

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УГНЛ НА КАЧЕСТВО ЗАГОТОВКИ

Бредихин В.Н.¹, Кожанов В.А.¹, Кушнерова Е.Ю.², Кушнерова В.Ю.²

(1-Донецкий государственный научно-исследовательский и проектный институт цветных металлов, Украина, 2-Донецкий национальный технический университет, Украина).

The investigation of the process parameters effect on the quality of the casting has been fulfilled using multifactor planned experiment on the commercial unit of horizontal continuous casting (УГНЛ). The mathematical model of the bronze billet casting process is obtained in a closed horizontal mold at maximum output with quality characteristics (σ_B , δ , HB , S) that are at the GOST level. The favorable casting modes are determined: the drawing pitch, the mold inlet temperature and billet surface temperature at the mold outlet.

Введение. Исследованию влияния технологических параметров на качественные характеристики заготовки при горизонтальном непрерывном литье в закрытый кристаллизатор посвящён ряд работ [1,2]. Однако большинство выводов в этих работах получены при исследованиях в однофакторном эксперименте, когда изменяется лишь один параметр, а остальные поддерживаются на постоянном значении или изменяются в процессе литья по произвольному закону. Как следствие, в таких исследованиях отсутствует информация об эффектах взаимодействия выбранных факторов, которые в условиях сложных металлургических процессов часто оказываются весьма значимыми.

В качестве основного критерия, оказывающего влияния на формирования заготовки, её качественных характеристик, необходимо рассматривать термодинамику процесса в закрытом горизонтальном кристаллизаторе.

Активный многофакторный эксперимент [3] по исследованию указанной проблемы на установках горизонтального непрерывного литья (УГНЛ) предусматривает одновременное варьирование всех значимых параметров, что позволяет построить математическую модель процесса [4,5].

Задачей исследований являлось определение такого режима литья в закрытый горизонтальный кристаллизатор, при котором достигалась бы максимальная для данной конструкции УГНЛ производительность литья при условии получения максимального значения качественных параметров заготовок из бронз марки ОЦС, но не ниже установленных ГОСТом или (ТУ)[6].

Основная часть исследований. Качество круглых заготовок исследовано при литье на УГНЛ бронз марки ОЦС5-5-5 и ОЦС3-12-5, для чего с использованием планируемого многофакторного эксперимента на промышленной установке определялись механические свойства (σ_B, δ, HB) и чистота поверхности (S). Существенное влияние на процесс литья оказывает также температура поверхности заготовки θ_{Π} на выходе из кристаллизатора, которая является технологической характеристикой определяющей стабильность процесса [5].

В связи с тем, что качественные характеристики заготовки являются функцией теплотехнических параметров (режима охлаждения, скорости вытягивания и т.д.). С целью определения значимости параметров вначале был поставлен предварительный двухуровневый пятифакторный эксперимент (2^{5-1}), включающий 16 опытов.

Значения функций отклика для данной конструкции узла кристаллизатора УГНЛ определяются технологическим режимом, параметры которого взяты в качестве факторов эксперимента: температура жидкого металла $\theta_{ж}$ (X_5), расход охладителя Q (X_4) на кристаллизатор, шаг вытягивания заготовки Z (X_1), частота цикличности f , отношение времени остановки к времени вытягивания заготовки в цикле τ_o/τ_b (X_3) и производительность Π (X_2).

Обработка результатов предварительного эксперимента дала следующие уравнения регрессии в абсолютных величинах влияния технологических параметров на температуру поверхности $\Theta_{п}$ заготовки на выходе из кристаллизатора (уравнение 1) и на перепад температуры охладителя $\Delta\Theta$ в кристаллизаторе (уравнение 2).

$$\Theta_{п} = - 400 + 0,493Z + 20,52\Pi + 0,644 \Theta_{ж} \quad (1)$$

$$\Delta\Theta = 15,44 + 0,25Z + 0,95\Pi + 0,0015\Pi\Theta_{ж} - 0,016\Pi Z \quad (2)$$

Обе модели адекватны, т.к. для $\Theta_{п}$ критерий Фишера равен $F=1$ при табличном значении на 95% значимости $F_T=4,7$ ($f_1=11$, $f_2=5$ степеней свободы); для $\Delta\Theta$ критерий $F=1,5$ при $F_T=4,74$ ($f_1=10$, $f_2=5$ степеней свободы).

Наличие факторов взаимодействий в уравнениях регрессии (уравнения 1,2) вспомогательного эксперимента показывает, что исследование вектора качества наиболее целесообразно вести по плану второго порядка. Кроме того, модель: технологические параметры – вектор качества первого порядка не адекватна.

Поэтому в качестве функций отклика \bar{Y} взяты производительность установки, параметры качества заготовки и температура её поверхности $\bar{Y} = (\Pi, \sigma_B, HB, \delta, S, \theta_{п})$. На основании вспомогательного эксперимента проведен главный эксперимент второго порядка.

Для исследования механических свойств и макроструктуры заготовки в начале, середине и конце каждого режима отрезали образцы длиной 150мм и разрежали их на продольные (рис.1а,Л,П) и поперечные(рис.1б,) темплеты. Из центральной отрезанной части вырезали образцы (рис.1а,В,С,Н) для механических испытаний, а на поперечной части определяли твёрдость в шести точках (рис.1б).

Изучение макроструктуры литой заготовки показало, что для заготовок, отлитых на УГНЛ, характерны три основные зоны: нижняя 1, верхняя 3 и зона теплового центра 2, поэтому в них и определяли механические свойства. Качество поверхности S выражалось в условных единицах (рангах): 1 ранг — удовлетворяет требованиям ТУ 48-26-13-72; 2 ранг — не удовлетворяет.

Для различных диаметров заготовок, отливаемых на УГНЛ, проведены серии опытов по центральному композиционному ротатабельному плану второго порядка для $K=5$, позволяющее получить симметричные информационные контуры. Ротатабельный план является оптимальным и в более широком смысле, т.к. минимизирует систематические ошибки, связанные с неадекватностью представления результатов исследования полиномами второго порядка, если информация в интервале $0 \leq \rho \leq 1$ (где ρ - расстояние до точек «гиперкуба») остаётся постоянным и имеет ротатабельное униформпланирование. Построение такого плана заключалось в правильном выборе точек: n_c - «куба», n_a - «звёздных» и n_0 - центральных. Величина звёздного плеча α определена из условия $\alpha = 2^{K/4}$. В нашем случае $K=5$ вместо полного факторного эксперимента тела (гиперкуба) была использована полуреплика 2^{5-1} с определяющим контрастом $1=X_1X_2X_3X_4X_5$. Количество точек и

величина плеча соответственно равны: $n_c = 16$, $n_\alpha = 10$, $n_0 = 6$ при $\alpha = 2^{(5-1)/4} = 2$. Значения функций откликов усреднялись по трём параллельным опытам [6]. Оценка адекватности модели проводилась с помощью критерия Фишера. Дисперсию опыта определяли по результатам повторения каждого эксперимента и результатам опытов на нулевом уровне.

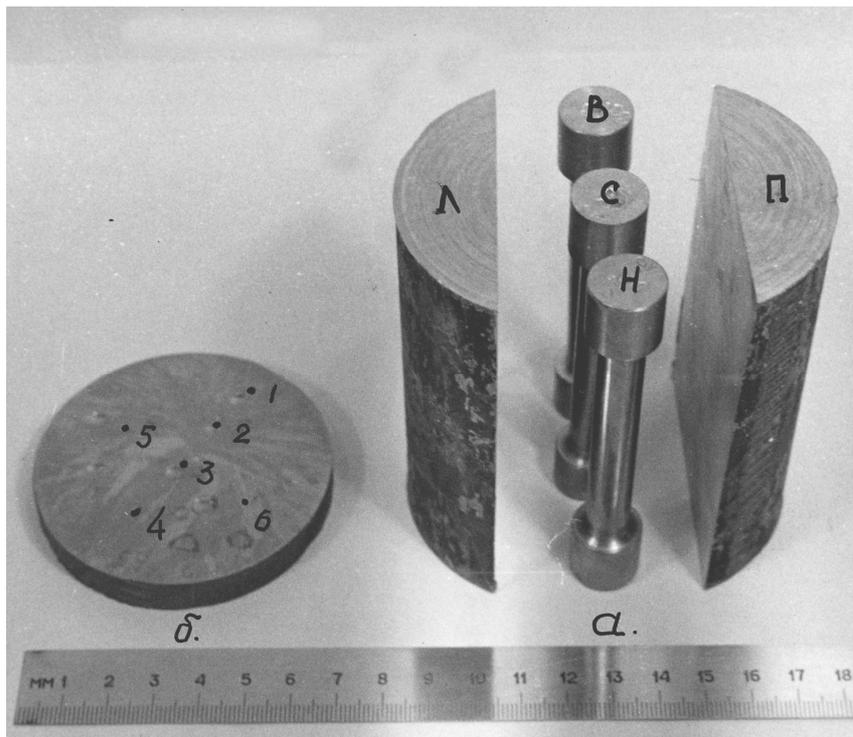


Рис.1. Разрезание заготовки для испытания механические свойства, макро- и микроструктуру

1?6 – точки определения твёрдости по Бринеллю; Л, П - левая и правая часть продольного реза, соответствен; В, С, Н – верхний, средний и нижний образец, соответственно для определения σ_B и $\delta\%$.

В табл.1 приведены абсолютные значения факторов в центре планирования $X_i^{(0)}$, шаг варьирования ΔX_i , верхний $X_i^{(+)}$ и нижний $X_i^{(-)}$ уровни варьирования факторов, величина плеча для звёздных точек.

Таблица 1. Значение уровней факторов

Факторы	Значения уровней факторов				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
$X_i^{(0)}$	30	5,0	1,8	4,0	1050
ΔX_i	10	1,0	0,5	1,0	30
$X_i^{(+)}$	40	6,0	2,3	5,0	1080
$X_i^{(-)}$	20	4,0	1,3	3,0	1020
α	20	2,0	1,0	2,0	60

По результатам опытов проведен расчёт коэффициентов уравнений регрессий (табл.2) по формуле (3):

$$Y_i = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i X_i^* + \sum_{i>j=1}^5 b_{ij} X_i^* X_j^* + \sum_{i=1}^5 b_{ii} X_i^{*2} \quad (3)$$

где X_i^* - кодированное значение i - того фактора

Таблица 2. Коэффициенты уравнений регрессий (диаметр заготовки 100мм)

Выход- ные факторы	Функции отклика ^{*)}									
	$HВ^{(1)}$	$HВ^{(1)}$	$HВ^{(1)}$	$\sigma_B^{(1)}$	$\sigma_B^{(2)}$	$\sigma_B^{(3)}$	$\delta^{(1)}$	$\delta^{(2)}$	$\delta^{(3)}$	θ_{II}
X_0	69,09	71,95	67,23	28,68	26,41	27,6 2	30,65	42,59	40,47	615,0
X_1	-	-	-0,40	-	0,13	-	-	-	-	11,0
X_2	-0,96	2,07	-0,83	-	-0,34	-	-2,30	-	-	35,3
X_5	-	-	-0,90	0,39	-	0,25	-	4,27	0,94	53
X_1	-	-	-0,70	0,10	-	-	1,60	0,90	-	19,4
$X_1 X_2$	0,73	-	-	-0,29	-	-	-1,36	-0,91	0,79	-
$X_1 X_5$	-	1,11	-	-0,21	0,12	- 0,25	1,45	1,14	-1,61	-
X_2	0,51	-0,71	-	-0,11	-	-	1,33	-	-0,68	-
$X_2 X_5$	0,48	-	-	-0,14	0,20	0,25	-	-	-	-31,4
X_5	-	-	-	-0,08	-	-	1,08	-	-	12,8
$F_{расч.}$	1,80	1,07	1,54	1,32	1,33	1,41	1,44	1,37	1,38	1,43

^{*)} $HВ$ и σ_B - кгс/мм²; δ - %.

Воспроизводимость опытов проверена по критерию Кохрена. Математические модели для всех функций отклика Y_i согласно F-критерия оказались адекватными при 5%-ном уровне значимости. Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента показала, что влияние расхода охладителя Q , соотношения времен (τ_o/τ_B), их степеней и взаимодействия с другими факторами на функции отклика незначимо.

Полученные уравнения регрессии позволили выразить скорость кристаллизации, следовательно, и качественные характеристики заготовки через технологические параметры: температуру жидкого металла, скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, шаг вытягивания [5,7].

Анализ полученных зависимостей показал, что повышение температуры жидкого металла в печи-миксере ведёт к увеличению предела прочности σ_B (рис.2, а). Твёрдость в верхней зоне растёт, в нижней наблюдается монотонное падение, то же при увеличении производительности УГНЛ (рис.2,б).

Макроструктура заготовки при низкой температуре заливаемого металла ($\theta_{ж} \approx 1000^\circ\text{C}$) близка к равноосной (рис.3,в). С увеличением температуры $\theta_{ж}$ структура нижней зоны становится столбчатой с ориентацией дендритов вдоль осей максимального теплового потока. Верхняя зона характеризуется значительно меньшей, чем нижняя, величиной зерна. С повышением температуры жидкого металла $\theta_{ж}$ увеличивается эксцентриситет теплового центра относительно геометрического, уменьшается протяженность верхней зоны по сравнению с нижней (рис. 3, б).

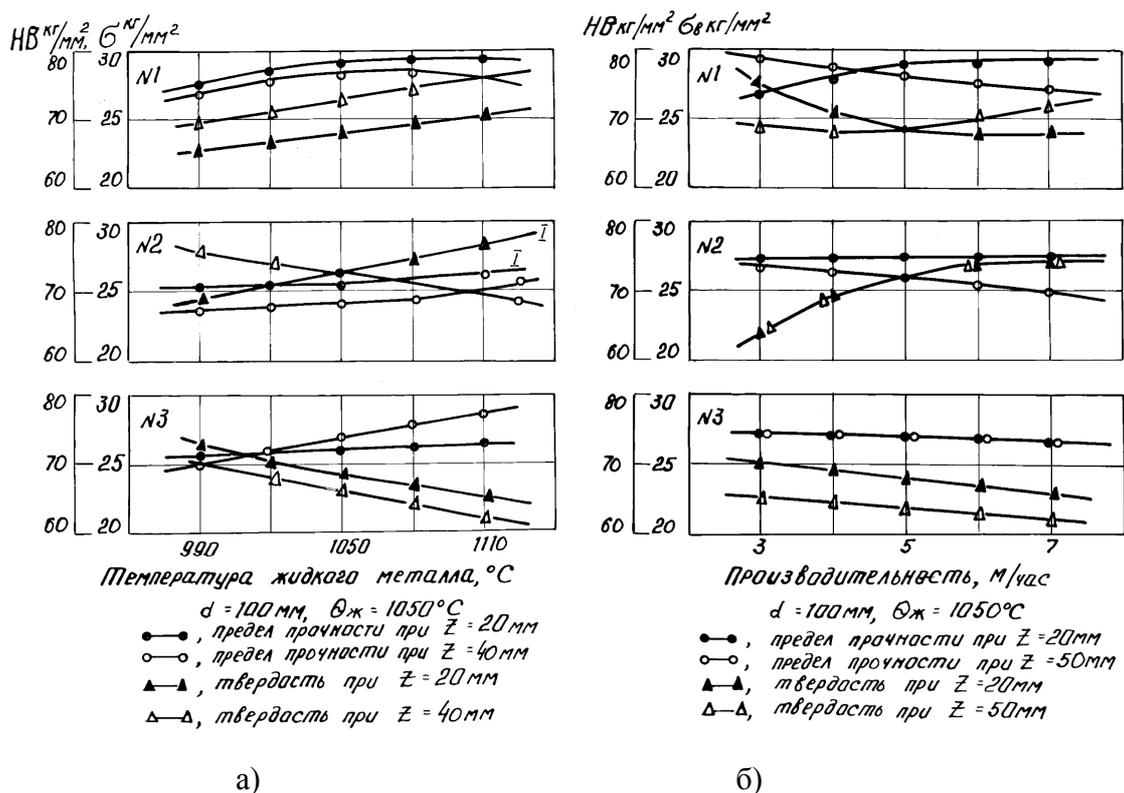


Рис.2. Влияние температуры жидкого металла а) и производительности б) УГНЛ на механические свойства заготовки HV, σ_B

На основании полученной математической модели были определены оптимальные значения параметров режимов литья.

Так, для литья заготовки диаметром 100мм режим следующий: $\theta_{ж} = 1050^\circ\text{C}$, $Z=22?25\text{мм}$ при $\Pi=7,3?7,5\text{м/час}$ (качественные характеристики заготовки удовлетворяют требованиям ТУ 48-26-13-72: $\sigma_B \geq 20 \text{ кгс/мм}^2$, $\delta \geq 20\%$, $HV \geq 65 \text{ кгс/мм}^2$, $S \geq 2$ ранг).

Однако для значения температуры поверхности заготовки существует технологическое ограничение $\theta_{\Pi} \leq \theta_{\Pi}^*$, где θ_{Π}^* - максимально допустимое значение, при котором процесс устойчив. Для литья бронз марки ОЦС экспериментально найдена величина $\theta_{\Pi}^* = 690 ? 700^\circ\text{C}$.

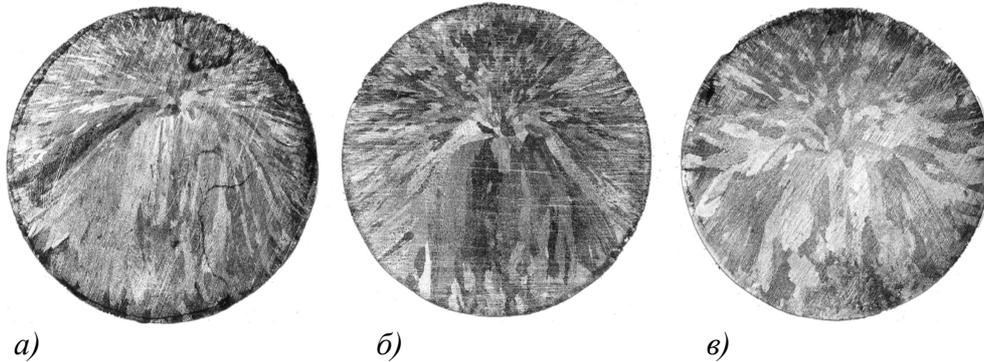


Рис.3. Влияние температуры металла $\theta_{ж}$ на структурную асимметрию заготовки, диаметр 70мм (?0,7)
 а) $\theta_{ж} = 1120^{\circ}\text{C}$; б) $\theta_{ж} = 1100^{\circ}\text{C}$; в) $\theta_{ж} = 1050^{\circ}\text{C}$.

Литьё на оптимальном технологическом режиме позволило при максимальной производительности УГНЛ улучшить качественные характеристики по сечению и длине заготовки из бронз ОЦ5-5-5 и ОЦ3-12-5, а также устранить колебания механических свойств как по длине заготовки, так и от партии к партии. Макроструктура слитка диаметром 100мм, отлитого на оптимальном технологическом режиме, представлена на рис.4.



Рис.4. Макроструктура слитка БрО5Ц12С5 при оптимальном режиме (?1)
 $\theta_{ж} = 1050^{\circ}\text{C}$; $Z=22?25\text{мм}$; $\Pi=7,3?7,5\text{м/час}$; $\sigma_B = 24\text{кгс/мм}^2$; $\delta = 23\%$; $HV = 70\text{ кгс/мм}^2$; $S = 2\text{ ранг}$.

Заключение. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что существенное влияние на процессы оказывают следующие технологические параметры:

- температура жидкого металла на входе в кристаллизатор;
- шаг вытягивания;
- время цикла вытягивания;
- отношения времени остановки к времени вытягивания.

Регрессионным анализом определены области существования качественных характеристик в функции технологических параметров. Определены оптимальные режимы литья:

- при литье заготовок малых диаметров (≤ 50 мм)
 $Z=20$ мм, $\theta_{ж} = 1050^{\circ}\text{C}$, $\theta_{п} = 690 \pm 10^{\circ}\text{C}$;
- при литье заготовок больших диаметров (≥ 60 мм)
 $Z=25$ мм, $\theta_{ж} = 1040^{\circ}\text{C}$, $\theta_{п} = 660 \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Список литературы: 1.Бахтиаров Р.А., Воробьёв Л.А. Производство слитков тяжёлых цветных металлов методами полунепрерывного и непрерывного литья. М.: «Цветметинформация», 1984, с.97. 2.Сладкоштеев В.Т., Шатагин О.А. Непрерывная разливка металлов. Киев, УкрНИИТИ, 1962, с.58. 3.Бредихин В.Н., Кушнерова Е.Ю. Исследования тепловых потоков в горизонтальном кристаллизаторе при литье медных сплавов, Запорожье, труды ЗГИА, В.11, 2005, с. 89-95. 4. Бредихин В.Н., Маняк Р.А., Кафтоненко А.Я. Медь вторичная: Монография. Донецк, ДонНТУ, 2006, 416 с. 5. Бредихин В.Н., Кожанов В.А., Беленький А.В., Кушнерова Е.Ю. Управление качеством серебряных сплавов на установке вертикального непрерывного литья. Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. трудов XII международной конференции Т1, Донецк-2006. 6. Налимов В.В. Теория эксперимента. М., Наука, 1971, 207 с. 7. Чалмерс Б. Теория затвердевания. М., «Металлургия», 1969, 228 с.

Сдано в редакцию 30.01.07

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КРУГОВОГО ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

Волошин А.И., Лесняк Г.А., Стрельников В.Н. (ЗАО НКМЗ, г. Краматорск, Украина)

Bases of optimization of geometrical parameters of circular gear gearing with intermediate rollers by criteria of minimally allowable difference of radiuses of curvature of the connected surfaces and a condition of absence of an interference of tooth are developed.

Производство зубчатых колес, редукторов и трансмиссий относится к наиболее сложной и ответственной области машиностроения, в значительной мере определяющей технику – экономический уровень и конкурентные свойства выпускаемой продукции. Практика современного производства и эксплуатации редукторов в тяжелом машиностроении определила комплекс задач производственного и научно – технического характера, связанных с повышением их нагрузочной способности, кинематической эффективности и надежности, снижением габаритов, металлоемкости, производственных затрат и себестоимости. Наряду с этим повысились требования со стороны потребителей к снижению шума, вибрации и энергетическим потерям.

Традиционные конструктивные схемы зубчатых и червячных редукторов во многом исчерпали свои функциональные возможности и сколько – нибудь реальное повышение их технических параметров сопряжено с дополнительными производственными издержками, как правило, не соизмеримыми с получаемым техническим эффектом. Поэтому ведущие производители зубчатых колес и редукторов вкладывают значительные средства в совершенствование и разработку новых конструкций с более высокими техническими характеристиками.