

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОСЫ СОВМЕЩЕННЫМ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

*В.В. ЧЕРНОМАС, доктор техн. наук, доцент,
С.Р. САЛИКОВ, аспирант,
(ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)
А.В. КОНОВАЛОВ, доктор техн. наук, профессор
(ИМАШ УрОРАН, г. Екатеринбург)*

Статья поступила 26 марта 2012 года

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

Рассматривается процесс получения металлоизделий совмещенным методом литья и деформации металла. Установлено взаимное влияние технологических параметров процесса на его устойчивость и определено оптимальное значение этих параметров для получения полосы поперечного сечения 40×12 мм из технического алюминия АД0.

Ключевые слова: установка непрерывного горизонтального литья и деформации металла, тепловой режим кристаллизатора, оптимизация технологических параметров.

Введение

В работе [1] определены основные критерии, которым должен отвечать совмещенный процесс получения металлоизделий с применением установки непрерывного горизонтального литья и деформации металла (УНГЛДМ). Наиболее значимым из этих критериев является температурный критерий устойчивости технологического процесса, характеризующий требуемое распределение температур по областям кристаллизатора УНГЛДМ.

Основной целью проведения данного исследования является установление взаимосвязи тепловых режимов процесса с его устойчивостью и определение на основе полученных данных оптимальных параметров процесса получения металлоизделий из алюминиевых сплавов на примере полосы с поперечным сечением 40×12 мм.

В качестве объекта исследования был выбран кристаллизатор УГЛДМ, оснащенный двумя системами охлаждения, различающимися своим конструктивным исполнением. Первая система водяного циркуляционного охлаждения осуществляется с применением перфорированных глухондных стаканов, через которые вода подается в ступенчатые каналы системы охлаждения боковых стенок кристаллизатора (рис. 1, а). Вторая – с применением прямоточных стаканов (рис. 1, б). Количество и диаметр отверстий в глухондном стакане выбирали из условия равенства расхода охлаждающей воды, который создается через отверстия перфорированного стакана и торцевую поверхность прямоточного стакана. Регулирование рабочих параметров систем охлаждения производилось изменением характеристик номинального давления в системе охлаждения и начальной температуры воды на входе в систему охлаждения.

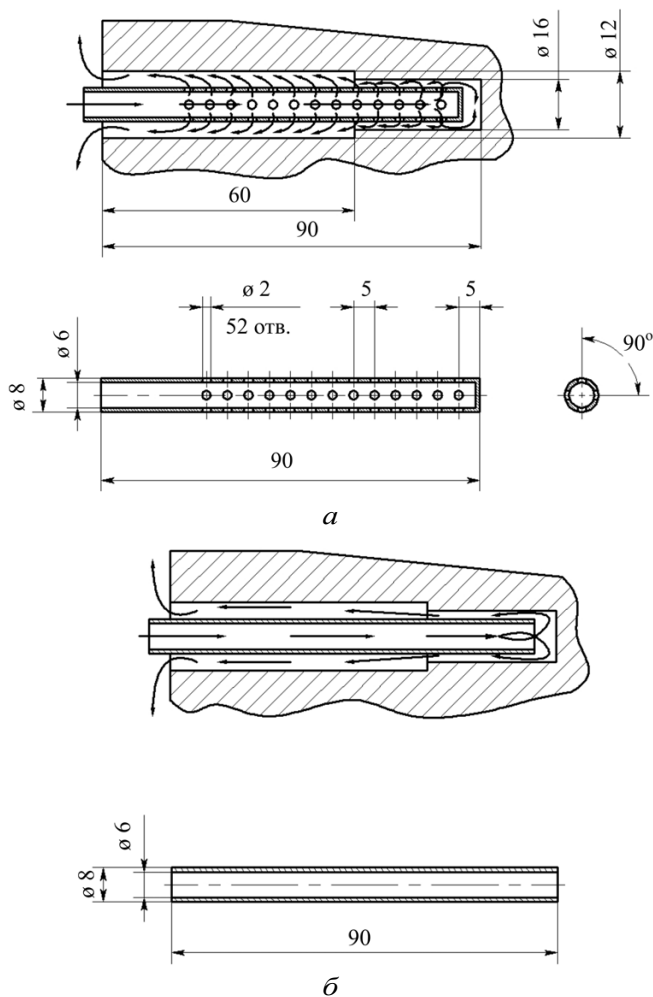


Рис. 1. Конструкции систем охлаждения кристаллизатора УНГЛДМ:

a – с перфорированным глухонным стаканом;
б – с прямоточным стаканом

1. Методика проведения исследований

Исходными данными для исследования теплового режима кристаллизатора УНГЛДМ является распределение температур на продольной плоскости симметрии кристаллизатора вблизи поверхности нижней и верхней стенок при предварительном прогреве кристаллизатора, а также температуры охлаждающей воды на входе и выходе из системы охлаждения кристаллизатора. Наличие продольной и поперечной плоскостей симметрии кристаллизатора УНГЛДМ позволяет определить распределение температур на рабочих поверхностях верхней и нижней стенок одной четвертой части составного кристаллизатора.

На рис. 2 представлен вид одной четвертой части составного кристаллизатора, где схематично показаны точки, в которых установлены

датчики измерения температуры. В качестве датчиков измерения температуры верхней и нижней стенок кристаллизатора использованы термоэлектрические преобразователи (термопары) градуировки ХА(К) по ГОСТ Р8.585-2001 с диаметром проволоки 0,5 мм, а для контроля температур охлаждающей воды – термопреобразователи сопротивления марки ТСМ-50М по ГОСТ 6651-94. Показания датчиков температуры фиксировали с помощью многоканального измерителя температуры марки «Термодат-29М1» (ТУ 4218-004-12023213-2004, государственный реестр средств измерения России № 17602-04).

Влияние системы охлаждения кристаллизатора на устойчивость процесса получения металлоизделий из алюминиевых сплавов оценивали исходя из продолжительности рабочего прогрева кристаллизатора ($\tau_{\text{рп}}$), разницы температур (ΔT) охлаждающей воды на выходе ($T_{\text{вых}}$) и входе ($T_{\text{в}}$) в системе охлаждения и равномерности распределения температур рабочих поверхностей верхней и нижней стенок кристаллизатора по их длине. При этом распределение температур рабочих стенок кристаллизатора по его областям должно соответствовать температурному критерию устойчивости технологического процесса [1].

Очевидно, что разница температур (ΔT) охлаждающей воды на выходе и входе в системе охлаждения характеризует ее эффективность: чем больше значение ΔT , тем выше КПД системы охлаждения.

Продолжительность рабочего прогрева кристаллизатора УНГЛДМ оценивали исходя из длительности выравнивания температуры воды на выходе из системы охлаждения от начала момента нарастания температуры охлаждающей воды, характерного для момента заполнения кристаллизатора расплавленным металлом,

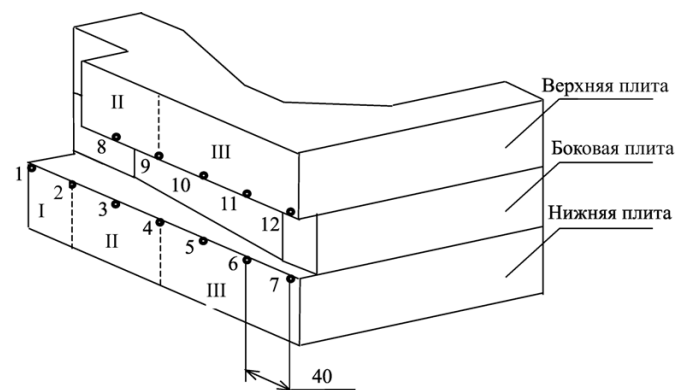


Рис. 2. Схема 1/4 части кристаллизатора УНГЛДМ



до установившегося значения, характерного для устойчивого процесса получения металлоизделия.

Равномерность распределения температур рабочих поверхностей верхней и нижней стенок кристаллизатора по их длине оценивали как величину разности температур перед и за условной границей соответствующей области кристаллизатора. Для нижней стенки (см. рис. 2) – разница между значениями температур в точках 1 и 3 (граница области I и II (ΔT_{1-3})) и точках 3 и 5 (граница области II и III (ΔT_{3-5})). Для верхней стенки (рис. 2) – разница между значениями температур в точках 8 и 10 (граница области II и III (ΔT_{8-10})).

Исследование теплового режима кристаллизатора УНГЛДМ проводили при следующих начальных условиях и параметрах:

- сортament металлоизделия: полоса поперечного сечения 40×12 мм;
- материал заготовки: технический алюминий АД0 ГОСТ 4784-97;
- материал кристаллизатора: сталь 45 ГОСТ 1050-88;
- температура заливки расплава: 700 °С;
- степень обжатия заготовки: 0,25;
- производительность: 1,5 м/мин;
- номинальное давление в системе охлаждения (p_b): регулируемое (0,4...1,0 кгс/см²);
- температура воды на входе в систему охлаждения (T_b): регулируемая (20...40 °С);
- объемный расход воды в системе охлаждения: регулируемый (40...70 см³/с);
- начальная температура центральной области кристаллизатора (значение температуры в точке 1 на рис. 2): 630 °С.

В табл. 1 представлены основные режимы системы охлаждения кристаллизатора УНГЛДМ, при которых проводились исследования.

Таблица 1

Параметр	Режимы работы системы охлаждения кристаллизатора УНГЛДМ							
	с перфорированным стаканом (рис. 1, а)				с прямоточным стаканом (рис. 1, б)			
	1	2	3	4	5	6	7	8
p_b , кг/см ²	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0
T_b , °С	20	20	40	40	20	20	40	40

2. Результаты исследований

На первом этапе были исследованы параметры рабочего прогрева кристаллизатора УНГЛДМ. На рис. 3 представлены кривые, описывающие зависимость температуры воды на выходе из системы охлаждения кристаллизатора от продолжительности технологического цикла получения металлоизделия для 1-го и 5-го режимов.

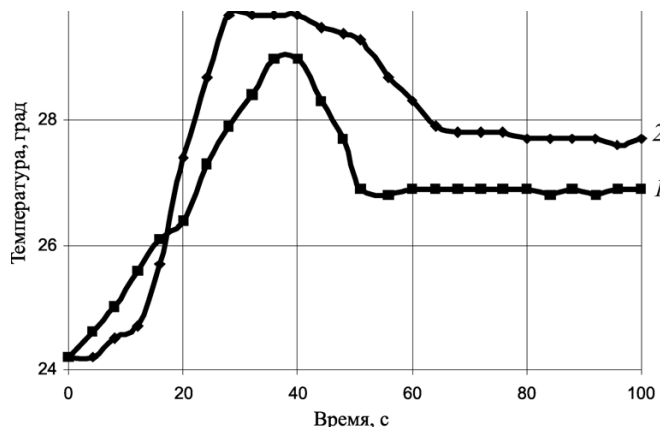


Рис. 3. Изменение температуры воды на выходе из системы охлаждения: 1–5-й режим; 2–1-й режим

За начало отсчета временного интервала выбирали момент заливки кристаллизатора УНГЛДМ расплавленным металлом. Своего пикового значения температура охлаждающей воды для 5-го режима работы системы охлаждения (кривая 1, рис. 3) достигала через 36 с от начала процесса и составляла 29 °С, в течение последующих 28 секунд происходило выравнивание температур до установившегося значения. Через 64 с от начала процесса температура достигала 27,7 °С при ее значении на входе в систему охлаждения 20 °С. Для 1-го режима работы системы охлаждения (кривая 2, рис. 3) пиковое значение температуры охлаждающей воды (29,7 °С) достигалось через 28 с, а продолжительность выравнивания температур после пикового значения составляла 48 с. Соответственно установившийся режим работы системы охлаждения наступал через 76 с после заливки кристаллизатора расплавом и соответствовал температуре воды на выходе из кристаллизатора, равной 27,2 °С.

Увеличение температуры воды на входе в систему охлаждения кристаллизатора до 40 °С при постоянном давлении (режимы 3-й и 7-й)

способствовало изменению температуры воды на выходе из системы охлаждения (рис. 4).

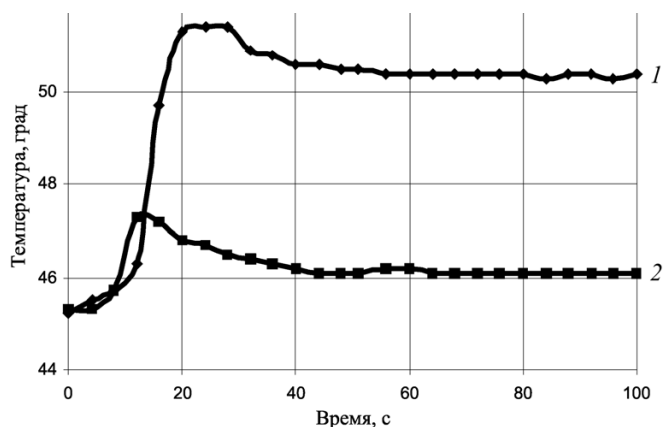


Рис. 4. Изменение температуры воды на выходе из системы охлаждения:
1—3-й режим; 2—7-й режим

Пиковые значения температуры охлаждающей воды для 3-го и 7-го режимов работы системы охлаждения достигались соответственно через 24 и 12 с от начала процесса и составляли 51,4 и 46,8 °C.

Продолжительность рабочего прогрева кристаллизатора, исходя из равенства продолжительности выравнивания температур после пикового значения этих режимов работы кристаллизатора (32 с), достигалась соответственно через 56 и 44 с. Значения температур после рабочего прогрева кристаллизатора соответствовали 50,4 и 46,1 °C для 3-го и 7-го режимов работы системы охлаждения. Используя аналогичные рассуждения, были получены данные и для остальных режимов работы системы охлаждения. Их численные значения представлены в табл. 2.

Наибольшая продолжительность рабочего прогрева кристаллизатора соответствует 1-му режиму, наименьшая — 6-му режиму. Наиболь-

шая разница температур воды на выходе и входе в систему охлаждения составляла 10,4 °C при 3-м режиме, наименьшая — 4,7 °C при 6-м режиме. Использование в конструкции системы охлаждения перфорированного стакана приводило к увеличению общей продолжительности рабочего прогрева кристаллизатора по сравнению с прямоточным стаканом в среднем на 10 с в условиях равенства давлений и температур на входе в систему охлаждения (соответственно режимы 1–5, 2–6, 3–7, 4–8). Отмечалось увеличение перепада температур воды на выходе и входе в систему охлаждения для сравниваемых режимов в среднем на 3,8 °C.

На втором этапе было исследовано распределение температур по длине кристаллизатора УНГЛДМ. Значения температур по длине в соответствующих точках кристаллизатора для установившегося процесса работы системы охлаждения представлены в табл. 3.

Для всех режимов, представленных в табл. 3, на границах условных областей кристаллизатора (границы областей соответствовали температурам в точках 2, 4 и 9) выполнялся температурный критерий устойчивости процесса ($T_2 \geq 420$ °C, $T_4 \geq 270$ °C, $T_9 \geq 270$ °C) [1].

Максимальная разница температур вблизи границы II и III области кристаллизатора (ΔT_{3-5}) соответствует 1-му режиму — 148 °C, минимальная — 3-му режиму (105,6 °C) при нормируемом значении этой величины в пределах 75...150 °C.

Для определения взаимного влияния конструкции системы охлаждения, а также давления и температуры воды на входе в систему охлаждения на исследуемые параметры процесса был реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^x для трех независимых переменных, в качестве которых были выбраны давление в системе охлаждения ($p_B = 0,4 \dots 1,0$ кгс/см²), температура воды на входе в систему охлаждения ($T_B = 20 \dots 40$ °C) и параметр S_R , характеризующий конструкцию системы охлаждения. Этот параметр определялся отношением величины суммарного поперечного сечения отверстий на выходе из системы охлаждения к внутреннему поперечному сечению стакана ($S_R = 1,0 \dots 5,8$). Откликами являлись продолжительность рабочего прогрева кристаллизатора, величина перепада температур на выходе и входе в систему охлаждения и разница температур вблизи границы II и III области кри-

Таблица 2

Параметр	Режимы работы системы охлаждения кристаллизатора УНГЛДМ							
	с перфорированным стаканом (рис. 1, а)				с прямоточным стаканом (рис. 1, б)			
	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{\text{вых}},$ °C	27,7	26,2	50,4	47,3	26,9	24,7	46,1	45,8
$\Delta T,$ °C	7,7	6,2	10,4	7,3	6,9	4,7	6,1	5,8
$\tau_{\text{пр}},$ с	76	48	56	44	64	40	44	36

Таблица 3

Параметр	Режимы работы системы охлаждения кристаллизатора							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Нижняя стенка кристаллизатора								
$T_1, ^\circ\text{C}$	650,5	645	643,8	641,3	643,8	642,2	646,7	651,4
$T_2, ^\circ\text{C}$	590,9	573,8	574,8	600	588,7	557,1	572,3	565,3
$T_3, ^\circ\text{C}$	537	518,2	526,2	555,1	533,3	502,9	508,1	490,6
$T_4, ^\circ\text{C}$	470,4	457	480,1	500	470,6	443,3	448,3	424
$T_5, ^\circ\text{C}$	388,3	383,8	420,6	423,2	392,9	375	380,1	358,1
$T_6, ^\circ\text{C}$	337,7	337,5	381,3	371,8	344,2	333,3	346,6	320
$T_7, ^\circ\text{C}$	336,8	309,1	355,6	339,5	321,1	309,1	322,8	316,9
Верхняя стенка кристаллизатора								
$T_8, ^\circ\text{C}$	346,8	356,5	374,3	353,6	371	359,3	383,8	393
$T_9, ^\circ\text{C}$	309	325,5	332,6	328,7	328,4	326,2	313,6	350
$T_{10}, ^\circ\text{C}$	273,8	293,5	395,1	302,5	286,4	290,3	274,9	310
$T_{11}, ^\circ\text{C}$	246,3	267,1	265,6	278,6	245,5	356,6	268,5	267
$T_{12}, ^\circ\text{C}$	230,9	254,5	249,3	267	237,8	229,8	253,8	253,1
Разность температур вблизи границ условных областей кристаллизатора								
$\Delta T_{1-3}, ^\circ\text{C}$	113,5	126,5	117,6	86,2	110,5	139,3	138,6	160,8
$\Delta T_{3-5}, ^\circ\text{C}$	148,7	134,4	105,6	128,3	140,4	127,9	128	132,5
$\Delta T_{8-10}, ^\circ\text{C}$	73	63	79,2	51,1	84,6	69	108,9	83

сталлизатора. Границы варьирования независимыми факторами (максимальные и минимальные значения), а также значения фиксированных факторов принимали исходя из условий устойчивости технологического процесса. Значения откликов представлены в табл. 2 и 3. После статистической обработки результатов ПФЭ были построены линейные модели, описывающие совместное влияние указанных факторов на отклики.

$$\Delta T = 7,42 - 3,48 \times p_B + 0,12 \times T_B + 0,3 \times p_B \times S_R - 0,02 \times T_B \times S_R; \quad (1)$$

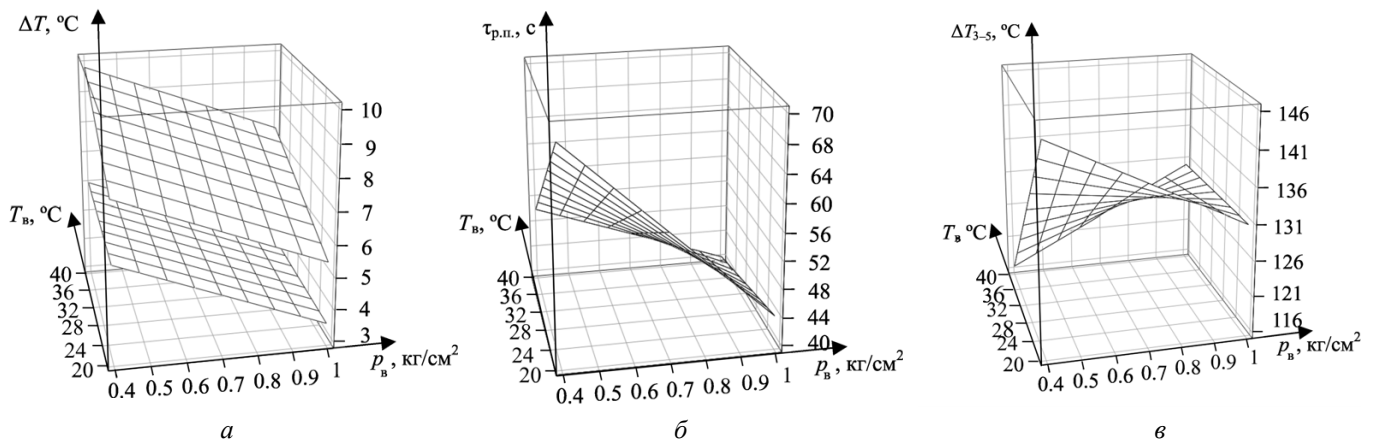
$$\tau_{\text{пр}} = 118 - 70 \times p_B - 1,53 \times T_B + 1,33 \times p_B \times T_B; \quad (2)$$

$$\Delta T_{3-5} = 199 - 67,33 \times p_B - 2,29 \times T_B + 2,25 \times p_B \times T_B. \quad (3)$$

3. Обсуждение результатов

Уравнения регрессии (1)–(3) представлены в окончательном виде с учетом исключения слагаемых, для которых значимость коэффициентов регрессии, оцениваемая по критерию Стьюдента, не подтвердилась. Гипотеза об адекватности

построенных линейных моделей, оцениваемая по критерию Фишера, подтверждается для всех уравнений. Необходимо отметить, что в уравнения (2) и (3) не входит параметр S_R , поскольку гипотеза о статистической значимости коэффициентов регрессии, включавших этот параметр, подтвердилась только для уравнения (1) и только при парных взаимодействиях с p_B и T_B . С увеличением параметра S_R (переход к системе охлаждения с перфорированным стаканом) ΔT увеличивается при уменьшении давления в системе охлаждения и увеличении температуры воды на входе в систему охлаждения. На продолжительность рабочего прогрева кристаллизатора и равномерность распределения температур по длине кристаллизатора конструкция системы охлаждения по сравнению с другими факторами в рамках их интервала варьирования практически не оказывает влияния. Это можно объяснить тем, что конструкция системы предусматривает охлаждение только боковых стенок в области калибрования (III область), верхняя и нижняя


 Рис. 5. Поверхности отклика: ΔT (а); $\tau_{p.l.}$ (б); ΔT_{3-5} (в)

стенки не охлаждаются исходя из технологических соображений. Общий теплообмен верхней и нижней стенок кристаллизатора складывается из их конвективного теплообмена с окружающей средой и теплопередачи в области контакта между боковыми стенками и верхней и нижней стенками кристаллизатора. Причем последний, по сравнению с конвективным теплообменом, вносит несущественный для данного процесса вклад и практически не влияет на устойчивость процесса. Однако теплообмен между формирующимся металлоизделием и боковыми стенками кристаллизатора в области калибрования, характеризуемый градиентом температур на поверхностях их контакта, очевидно, оказывает влияние на структурообразование поверхностных слоев формирующегося металлоизделия.

Заключительным этапом исследований был поиск оптимальных значений технологических параметров. Поиск оптимума производили графическим методом из анализа поверхностей откликов. Очевидно, что значения откликов должны удовлетворять следующим условиям:

$$\Delta T \rightarrow \max; \tau_{p.l.} \rightarrow \min; \Delta T_{3-5} \rightarrow \min. \quad (4)$$

На рис. 5 представлены поверхности отклика, соответствующие линейным моделям (1)–(3).

Условие (4) выполняется при следующих соотношениях величины факторов:

$$\text{для } \Delta T: T_b = 40 \text{ }^\circ\text{C}; p_b = 0,4 \text{ кг/см}^2; S_R = 5,8;$$

$$\tau_{p.l.}: T_b = 40 \text{ }^\circ\text{C}; p_b = 1,0 \text{ кг/см}^2;$$

$$\Delta T_{3-5}: T_b = 40 \text{ }^\circ\text{C}; p_b = 0,4 \text{ кг/см}^2.$$

Отмечено, что условие (4) для ΔT и ΔT_{3-5} выполняется при одних и тех же сочетаниях параметров T_b и p_b . В этом случае указанные частные критерии подобны.

Для учета частного критерия $\tau_{p.l.}$ необходимо свести задачу оптимизации к интегральному (обобщенному) критерию устойчивости технологического процесса. Для построения интегрального отклика пользовались принципом оптимальности по Парето, сущность которого сводится к поиску оптимального компромиссного варианта, сбалансированного по противоречивости частных критериев [2]. Задача сводится к минимизации интегрального критерия (K), построенного от двух частных откликов, $\tau_{p.l.}$ и ΔT_{3-5} при одном варьируемом параметре, p_b (значения температур для обоих откликов одинаковы, $40 \text{ }^\circ\text{C}$).

В табл. 4 представлены значения частных критериев в зависимости от интервала изменения величины p_b .

После приведения значений частных критериев к безразмерному нормируемому виду (со-

Таблица 4

p_b , кг/см ²	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ΔT_{3-5} , °C	116,5	118,7	121	123,3	125,5	127,8	130,1
$\tau_{p.l.}$, с	50,1	48,4	46,7	45	43,4	41,7	40
n_1	0,8955	0,9124	0,9301	0,9477	0,9646	0,9823	1
n_2	1	0,9661	0,9321	0,8982	0,8663	0,8323	0,7984
ω_1	0,7074						
ω_2	0,3666						
K	0,0926	0,0786	0,0675	0,0617	0,0633	0,0700	0,0825
$K \rightarrow \min$	–	–	–	min	–	–	–

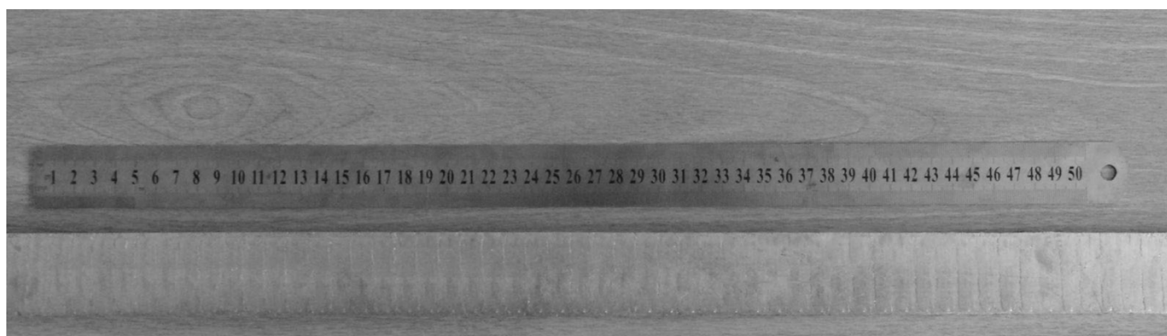


Рис. 6. Внешний вид полосы с поперечным сечением 40×12 мм из технического алюминия АД0

ответственно n_1 и n_2) матрица частных критериев Φ , позволяющая определить область возможных изменений частных критериев, имеет вид

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0,8955 & 1 \\ 1 & 0,7984 \end{pmatrix}.$$

Значения весов частных критериев ω_i определяем из решения матричного уравнения [2]:

$$\Phi \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Вычисление значений интегрального критерия K производили по зависимости [2]:

$$K = \sqrt{\sum_i \omega_i^2 \left(\frac{n_i}{n_{i\min}} - 1 \right)^2}.$$

Оптимальным с точки зрения компромиссного решения является величина номинального давления в системе охлаждения $p_b = 0,7 \text{ кг/см}^2$.

Для проверки адекватности полученных данных на экспериментальном стенде УНГЛДМ был реализован процесс получения полосы при расчетных оптимальных параметрах процесса. Результаты экспериментального опробования подтвердили возможность получения полосы из технического алюминия АД0 с поперечным сечением 40×12 мм (рис. 6) в устойчивом режиме.

Выводы

Установлена взаимосвязь тепловых режимов процесса с его устойчивостью. На основе полученных данных определены оптимальные параметры процесса получения металлоизделий из алюминиевых сплавов ($T_b = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_b = 0,7 \text{ кг/см}^2$; $S_R = 5,8$) на примере полосы с поперечным сечением 40×12 мм, что подтверждается результатами экспериментального опробования процесса получения полосы из технического алюминия АД0.

Работа выполнена при поддержке гранта №12-И-П25-02 и в рамках интеграционного проекта институтов ИМиМ ДВО РАН (12-И-УО-03-005) и ИМАШ УрО РАН (12-С-1-1016).

Список литературы

1. Черномас В.В. Исследование процесса изготовления металлоизделий совмещенным методом литья и штамповки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3. – С. 3–10.
2. Дьячков Ю.А. Моделирование технических систем: учеб. пособие / Ю.А. Дьячков, И.П. Торопцев, М.А. Черемшанов. – Пенза, 2011. – 239 с.

Optimization of technological parameters of the process of obtaining a combined method of strip casting and deformation.

V.V. Chernomas, S.R. Salikov, A.V. Kononov

The process of obtaining a combined method of metal casting and metal deformation is discussed. Established the mutual influence of process parameters on its stability and determined the optimal value of these parameters for the strip cross-section of 40×12 mm of technical aluminum AD0.

Key words: installation of continuous casting and horizontal deformation of the metal, the thermal regime of the mold, the optimization of process parameters.