



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-48-52>  
УДК 621.74.047

Поступила 05.07.2022  
Received 05.07.2022

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

*Е. Б. ДЕМЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: edemchenko@bntu.by*  
*Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: maruko46@mail.ru*

*Показано, что при разработке технологии непрерывного литья необходимо решить ряд задач, связанных с поиском оптимального варианта технологии, созданием специального оборудования для расширения номенклатуры отливаемых заготовок и с расчетом оптимальных параметров. Выбор способа непрерывного литья и типа установки определяется профилем, размерами и материалом заготовок. Для выбранного типа установки разрабатываются конструкции важнейших узлов и механизмов. Для выбранного конструктивного решения на основе накопленного опыта и имеющихся исследований рассчитываются оптимальные тепловые и технологические параметры литья.*

**Ключевые слова.** Полунепрерывное литье, отливка, затвердевание, толщина корки, прочность, стабильность, технологические параметры, проектирование технологии.

**Для цитирования.** Демченко, Е. Б. Основные принципы разработки технологии непрерывного литья машиностроительных заготовок / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 48–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-48-52>.

## BASIC PRINCIPLES OF THE CONTINUOUS CASTING TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR MACHINE-BUILDING BLANKS

*E. B. DEMCHENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: edemchenko@bntu.by*  
*E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: maruko46@mail.ru*

*It is shown that during developing continuous casting technology, it is necessary to solve a number of tasks related to finding the optimal technology option, creating special equipment to expand the range of cast blanks and calculating optimal parameters. The profile, dimensions and material of the blanks determine the continuous casting method choice and the installation type. Designs of the most important components and mechanisms are being developed for the selected type of installation. For the selected design solution, based on the lesson learned and available research, optimal thermal and technological parameters of casting are calculated.*

**Keywords.** Semi-continuous molding, casting, solidification, crust thickness, strength, stability, technological parameters, technology design.

**For citation.** Demchenko E.B., Marukovich E.I. Basic principles of the continuous casting technology development for machine-building blanks. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 48–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-48-52>.

При разработке технологии непрерывного литья необходимо решить целый ряд задач, связанных с поиском оптимального варианта технологии, координированием возможностей производства и производительностью процесса, разработкой узлов и механизмов, выполняющих заданные функции, созданием специального оборудования для возможного расширения номенклатуры заготовок, расчетом оптимальных параметров литья [1].

Во-первых, для получения заготовок заданного профиля, размеров и материала необходимо выбрать способ непрерывного литья и тип установки, которая позволит обеспечить нужную производительность и высокое качество изделий. Решение этой задачи определяет организацию процесса литья и требуемое количество установок или линий в общей производственной схеме литейного предприятия.

Во-вторых, для выбранного типа установки необходимо найти наиболее подходящее конструктивное решение важнейших узлов и механизмов (заливочное устройство, кристаллизатор, затравочное устройство, привод, механизм подъема заготовок, устройство разделения заготовок и др.).

Решение этих двух задач даст необходимое представление о компоновке всего комплекса оборудования в структуре производства.

В-третьих, для выбранного конструктивного решения установки на основе накопленного опыта и имеющихся исследований рассчитываются оптимальные тепловые и технологические параметры литья. Это скорость и режим вытяжки отливки, температура заливаемого расплава и режим охлаждения кристаллизатора, согласованные с режимом вытяжки параметры движения узлов и механизмов установки, режим вторичного охлаждения и др.

Следует отметить, что под оптимальными параметрами в этих случаях понимаются такие параметры, сочетания которых обеспечивают стабильность процесса литья, т.е. это наиболее благоприятные, рациональные, целесообразные и в тоже время не всегда максимальные параметры. В качестве примера, иллюстрирующего это определение, можно привести результаты, полученные при исследовании теплообмена в кристаллизаторе при вертикальном литье с открытым уровнем [2]. Здесь интервалы параметров литья (имеем ввиду максимум и минимум), которые гарантируют стабильность процесса, имеют следующие значения:  $w_{cp} = (0,36-0,65)$  м/мин,  $T_{зал} = (1280-1340)$  °С,  $w_B = (1,1-3,6)$  м/с. Но оптимальными будут являться только такие параметры:  $w_{cp} = 0,56$  м/мин,  $T_{зал} = 1320$  °С,  $w_B = 3,0$  м/с. Именно эти параметры исходя из расчетов и опытно-промышленного опробования смогут обеспечить оптимальное сочетание качества заготовок и производительности процесса.

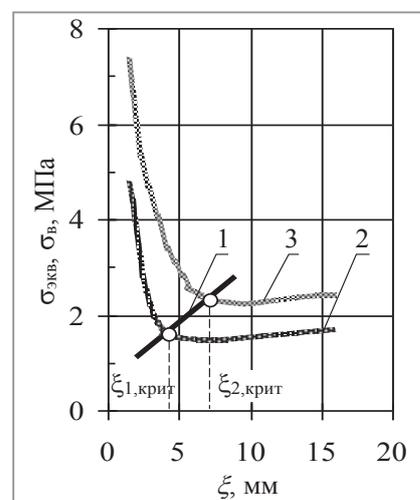
Поиск оптимальных параметров процесса непрерывного литья выполняется на этапах расчета и проектирования, промышленного опробования и внедрения технологии. Здесь необходимо найти весь комплекс параметров, удовлетворяющий требуемым условиям и согласованный с выбранным способом литья, конструкцией и типом установки. На этапе проектирования расчет параметров должен согласовываться с корректировками технологического процесса и изменением конструктивного оформления узлов установки и вспомогательного оборудования. В ходе промышленного опробования и внедрения процесса необходима только корректировка параметров литья. Она выполняется в случае, когда процесс литья не обеспечивает сочетание производительности и качества заготовок.

Решение задачи определения оптимальных параметров будет верным при условии правильного выбора способа литья и конструкции установки, качества изготовления ее узлов и механизмов, умелого сочетания теоретических расчетов и результатов промышленного опробования процесса, квалификации персонала и т.д.

Известно, что стабильность процесса непрерывного литья напрямую зависит от толщины и прочности твердой корки отливки, извлекаемой из кристаллизатора. Малая толщина и низкая прочность корки являются главными препятствиями достижения максимальных скоростей литья. Здесь, в зоне выхода отливки из кристаллизатора, температура корки достигает значительных температур. Кроме того, в результате вытяжки в корке возникают растягивающие напряжения, напряжения, создаваемые металлостатическим напором расплава, и термические напряжения, обусловленные перепадом температур по толщине [3].

Полученные математические зависимости и экспериментальные результаты [4] позволяют определить толщину корки отливки на выходе из кристаллизатора  $\xi = f(t)$ , максимальную температуру в наиболее разогретом сечении  $T_{In, max}$ , время  $t_{раз}$  и длину участка разогрева  $l_{раз}$ . Однако этих знаний недостаточно для создания работоспособной технологии. Важно знать, какова прочность корки при температурах, близких к максимальной температуре  $T_{In, max}$ , достаточна ли прочность корки на этом участке для того, чтобы выдерживать разрушающее действие напряжений.

Для решения этой задачи на первом этапе разработки технологии применяют весьма эффективную методику расчета эквивалентных напряжений, возникающих в материале отливки при высоких температурах (см. рисунок) [3]. Исходными данными здесь являются экспериментальная зависимость предела прочности чугуна от



Зависимость напряжений  $\sigma_{экрв}$  и  $\sigma_B$  от толщины корки  $\xi$ :  
 1 —  $\sigma_{экрв} = f(\xi)$ ; 2 —  $\sigma_{экрв}$  ( $d = 100$  мм);  
 3 —  $\sigma_{экрв}$  ( $d = 250$  мм)

температуры  $\sigma_B = f(T)$  и расчетная зависимость эквивалентных напряжений от максимально допустимой толщины корки отливки  $\sigma_{\text{эКВ}} = f(\xi_{\text{крит}})$ .

Поскольку толщина затвердевшей корки определяет ее прочность, легко найти зависимость предела прочности от ее толщины  $\sigma_B = f(\xi)$  (линия 1). Здесь критической толщиной корки  $\xi_{\text{крит}}$  будут являться значения, соответствующие точкам пересечения линии 1 прочности  $\sigma_B$  с линиями 2, 3 эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эКВ}}$ . Для цилиндрических отливок диаметром 100 и 250 мм критическая толщина корки составила соответственно  $\xi_{1, \text{крит}} = 4,1$  мм и  $\xi_{2, \text{крит}} = 6,5$  мм. Если значения эквивалентных напряжений превышают предел прочности материала отливки, то корка разрушается, а процесс литья прекращается.

Далее расчет технологии строился на следующих принципах.

Считалось [5–7], что использование критического значения толщины корки  $\xi_{\text{крит}}$  для расчета оптимальных технологических параметров процесса литья возможно только тогда, когда толщина корки  $\xi$  имеет одинаковые значения по периметру отливки. Это условие соблюдалось при рассредоточенной подаче расплава, характерной для вертикального литья с закрытым уровнем и не работало в случае вертикального литья с открытым уровнем и горизонтального литья.

При литье с открытым уровнем, когда подвод расплава осуществлялся, как правило, в одну или две точки, в зоне действия струи отводилась значительная часть теплоты перегрева расплава, что способствовало неравномерному росту корки как по периметру, так и по высоте отливки. Поэтому для расчета параметров литья вводили коэффициент  $k_1$ , учитывающий разностенность корки и рассчитываемый как отношение максимальной по сечению толщины корки  $\xi_{\text{max}}$  к минимальной  $\xi_{\text{min}}$ . По значениям  $k_1$  для заготовок различного диаметра и толщины стенки определялась допустимая толщина корки  $\xi_{\text{доп}}$ , допустимая скорость литья  $w_{\text{доп}}$  и допустимое время формирования отливки в кристаллизаторе  $t_{\text{доп}}$ . Далее рассчитывалась верхняя граница интервала оптимальных скоростей литья  $w_{\text{опт}}$ , для чего использовался коэффициент  $k_2$ , определяемый приближенно как отношение максимального и минимального значений времени формирования корки заданной толщины.

Для расчета технологических параметров горизонтального литья основным критерием являлась приведенная толщина заготовок, т.е. отношение площади поперечного сечения заготовки к ее периметру. По значениям приведенной толщины определяли параметры режима вытяжки отливки ( $\Delta h$ ,  $t_{\text{дв}}$ ,  $t_{\text{ост}}$ ,  $w$ ,  $w_{\text{ср}}$ ) [8].

Очевидно, что расчет технологии на этом этапе разработки представлял собой достаточно сложную задачу из-за перегруженности и необходимости определения многочисленных параметров и коэффициентов. Методика расчета толщины корки отливки при литье как с открытым, так и с закрытым уровнем позволяла найти только усредненные значения, что являлось ее существенным недостатком. Расчет параметров режима горизонтального литья с помощью значений приведенной толщины отливки [5,7] сомнителен, поскольку здесь не просматривается какая-либо взаимосвязь со средней скоростью вытяжки отливки  $w_{\text{ср}}$ . Также утверждалось, что значения допустимой скорости литья  $w_{\text{доп}}$  не могут быть заложены в качестве оптимальных параметров в промышленную технологию, поскольку они определяют границу стабильности способов литья.

С решением задачи расчета толщины корки в любой точке по периметру и длине отливки в зависимости от распределения перегрева расплава [1] необходимость определения коэффициента  $k_1$  отпала. Зная значения критической толщины корки  $\xi_{\text{крит}}$  нужно задать для нее необходимый запас прочности, который исходя из опыта исследований и эксплуатации должен составлять по отношению к  $\xi_{\text{крит}}$  не менее чем 1,5–2,0 раза. Этот запас будет являться гарантией стабильности процесса. Поэтому расчет оптимальных параметров литья следует вести, ориентируясь на значения  $\xi_{\text{доп}}$ .

Также нет необходимости определять допустимые значения скорости литья  $w_{\text{доп}}$  и времени формирования отливки в кристаллизаторе  $t_{\text{доп}}$ . Здесь нужно использовать более эффективный параметр – максимальную скорость литья  $w_{\text{max}}$  [9]. Она и будет являться допустимой. Значения же оптимальной скорости литья  $w_{\text{опт}}$  так же, как и значения других оптимальных параметров, определяются без использования коэффициента  $k_2$ . При этом оптимальная скорость литья не обязательно должна быть максимальной.

Далее по известным значениям минимально допустимой толщины корки  $\xi_{\text{доп}}$  и оптимальной скорости литья  $w_{\text{опт}}$  рассчитываются параметры режима вытяжки отливки ( $\Delta h$ ,  $t_{\text{дв}}$ ,  $t_{\text{ост}}$ ) и размеры рабочей втулки кристаллизатора (длина и толщина  $l_{\text{кр}}$ ,  $\delta_{\text{кр}}$ ). Для горизонтального литья определяют размеры комбинированного кристаллизатора (втулка  $l_{\text{кр}}^c$ ,  $\delta_{\text{кр}}^c$  и графитовый вкладыш  $l_{\text{кр}}^r$ ,  $\delta_{\text{кр}}^r$ ). Исходя из практического опыта, длина рабочих элементов кристаллизатора должна быть не менее чем двукратный размер диаметра либо наибольшей стороны профиля кристаллизатора. Толщина рабочих элементов зависит от размера профиля кристаллизатора и его материала (медь, сталь, графит). Поскольку эти параметры

являются основными при расчете теплового режима кристаллизатора и кинетики затвердевания отливки, их значения должны удовлетворять оптимальным значениям параметров литья.

В качестве примера в таблице приведены значения расчетных технологических параметров литья, предназначенных для получения отливок из чугуна вертикальным и горизонтальным способами [10].

Технологические параметры литья

Размеры отливки		Толщина корки, мм		Скорость литья, м/мин		Режим охлаждения, м/с	Температура заливки, °С	Размеры кристаллизатора, мм	
$d$	$\delta$	$\xi_{\text{крит}}$	$\xi_{\text{доп}}$	$w_{\text{max}}$	$w_{\text{опт}}$	$w_{\text{в}}$	$T_{\text{зал}}$	$l_{\text{кр}}$	$\delta_{\text{кр}}$
Открытый уровень									
Вертикальное литье									
104	25	4,1	7,6	0,56	0,56	3,0	1320	200	11
100*	20	4,1	5,7	1,5	0,7–0,9	–	1300	200	11
100*	25	4,1	6,6	1,3	0,5–0,8	–	1300	200	11
Закрытый уровень									
Вертикальное литье									
100	20	4,1	7,1	–	0,6	3,0	1360	300	16,5
Горизонтальное литье									
100	–	–	11,8 16,8	0,42	0,4	3,0	1320–1360	340	7,2
100*	–	–	14–17 14–17	–	0,4	–	1320–1360	340	7,2
200*	–	–	13–18 13–18	–	0,3	–	1280–1320	250	–

Примечание. Для сравнения звездочкой отмечены данные, рассчитанные по традиционной методике [5,7].

Из таблицы видно, что в случае вертикального литья с открытым уровнем при близких параметрах и размерах отливки значения допустимой толщины корки  $\xi_{\text{доп}}$ , рассчитанные по традиционной технологии, сильно занижены. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные, полученные по методике выливания жидкого остатка и серным отпечаткам [1]. Значения же максимальной  $w_{\text{max}}$  (допустимой  $w_{\text{доп}}$ ) и оптимальной  $w_{\text{опт}}$  скоростей литья наоборот завышены. Причем скорость  $w_{\text{max}}$  завышена более чем в 2 раза. Хотя значения  $w_{\text{max}}$  и не рекомендуются в качестве параметров промышленной технологии, такое завышение не допустимо. Как показали эксперименты, уже при скоростях литья более  $w_{\text{ср}} = 0,66–0,70$  м/мин (отливка  $d = 104$  мм,  $\delta = 25$  мм) отмечался значительный перегрев корки в зоне вторичного охлаждения. Часто температура  $T_{\text{лн, max}}$  достигала критических значений, что приводило к возникновению аварийной ситуации.

Как и при вертикальном литье с открытым уровнем, расчет по традиционной методике предельно допустимой толщины корки горизонтальной отливки на выходе из кристаллизатора  $\xi_{\text{доп}}$  проводили усредненно без учета неравномерного распределения перегрева расплава. Поэтому значения  $\xi_{\text{доп}}$  здесь также завышены: для отливки  $d = 100$  мм  $\xi_{\text{доп}} = 14–17$  мм по периметру против  $\xi_{\text{доп}} = 11,8$  мм для верхней образующей, рассчитанной по усовершенствованной методике. Как показал опыт промышленной эксплуатации линий [1], приходилось часто вмешиваться в процесс управления формированием отливки, вносить коррективы в режим вытяжки либо осуществлять кратковременные остановки литья из-за высокой вероятности возникновения прорывов расплава.

В конечном итоге, имея результаты расчета оптимальных параметров литья и размеры элементов кристаллизатора, приступают к разработке технологии и проектированию узлов и механизмов специализированных установок и линий непрерывного литья.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е. И., Демченко Е. Б.** Тепловые явления при формировании непрерывной отливки. Мн.: БНТУ, 2012. 208 с.
2. **Марукович, Е. И.** Учет влияния теплоты перегрева расплава на формирование заготовки при вертикальном непрерывном литье / Е. И. Марукович, Е. Б. Демченко, А. А. Офенгенден // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 2. С. 7–11.
3. **Крутилин, А. Н.** К вопросу о прочности чугуна при непрерывном литье / А. Н. Крутилин, В. А. Гринберг, Е. Б. Демченко, И. К. Филанович // *Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: Выш. шк., 1987. Вып. 21. С. 46–48.*
4. **Демченко, Е. Б.** Формирование непрерывной отливки за пределами кристаллизатора / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // *Вест. БНТУ*. 2008. № 4. С. 31–34.
5. **Тутов, В. И.** Технология и оборудование вертикального полунепрерывного литья гильз цилиндров / В. И. Тутов, В. А. Гринберг, И. В. Земсков, Е. Б. Демченко // *Технология и оборудование для получения литых чугунных заготовок: тез. докл. I съезда литейщиков. Ижевск, 1987. С. 19–20.*

6. Способ непрерывного литья полых цилиндрических заготовок и устройство для его осуществления: а.с. SU1811970 / И.В. Земсков, В.Д. Гульев, В.И. Тутов и др. Оpubл. 30.04.1993.
7. **Земсков, И.В.** Вертикальное непрерывное литье заготовок / И.В. Земсков, А.Н. Крутилин. Минск: БНТУ, 2015. 207 с.
8. **Демченко, Е.Б.** Режимы движения при непрерывном литье и их влияние на стабильность процесса / Е.Б. Демченко // Вестн. БНТУ. 2004. № 3. С. 21–25.
9. **Марукович, Е.И.** Расчет предельно допустимой скорости вытяжки непрерывной отливки / Е.И. Марукович, Е.Б. Демченко // Актуальные проблемы прочности: материалы 60-й Междунар. науч. конф. 14–18 мая 2018 г. Витебск, 2018. С. 108–110.
10. **Демченко, Е.Б.** Технология непрерывного литья для производства труб / Е.Б. Демченко // Наука – образованию, производству, экономике // Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. В 4-х т. Мн.: БНТУ, 2015. Т. 1. С. 343.

## REFERENCES

1. **Marukovich E.I., Demchenko E.B.** *Тепловые явления при формировании непрерывной отливки* [Thermal phenomena during the formation of a continuous casting]. Minsk, BNTU Publ., 2012, 208 p.
2. **Marukovich E.I., Demchenko E.B., Ofengenden A.A.** Uchjot vlijanija teploty peregreva rasplava na formirovanie zagotovki pri vertikal'nom nepreryvnom lit'e [Accounting for the influence of the heat of overheating of the melt on the formation of a workpiece in vertical continuous casting]. *Metallurgija mashinostroenija = Metallurgy engineering*, 2006, no. 2, pp.7–11.
3. **Krutilin A.N., Grinberg V.A., Demchenko E.B., Filanovich I.K.** K voprosu o prochnosti chuguna pri nepreryvnom lit'e [On the question of the strength of cast iron during continuous casting]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, Vyshhejschaja shkola Publ., 1987, vyp. 21, pp.46–48.
4. **Demchenko E.B., Marukovich E.I.** Formirovanie nepreryvnoj otlivki za predelami kristallizatora [Formation of a continuous casting outside the mold]. *Vestnik BNTU = Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2008, no.4, pp.31–34.
5. **Tutov V.I., Grinberg V.A., Zemskov I.V., Demchenko E.B.** Tehnologija i oborudovanie vertikal'nogo poluneppreryvnogo lit'ja gil'z cilindrov [Technology and equipment for vertical semi-continuous casting of cylinder liners]. *Tehnologija i oborudovanie dlja poluchenija lityh chugunnych zagotovok = Technology and equipment for producing cast iron blanks*, Izhevsk, 1987, pp.19–20.
6. **Zemskov I.V., Tul'ev V.D., Tutov V.I.** *Sposob nepreryvnogo lit'ja polyh cilindricheskih zagotovok i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Method for continuous casting of hollow cylindrical blanks and device for its implementation]. а.с. SU1811970, 30.04.1993.
7. **Zemskov I.V., Krutilin A.N.** *Vertikal'noe nepreryvnoe lit'e zagotovok* [Vertical continuous casting]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 207 p.
8. **Demchenko E.B.** Rezhimy dvizhenija pri nepreryvnom lit'e i ih vlijanie na stabil'nost' processa [Movement modes in continuous casting and their influence on process stability]. *Vestnik BNTU = Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2004, no. 3, pp. 21–25.
9. **Marukovich E.I., Demchenko E.B.** Raschjot predel'no dopustimoj skorosti vytjazhki nepreryvnoj otlivki [Calculation of the maximum allowable drawing speed of a continuous casting]. *Aktual'nye problemy prochnosti: materialy 60-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii 14–18 maja 2018 g. = Actual problems of strength: materials of the 60th International Scientific Conference May 14–18, Vitebsk, 2018*. Vitebsk, 2018, pp.108–110.
10. **Demchenko E.B.** Tehnologija nepreryvnogo lit'ja dlja proizvodstva trub [Continuous casting technology for pipe production]. *Nauka – obrazovaniju, proizvodstvu, jekonomike. Materialy XIII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Science – education, production, economics = Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference*. Minsk, BNTU Publ., 2015, vol. 1, pp. 343.