контакта формирующегося металлоизделия с рабочими поверхностями инструмента (подвижными частями кристаллизатора УГЛДМ) не всегда удается определить реальные границы различных областей кристаллизатора при установившемся режиме технологического процесса. Увеличение области твердого металла (смещение

<sup>\*</sup> Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН №12-І-П25-02 в рамках интеграционного проекта институтов ИМиМ ДВО РАН (грант №12-ІІ-УО-03-005) и ИМАШ УрО РАН (грант 12-С-1-1016) и проекта 12-І-ОЭММПУ-06.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

в сторону центра кристаллизатора) вызывает повышение нагрузки на приводные валы стенок кристаллизатора и приводит к увеличению значений степени деформации материала металлоизделия, что в конечном итоге снижает качество металлоизделий и надежность УГЛДМ в целом.

Целью данной работы является разработка методики и проведение на ее основе физического моделирования процесса деформирования формирующегося металлоизделия, которое позволит оценить реальные границы области твердой фазы (величины деформируемого клина) в кристаллизаторе УГЛДМ в ходе технологического процесса и определить усилия деформирования, создаваемые его подвижными стенками.

## 1. Методика проведения исследований

На рис. 2 представлены внешний вид (a) и принципиальная схема ( $\delta$ ) экспериментального стенда УГЛДМ для проведения физического моделирования.

В его состав входят электродвигатель постоянного тока типа Д-22У2 ГОСТ 184-71 мощностью 8 кВт с обратной связью для регулирования частоты вращения вала двигателя, редуктор с четырьмя выходными валами с передаточным числом, равным 2, и рабочая клеть кристаллизатора с приводными валами. В процессе работы крутящий момент от двигателя через редуктор передается на четыре приводных вала рабочей клети, которые, в свою очередь, приводят в движение четыре стенки кристаллизатора – две боковые, верхнюю и нижнюю. В электрическую цепь двигателя был установлен шунт калиброванный стационарный марки 75ШСМЗ-50А по ТУ 25-04 3104-76, электрический сигнал с которого (напряжение в электрической цепи) поступал на вход аудиокарты Sound Blaster 16 PCI, выполняющей функцию АЦП, после



Рис. 2. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) экспериментального стенда УГЛДМ для физического моделирования процесса:



чего он отображался и фиксировался на ПЭВМ с помощью программы PowerGraph 2.1.

В качестве объектов исследования были выбраны два типа клиновидных образцов из технического алюминия марки А7 ГОСТ 11069-2001, отличающихся своими геометрическими размерами (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид клиновидных образцов

Форма клина принималась исходя из конфигурации внутренней полости кристаллизатора УГЛДМ в середине цикла обжатия формирующегося металлоизделия, что соответствовало условию симметрии правой и левой части кристаллизатора. Длину клина выбирали из соображений устойчивости процесса изготовления металлоизделия. Максимальная длина клина соответствовала такому положению границы твердой фазы по длине кристаллизатора УГЛДМ, при котором обеспечивается максимально возможная (критическая) степень деформации материала металлоизделия без возникновения дефектов в его структуре и не приводит к снижению размерно-геометрической точности получаемого металлоизделия. Другими словами, выполняются деформационный критерий и критерий качества металлоизделия, которые необходимы для получения устойчивого процесса его изготовления [2]. Минимальная длина клина отвечала такому положению границы твердой фазы по длине кристаллизатора УГЛДМ, при котором обеспечивается отсутствие прорыва жидкой фазы за пределы калибрующей области кристаллизатора.

На рис. 4 представлены внешний вид и схема кристаллизатора УГЛДМ с образцами для испытаний. Известно, что при изготовлении металлоизделий совмещенным методом литья и деформации металла, кроме областей кристаллизатора, в которых металл находится в твердом состоянии, существуют и области кристаллизатора, где металл находится в жидком и твердожидком состоянии.

Для получения достоверных данных о процессе деформирования образцов необходимо было учесть дополнительную нагрузку на двигатель, которую создает сопротивление металла, находящегося в этих областях, на инструмент деформации. Твердую фазу твердожидкого состояния металла моделировали предварительно уплотненной до степени



Рис. 4. Внешний вид (а) и схема (б) кристаллизатора УГЛДМ с образцами для исследований

пористости 0,45...0,5 стружкой технического алюминия А7, а жидкую фазу в твердожидком и жидком состоянии – расплавом свинца марки С1 по ГОСТ 3778-98. Величину (протяженность по длине кристаллизатора УГЛДМ) области твердожидкого состояния металла (размер *b*, рис. 4, *б*) определяли исходя из температурного критерия устойчивости [2] и ранее проведенных экспериментальных исследований температурного режима кристаллизатора УГЛДМ [3, 4].

Экспериментальные исследования проводили следующим образом. Первоначально в определенные участки кристаллизатора УГЛДМ устанавливали клиновидные твердые образцы и образцы из предварительно уплотненной алюминиевой стружки. Затем кристаллизатор УГЛДМ разогревали до требуемой температуры, после чего заполняли кристаллизатор расплавом свинца. После заполнения кристаллизатора расплавом свинца и выдержки в течение 15 с для его проникновения в поры образцов из предварительно уплотненной стружки запускали привод УГЛДМ. В процессе работы УГЛДМ происходит цикличное обжатие клиновидных образцов боковыми стенками кристаллизатора и продвижение верхней и нижней стенками формирующегося металлоизделия в направлении выхода из кристаллизатора.

В пределах одного цикла обжатия усилия деформирования увеличиваются от минимальных до максимальных значений, соответствующих окончанию цикла обжатия образцов. Нарастание усилия деформирования отображается и фиксируется в памяти ПЭВМ с циклом записи 8 мс в виде изменения значений напряжения на калиброванном шунте, установленном в электрической цепи электродвигателя. Для дальнейшего анализа экспериментальных данных полученные значения наОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

CM

пряжения сравнивали со значениями напряжения на калиброванном шунте электродвигателя при холостом режиме работы УГЛДМ (внутри кристаллизатора нет образцов).

Частоту вращения вала электродвигателя в процессе деформирования образцов и при холостом режиме определяли с помощью электрического тахометра марки ТЭ-45.

Крутящий момент на валу электродвигателя при известных числах его оборотов определяли через преобразование значений напряжения на калиброванном шунте в значения силы тока якоря двигателя. Для определения механических характеристик по известным электромагнитным характеристикам двигателя пользовались известным отношением электрической и механической постоянных двигателя [5]:

$$C_{\rm e}/C_{\rm M} = EI_{\rm g}/Mn\dot{\eta} = 0,105,$$
 (1)

где  $C_{\rm e}$  и  $C_{\rm M}$  – соответственно электрическая и механическая постоянные для электродвигателя параллельного возбуждения; E - ЭДС якоря двигателя, В;  $I_{\rm g}$  – сила тока якоря, А; M – крутящий момент на валу двигателя, Н · м; n – число оборотов вала двигателя, об/мин;  $\dot{\eta} = 0,886 - КПД$  двигателя.

#### 2. Результаты исследований

Для построения линейной модели исследуемого процесса был реализован полный факторный эксперимент типа  $2^x$  для двух независимых переменных, в качестве которых были выбраны длина ( $L = x_1 = 74...112$  мм (размер *a*, рис. 4, *б*)) и температура ( $T = x_2 = 270...370$  °C) клиновидного образца. Откликом являлась разница между максимальными значениями напряжения на калиброванном шунте при деформации образцов и при холостом режиме работы УГЛДМ

$$\Delta U_{\rm m} = \Delta U_{\rm m1} - \Delta U_{\rm m2}, \qquad (2)$$

где  $\Delta U_{\rm m1}$  – напряжение на калиброванном шунте при деформации образцов, мВ;  $\Delta U_{\rm m2}$  – напряжение на калиброванном шунте при холостом режиме работы УГЛДМ, мВ. Границы варьирования независимыми факторами (максимальные и минимальные зна-

Таблица 1

Номер серии	Длина клиновидного образца, мм	Температура образца, °С
1	74	270
2	112	270
3	74	370
4	112	370



Рис. 5. Графики изменения напряжения при холостом режиме (а) и под нагрузкой (б)

Режим

 $\frac{1}{2}$ 

3

4

чения), а также значения фиксированных факторов принимали исходя из условий устойчивости технологического процесса получения металлоизделий. Последовательность проведения серий экспериментов при различных сочетаниях независимых факторов представлены в табл. 1.

Значения откликов для каждой серии экспериментов определяли из анализа диаграмм значений напряжений на калиброванном шунте. На диаграммах выделяли характерные участки, соответствующие устойчивой работе привода ЛКМГ с числом оборотов вала электродвигателя n = 180 об/мин. На рис. 5 представлены графики напряжения на калиброванном шунте в виде средних значений максимальных напряжений по трем экспериментам первой серии для одного цикла обжатия клиновидных образцов. Среднее значение максимальных напряжений при холостом режиме соответствовало 0,053 B (рис. 5, *a*) и практически не изменялось для всех серий экспериментов. Отклонение от этого значения для остальных серий экспериментов составляло ±0,003 В и было принято константой для всех серий экспериментов. Максимальное значение напряжения при работе ЛКМГ под нагрузкой соответствовало максимальной степени обжатия клиновидных образцов боковыми стенками кристаллизатора ЛКМГ и определялось таким положением боковых стенок кристаллизатора, при котором расстояние между ними в калибрующей области соответствовало минимальному значению. Очевидно, что такое положение определяло максимальное значение усилия, создаваемого боковыми стенками на формирующееся металлоизделие. Значение напряжения для этого положения в первой серии экспериментов составляло 0,085 В (рис. 5, б).

В табл. 2 представлены данные по напряжениям на калиброванном шунте для всех серий экспериментов.

		Т	аблица 2
	Напряжение на	унте, мВ	
1	Максимальное	Максимальное	Разность
	при холостом	под нагрузкой	значений
	режиме ( $\Delta U_{\rm m2}$ )	$(\Delta U_{\rm m1})$	$(\Delta U_{\rm m})$
		85	32
		98	45
	53	76	23

После обработки результатов эксперимента методом наименьших квадратов была получена линейная модель отклика следующего вида:

$$\Delta U_{\rm m} = 60 - 0.17T + 0.001TL;$$
  
270 \le T \le 370; 74 \le L \le 112, (3)

91

38

где T – температура клиновидного образца, °C; L – длина клиновидного образца, мм.

Уравнение регрессии (3) адекватно описывает экспериментальные данные, о чем свидетельствуют статистические характеристики полученной модели. Условие адекватности по критерию Фишера выполняется ( $F_{\rm pacu} < F_{\rm табл}$ , 94,3 < 199,5), статистическая значимость коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента удовлетворяется ( $t_{\rm pacu} > t_{\rm табл}$ , 12,8 > 12,71, 14,1 > 12,71), относительная ошибка аппроксимации не превышает 2 %, коэффициент корреляции R = 0.98.

Используя линейную модель (3), строили поверхность отклика (рис. 6, a), и с помощью многоуровневых ее сечений по L получили номограмму (рис. 6,  $\delta$ ) для графического определения границы области твердой фазы в кристаллизаторе УГЛДМ.

Для получения аналитической зависимости, описывающей длину деформируемого клиновидного образца из (3), выражали *L*:

$$L = 1000/T(\Delta U_{\rm m} - 60) + 170.$$
(4)



Рис. 6. Поверхность отклика (а) и номограмма (б) для определения границы твердой фазы в кристаллизаторе УГЛДМ

Выражение (4) может быть использовано для определения границы области твердой фазы в кристаллизаторе УГЛДМ при установившемся процессе получения металлоизделий из технического алюминия.

На следующем этапе исследований определяли величину максимальных усилий, возникающих в калибрующей части кристаллизатора при деформировании клиновидных образцов. Из соотношения (1) получили значение момента на валу двигателя:

$$M = 10,75 E I_{g}/n.$$
 (5)

При n = 180 об/мин измеренная величина ЭДС составляла E = 167 В, поэтому выражение (5) можно представить в виде

$$M = 9,97I_a \approx 10I_a. \tag{6}$$

Для калиброванного шунта марки 75ШСМ3-50А значения  $I_{g}$ , с учетом коэффициента шунтирования, связаны с  $\Delta U_{u}$  (мВ) соотношением

$$I_{\rm g} \approx 0,667 \cdot \Delta U_{\rm m} \,. \tag{7}$$

Тогда величина момента на валу двигателя  $M(H\cdot M)$  с учетом (7) примет окончательный вид:

$$M \approx 6,67 \cdot \Delta U_{\rm m} \,. \tag{8}$$

Момент на приводных эксцентриковых валах боковых стенок кристаллизатора  $M_{\rm B}$  с учетом передаточного числа редуктора:

$$M_{\rm B} \approx 2M \approx 13,34 \cdot \Delta U_{\rm m}.\tag{9}$$

Необходимо отметить, что в выражении (9) потери мощности в кинематических парах при передаче момента от двигателя к боковым стенкам кристаллизатора учтены в  $\Delta U_{\rm m}$ .

Усилия, создаваемые подвижными боковыми стенками кристаллизатора УГЛДМ с учетом кине-

матики движения боковых стенок [6], определяли в виде равномерно распределенной по высоте боковой стенки нагрузки в калибрующем сечении кристаллизатора:

$$q \approx 13,34 \cdot \Delta U_{\rm m} k,\tag{10}$$

где q – распределенная по высоте боковой стенки кристаллизатора УГЛДМ нагрузка, Н/м; k – коэффициент, учитывающий геометрические параметры кристаллизатора УГЛДМ, 1/м<sup>2</sup>. Значения коэффициента k определяются отношением  $k = 1/(r \cdot s)$ , где г – расстояние от центра приводного эксцентрикового вала до калибрующего сечения кристаллизатора УГЛДМ в конце цикла обжатия формирующегося металлоизделия, м; s – высота боковой стенки кристаллизатора УГЛДМ, м. Физический смысл коэффициента k заключается в том, что он численно равен величине обратной площади сечения, проходящего через боковую стенку кристаллизатора и ограниченного осью приводного эксцентрикового вала и линией, соответствующей границе калибрующего участка кристаллизатора по высоте боковой стенки. Учитывая, что значение коэффициента k при проведении экспериментальных исследований  $k = 1/(0,120 \times 0,04) = 208,3 \text{ м}^{-2}$ , окончательно получим

$$q \approx 2780 \cdot \Delta U_{\rm m}.\tag{11}$$

Используя выражение (11), определим максимальные усилия в калибрующей области кристаллизатора УГЛДМ *q*<sub>i</sub> для всех рассмотренных режимов:

$$q_1 = 89 \text{ kH/m}; q_2 = 125,1 \text{ kH/m};$$
  
 $q_3 = 63,9 \text{ kH/m}; q_4 = 105,6 \text{ kH/m}.$ 

## 3. Обсуждение результатов

Результаты проведенных исследований были применены для определения параметров процесса получения полосы из технического алюминия марки А7 на экспериментальном стенде УГЛДМ при следующих условиях: температура заливки расплава – 710 °C; степень обжатия заготовки – 0,25; производительность – 1,5 м/мин (соответствует числу оборотов вала двигателя – 180 об/мин).

На рис. 7 представлены данные по распределению температур и напряжениям на калиброванном шунте для момента времени, соответствующего устойчивому процессу получения полосы. Температура на внутренней границе калибрующей области (кривая 2, рис. 7, *a*) составляла 348 °C, на внешней – 274 °C (кривая 3, рис. 7, *a*) и в центре кристаллизатора – 675 °C.

Данное распределение температур по областям кристаллизатора удовлетворяет температурный крите-





I – в центральной области кристаллизатора; 2 – на внутренней границе калибрующей области кристаллизатора; 3 – на внешней границе калибрующей области кристаллизатора

рий устойчивости процесса [2]. Максимальное значение напряжения на калиброванном шунте при данном температурном режиме составляло 0,087 В (рис. 7,  $\delta$ ). По выражению (2) определяли значение  $\Delta U_{\rm m} = 87 - 59 = 28$  мВ. Границу твердой фазы в кристаллизаторе определяли по номограмме (см. рис. 6,  $\delta$ ), ее величина при известной температуре на внутренней границе составила 81 мм. Величину равномерно распределенной по высоте боковой стенки нагрузки в калибрующем сечении кристаллизатора определяли по (11), она составила  $q \approx 78$  кН/м.

Напряжения сжатия для полосы поперечного сечения  $cd = 40 \cdot 12$  мм в калибрующей области кристаллизатора под действием нагрузки, равномерно распределенной по высоте боковой стенки,  $\sigma \approx q/d = 78 /0,012 = 6,5$  МПа. Допустимые напряжения для технического алюминия марки А7 при температуре 400 °C составляют 20 МПа [7]. Таким образом, критерий устойчивости процесса по напряжениям [2] удовлетворяется.

#### Выводы

В результате экспериментального исследования процесса деформирования металла в кристаллизаторе установки горизонтального литья и деформации металла получена линейная модель, описывающая величину усилия деформирования в зависимости от технологических параметров процесса. Предложена методика оценки длины деформируемого клина при непрерывном процессе получения полосы из расплава технического алюминия марки А7. Предложен способ определения распределенной по высоте боковой стенки кристаллизатора УГЛДМ нагрузки в конце цикла обжатия заготовки. Полученные данные позволили определить силовые параметры процесса получения полосы из технического алюминия марки А7 и сделать вывод об устойчивости процесса ее получения.

#### Список литературы

1. *Черномас В.В.* Исследование процесса изготовления металлоизделий совмещенным методом литья и штамповки // Обработка металлов. – 2011. – № 3. – С. 3–10.

2. Черномас В.В., Ловизин Н.С., Соснин А.А. Критерии устойчивости технологического процесса получения металлоизделий на установке горизонтального литья и деформации металла // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М.: Наука, 2012. – № 2. – С. 71–77.

3. Черномас В.В., Ловизин Н.С., Соснин А.А. Исследование теплового режима кристаллизатора установки горизонтального литья и деформации металла при из-

#### ТЕХНОЛОГИЯ

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ



готовлении металлоизделий из алюминиевых сплавов// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: КШП ОМД, 2011. – № 10. – С. 39–45.

4. Черномас В.В., Ловизин Н.С., Соснин А.А. Исследование распределения температур на поверхности контакта металлоизделия с верхней и нижней стенками кристаллизатора установки горизонтального литья и деформации металла вблизи его продольной плоскости симметрии// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: КШП ОМД, 2011. – № 12. – С. 21–25.

5. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.

6. Черномас В.В., Ловизин Н.С., Соснин А.А. Влияние движения составных частей кристаллизатора установки горизонтального литья и деформации металла на процесс формирования заготовки // Школа по фундаментальным основам моделирования обработки материалов. Математическое, вычислительное и информационное обеспечение технологических процессов и систем: докл. Всерос. научно-технической конф. (26–28 октября 2010 г.). – Комсомольск-на-Амуре. – 2010. – Т. 4. – С. 134–137.

7. *Третьяков А.В., Зюзин В.И.* Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.

## Modeling of the deformation process in obtaining an aluminum strip casting method and the combined deformation of the metal

V.V. Chernomas, S.N. Himuhin, S.R.Salikov, A.V. Konovalov

The article presents the results of an experimental study of the deformation process of the metal in the mold casting and installation of horizontal deformation of the metal. Represented by a linear model describing the magnitude of the efforts of deformation depending on process parameters. The method of estimating the length of the deformable wedge in a continuous process of obtaining strips of aluminum melt of technical grade A7.

**Key words:** equipment of the horizontal casting and deformation of the metal, boundary of the solid phase, deformation strain.