УДК 621.74.047: 620.172.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ПОЛЫХ БРОНЗОВЫХ ЗАГОТОВОК

О.Н. Хорошилов, проф., д.т.н.,
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

Аннотация. *Проведены исследования влияния формы поверхности консольной части дорна на усилия в контакте: «полая заготовка – графитовый дорн» при сопоставимости исследуемых усилий с предельно допустимой прочностью материала дорна. Определены параметры непрерывного литья, которые обеспечивают стабильность процесса.*

Ключевые слова: *непрерывное литье, дорн, срезы, полые заготовки из медных сплавов.*

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ПОРОЖНИСТИХ БРОНЗОВИХ ЗАГОТІВОК

О.М. Хорошилов, проф., д.т.н.,
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

Анотація. *Проведені дослідження впливу форми поверхні консольної частини дорна на зусилля у контакті: «порожниста заготовка з мідних сплавів – графітовий дорн» під час порівняння зусиль, що досліджуються з гранично допустимою міцністю матеріалу дорна. Визначені параметри лиття, що забеспечують стабільність процесу.*

Ключові слова: *безперервне лиття, дорн, зрізи, порожнисті заготовки з мідних сплавів.*

QUALITY PROVISION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS CONTINUOUS CASTING BRONZE HOLLOW BLANKS

O. Khoroshilov, Prof., D. Sc. (Eng.),
Ukrainian Engineer-Pedagogical Academy, Kharkov

Abstract. *Investigations of the influence of technological parameters of the continuous casting process and the geometric characteristics of the dorn and blanks on the force of static friction during its cyclic movement are carried out. The parameters of the process of continuous casting, which ensure the stability of the machine by changing the surface of the dorn are identified.*

Key words: *overcoming the force of static friction, the stability of the process continuous casting, dorn.*

Введение

Одной из актуальных проблем предприятий машиностроительного комплекса является обеспечение качества процесса непрерывного литья при производстве полых бронзовых заготовок. Под качеством процесса непрерывного литья будем понимать стабильность изготовления полых заготовок.

Практика эксплуатации машин непрерывного литья полых бронзовых заготовок показала, что на качество (стабильность) процесса непрерывного литья влияет толщина стенок отливаемой заготовки, а при использовании дорна со срезами – отношение величины шага к длине среза.

Причем, величиной отношения шага к длине среза можно регулировать площадь контакта между поверхностями консольной части дорна и заготовки, а также усилие взаимодействия в контакте «дорн–заготовка».

В литературных источниках нет сведений о комплексном влиянии на качество процесса непрерывного литья полых бронзовых заготовок геометрических характеристик полых заготовок и срезов дорна, а также величины шага.

Анализ публикаций

В работе [1] на основе статико-геометрических характеристик в контакте «дорн-заготовка» получены формулы для определения напряжений, возникающих между контактируемыми поверхностями дорна без срезов и полой заготовки.

В работе [2] показано влияние геометрических характеристик дорна и срезов на его поверхности (диаметр дорна (R_2), длины срезов l), а также технологических параметров процесса непрерывного литья (величина шага, L) на площадь контакта «дорн со срезами–заготовка».

В работах [3, 4] представлены конструкции дорнов для литья полых заготовок на машинах горизонтального и вертикального непрерывного литья.

В работе [5] получено выражение для определения относительного уменьшения площади контакта заготовки с дорном со срезами.

В работе [6] представлены механические характеристики материала МГ1, из которого изготавливают дорны для процесса непрерывного литья полых заготовок.

В литературе не найдены зависимости влияния на усилие взаимодействия в контакте «дорн–заготовка» от нескольких переменных, например, от отношения величин наружного и внутреннего радиусов заготовки (R_1/R_2) и отношения величины шага к длине дорна (L/l).

Цель и постановка задачи

Целью работы является аналитические и экспериментальные исследования процесса непрерывного литья полых заготовок с использованием графитового дорна со срезами. Результатами исследований будут интервалы изменения R_1/R_2 и L/l и L для обеспечения качества процесса непрерывного литья полых заготовок при условии использования дорна из графита марки МГ1.

Исследования проводили для полых заготовок из бронзы марок Бр О5Ц5С5 диаметрами 100/80, 110/80, 120/80 при использовании дорна со срезами длиной $l = 0{,}04$ м.

Результаты исследований

При применении графитового дорна во время непрерывного литья полых заготовок для обеспечения качества (стабильности) процесса непрерывного литья является выполнение условия

$$P^{Д-З} \le n\,[P_{пр}], \qquad (1)$$

где $P^{Д-З}$ – усилие преодоления силы трения покоя (СТП) в контакте «дорн–заготовка», МПа; n – коэффициент запаса, $P_{пр}$ – предельно допустимое напряжение материала дорна (графит марки МГ1).

Для выполнения условия (1) целесообразно использовать следующие способы регулирования усилия – $P^{Д-З}$ по преодолению СТП. Во-первых, в процессе непрерывного литья с целью снижения усилия $P^{Д-З}$ можно уменьшать величину шага (L). Во-вторых, при автоматизированном процессе непрерывного литья для предотвращения рисков форс-мажорных обстоятельств необходимо на этапе конструирования изготавливать дорн со срезами [2].

Изготовление полых заготовок из медных сплавов может применяться как на машинах вертикального, так и горизонтального типа. Для горизонтального непрерывного литья применяется дорн более сложной конструкции, так как вследствие конвективного расслоения расплава срезы имеют различную длину, а вершины срезов располагаются на параболической кривой изотермы фронта затвердевания [3].

Для упрощения расчетов будем рассматривать дорн со срезами, установленый на машине вертикального непрерывного литья [4] (рис. 1).

Дорн состоит из посадочного места 1, каналов для прохождения расплава 2, консольной части дорна 3, на поверхности которой выполнены срезы 4.

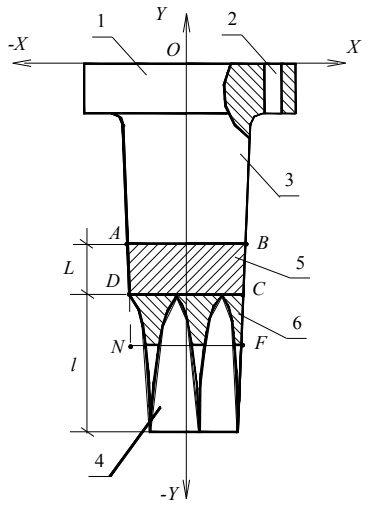

Рис. 1. Дорн со срезами для литья полых заготовок на машине вертикального непрерывного литья

Формирования полой заготовки происходит на кольцевом участке 5 дорна, проекция которого на рис. 1 представлена четырехугольником ABCD. Циклическое движение заготовки обуславливает продвижение заготовки со сформированной внутренней поверхностью с участка 5 на участок 6, имеющий меньшую площадь контакта. Определим соотношение площадей участков 5 и 6 при различных соотношениях *L/l*.

В общем виде усилие $P^{Д\text{-}З}$ преодоления СТП можно определить

$$\sigma^{Д-З} \cdot Sk \cdot k = P^{Д-З}, \qquad (2)$$

где $\sigma^{Д-З} = -\alpha \Delta T E[1-(R_1/R_2)^2/[(1-\nu)+(R_1/R_2)^2(1+\nu)]$ – напряжение в контакте «дорн–заготовка», МПа; α – коэффициент усадки, 1/град; *E* – модуль упругости, МПа; Δ*T* – температурный интервал, °С; R_1, R_2 – наружный и внутренний радиус заготовки, м; *ν* – коэффициент Пуассона, $S_к$ – площадь контакта, м^2, *k* – коэффициент трения в паре бронза-графит.

Из (2) следует, что изменить усилие $P^{Д\text{-}З}$ мы можем за счет регулирования площади контакта $S_к$ (за счет величины шага *L,* отношения шага к длине срезов *L/l* на дорне) и отношением наружного и внутреннего радиусов заготовки R_1/R_2.

Определим относительное уменьшение площади контакта при непрерывном литье заготовки размером 100/80 с использованием дорна со срезами. При этом длина среза будет иметь постоянную величину *l* = const, а величина шага будет изменяться в интервале

$$0,01 < L < 0,05 \text{ м}. \qquad (3)$$

Площадь контакта кольцевого участка 5 на дорне без срезов определим по уравнению

$$Sk = 2 \cdot \pi R_2 L, \qquad (4)$$

где *L* – величина шага, м;

Преобразуем уравнение, представленное в [5], для определения относительного уменьшения площади контакта при сравнении кольцевых участков 5 и 6

$$S_6 / S_5 = (1 - 2/3\sqrt{L/l}), \qquad (5)$$

где S_5, S_6 – площади контакта «дорн–заготовка» на кольцевых участках 5 и 6 (рис. 1).

Таблица 1 Определение соотношений S_6/S_5 для различных соотношений *L/l*

L, м	*l*, м	*L/l*	S_6/S_5
0,01	0,05	0,20	0,702
0,03	0,05	0,60	0,484
0,05	0,05	1,000	0,334

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что при условии (3) и *l* = const отношение S_6/S_5 уменьшается от величины 0,702 до 0,333. Из приведенных данных следует, что рост отношения *L/l* снижает значение усилия $P^{Д\text{-}З}$.

Таким образом, применение дорна со срезами позволяет на стадии его конструирования закладывать необходимые: отношение S_6/S_5, площадь *Sk* и усилие $P^{Д\text{-}З}$, а увеличение отношения *L/l* играет положительную роль в стабилизации процесса непрерывного литья полых заготовок из медных сплавов.

Определим влияние отношения R_1/R_2 на $\sigma^{Д\text{-}З}$ и на $P^{Д\text{-}З}$. Для конкретного сплава величины α, Δ*T, E* и *ν* имеют постоянные значения, поэтому, в данном случае, величину $\sigma^{Д\text{-}З}$ будем рассматривать как функцию: $\sigma^{Д\text{-}З} = f(R_1/R_2)$.

В табл. 2 представлены значения напряжений $\sigma^{Д\text{-}З}$ в контакте «дорн–заготовка» при изменении отношения R_1/R_2 от 1,25 до 1,5.

Таблица 2 Определение значений напряжений $\sigma^{Д-З}$ при различных соотношениях R_1/R_2

R_1, м	R_2, м	R_1/R_2	$\sigma^{Д-З}$
0,050	0,04	1,250	0,240
0,055	0,04	1,375	0,267
0,060	0,04	1,500	0,322

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что увеличение отношения R_1/R_2 способствует росту напряжения $\sigma^{Д-З}$, что, в конечном счете, увеличит и усилие $P^{Д-З}$.

На основании данных, представленных в табл. 1 и 2, построим зависимости влияния отношений L/l и R_1/R_2 и L на усилие $P^{Д-З}$.

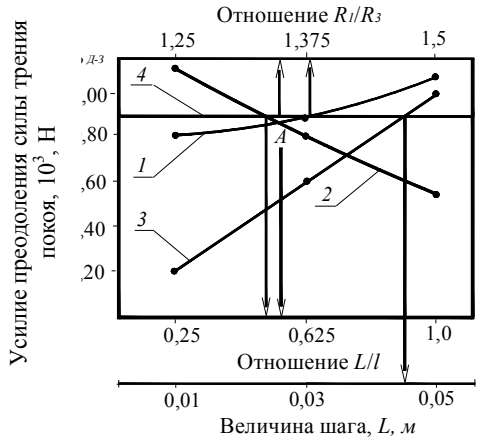

Рис. 3. Зависимости влияния отношений L/l и R_1/R_2 и L на усилие $P^{Д-З}$: 1 –при изменении соотношения R_1/R_2; 2 –при изменении L/l; 3 – при изменении шага L; 4 – предельно допустимое напряжение материала МГ1, МПа

Определим значения отношений L/l и R_1/R_2, и величины шага L, которые будут соответствовать предельно допустимому значению прочности материала дорна на разрыв. Так, пересечение кривых 2 и 4 позволило определить, что для обеспечения качества (стабильности) процесса непрерывного литья отношение L/l должно находиться в интервале:

$$0,51 < L / l < 1,0 \text{ м}. \qquad (6)$$

Пересечение линий 1 и 4 свидетельствует о том, что для обеспечения стабильности процесса литья отношение R_1/R_2 должно быть в интервале от 1,25 до 1,39.

Пересечение кривых 1 и 2 в точке A при значениях R_1/R_2 = 1,35 и L/l = 0,55 свидетельствует о равновесии усилий в контакте «дорн–заготовка», вызывающих действием, с одной стороны, отношением R_1/R_2, с другой стороны, отношением L/l.

На основании пересечения кривых 3 и 4 определили допустимый интервал изменения шага L, (рис. 3)

$$0,01 < L < 0,045 \text{ м}. \qquad (7)$$

Рассмотрим еще один аспект влияния величины шага на качество (стабильность) процесса непрерывного литья. Необоснованное увеличение шага может привести к нарушению стабильности процесса непрерывного литья полых заготовок не только за счет разрушения дорна, но и по причине выхода жидкой фазы во внутреннюю полость заготовки, поскольку длина дорна всегда меньше длины кристаллизатора, (рис. 4).

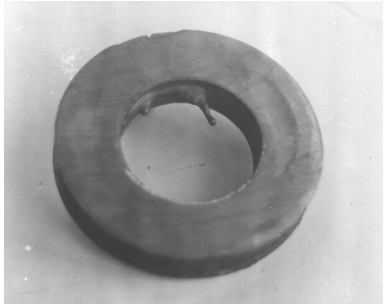

Рис. 4. Выход фронта затвердевания на внутренней поверхности заготовки за пределы дорна

Контроль над положением фронта затвердевания относительно торца консольной части дорна осложняется тем, что представленные на рис. 4 признаки выхода жидкой фазы за пределы дорна не видны оператору.

Таким образом, в данной работе качество (стабильность) процесса непрерывного литья обеспечивалось сочетанием технологических параметров процесса непрерывного литья и конструктивных особенностей дорна, что позволило достичь цели, т.е. изготавливать полые заготовки без вынужденных остановок.

Выводы

Произведено сравнительное влияние отношения L/l и R_1/R_2 на усилие $P^{Д-З}$ преодоления СТП, на основании чего показано, что увеличение отношения L/l способствует снижению

усилия $P^{Д-3}$, а рост отношения R_1/R_2 приводит к увеличению усилия $P^{Д-3}$.

Определены интервалы изменения отношений L/l, R_1/R_2 и L, что обеспечило качество процесса непрерывного литья полых бронзовых заготовок.

Литература

1. Хорошилов О.Н. Методика определения внутренних напряжений в охлаждающихся полых непрерывнолитых заготовках из цветных сплавов / О.Н. Хорошилов // Процессы литья. – 2005. – №3. – С. 37–42.
2. Хорошилов О.Н. Повышение качества внутренней поверхности полой непрерывнолитой заготовки / О.Н. Хорошилов, О.И. Пономаренко // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 33. – С. 23–25.
3. Патент на корисну модель № 16997 Україна, МПК (2006) B 22D 11/04. Дорн для горизонтального безперервного лиття порожнистих заготовок з кольорових металів та сплавів / О.М. Хорошилов; заявник та патентовласник Хорошилов О.М. – № 200600375; заявл. 16.01.2006; опубл. 15.09.2006. Бюл. № 9.
4. Патент на корисну модель № 12732 Україна, МПК (2006) B 22D 11/04. Дорн для безперервного лиття порожнистих заготовок з кольорових сплавів / О.М. Хорошилов, С.Г. Сизонова; заявник та патентовласник Хорошилов О.М. – № 200509089; заявл. 26.09.2005; опубл. 15.02.2006. Бюл. №2.
5. Хорошилов О.М. Процес горизонтального безперервного лиття мідних сплавів з вимушеним короткотерміновим реверсивним рухом заготовок підвищенної якості в нерухомому кристалізаторі: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук: 05.16.04 «Ливарне виробництво» / О.М. Хорошилов. – Дніпропетровськ, 2013. – 32 с.
6. Колотило Д.М. Углеродные литейные формы / Д.М. Колотило, Л.Д. Челядинов. – К.: Наукова думка, 1971. – 164 с.

References

1. Khoroshylov O. *Metodika opredelenyja vnutrenikh naprjadzenij v ohlazhdajushchihsja polykh nepreryvnolitukh zagotovkakh iz tsvetnykh splavov* [Methods of determining the internal stresses in cooling hollow continuous casting of non-ferrous alloys]. *Protsesy lityja* [Casting Processes]. 2005, no. 3, pp. 37–42.
2. Khoroshylov O. & Ponomarenko O. *Povushenie kachestva vnutrenej poverhnosti poloj nepreryvnolitoj zagotovki* [Improving the quality of the inner surface of the hollow continuous casting]. *Vestnik KHNADU, zbornik nauchnykh trudov,* 2006, Vol. 33, pp. 23–25.
3. Khoroshylov O. *Dorn dlja gorizontalnogo bezperervnogo lytja porozhnystukh zagotovok z koljorovyh metaliv ta splaviv* [Dorn horizontal continuous casting of hollow billets nonferrous metals and alloys]. Patent UA, no. 200600375, 2006.
4. Khoroshylov O. *Dorn dlja bezperervnogo lytja porozh-nystukh zagotovok z koljorovyh splaviv* [Dorn for continuous casting of hollow pieces of nonferrous alloys]. Patent UA, no. 200509089, 2006.
5. Khoroshylov O. *Protses gorizontalnogo bezperevnogo lityja midnykh splaviv z vymushenym korotkoterminovym reversijnym rukhon zagotovok pidvystchenoi jakosti v nerukhomomy kristalizatori* [The process of horizontal continuous casting of copper alloy with a forced short term reverse movement blanks improve the quality stationary mold]. Avtoref. dis. d-r tekhn. nayk: spets. 05.16.04 «Lyvarne vyrobnytstvo» [Foundry]. Dnepropetrovsk. 2013. p. 32.
6. Kolotilo D. & Cheljadinov L. *Uglerodnyje litejnyje formy* [Carbon casting molds]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971. 164 p.

Рецензент: В.И. Мощенок, профессор, к.т.н. ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2016 г.