



УДК 621.74.047

Поступила 19.08.2013

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ф. БЕВЗА, В. А. ПОПКОВСКИЙ, В. П. ГРУША, ИТМ НАН Беларуси

## ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА ПРИ ЛИТЬЕ В МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ВОДООХЛАЖДАЕМУЮ ФОРМУ

*Проведен экспериментальный и расчетный тепловой анализ работы установки непрерывного литья бронзовых трубных заготовок. Рассчитаны допустимые тепловые режимы вытяжки.*

*An experimental and calculated thermal analysis of the bronze billets continuous casting plant is developed. Allowable thermal conditions for rolling-out are calculated.*

### Введение

В ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» разработана и используется для производства новая, не имеющая аналогов в мировой практике, высокоэффективная литейно-термическая технология получения полых цилиндрических заготовок без применения стержня. По этой технологии литье осуществляется методом намораживания в непрерывно-циклическом режиме, а термическая обработка для формирования заданной структуры производится за счет управления интенсивностью теплоотвода от поверхности, извлеченной из кристаллизатора отливки в основном без использования дополнительных источников тепла [1–3]. При этом выделяют следующие основные этапы цикла формирования полых цилиндрической отливки: порционное заполнение расплавом металлической водоохлаждаемой формы через сифонную литниковую систему; затвердевание отливки в кристаллизаторе; ее извлечение и транспортировка; вторичное охлаждение вне кристаллизатора.

Условия формирования отливки по разработанной технологии обеспечивают высокое качество литых заготовок [4]. Однако, как и любой другой специальный способ, так и литье намораживанием имеет свои ограничения, которые, не умаляя достоинств, снижают его эффективность.

Одним из основных факторов, определяющих качество отливок и стабильность процесса, является изменение температуры расплава в системе «разливочный ковш-кристаллизатор». Существенное влияние на стабильность процесса и условия формирования отливки оказывает характер напряженно-деформированного состояния рабочей втул-

ки кристаллизатора и ее взаимодействие с затвердевающей отливкой. Одной из причин нарушения хода разливки также может являться разрушение отливки при ее транспортировке из зоны кристаллизатора в зону разгрузки. Это обусловлено относительно высокими динамическими нагрузками на отливку в момент остановки транспортирующего механизма в связи с требованием максимально быстрой смены позиций. Кроме того, при транспортировке, а иногда и на этапе вторичного охлаждения «в положении лежа на боку» происходила деформация отливок под действием сил тяжести.

Качество, конечная структура, свойства получаемых заготовок и величина остаточных напряжений в значительной степени зависят от режима их охлаждения вне кристаллизатора. Термические напряжения, возникающие из-за перераспределения температур, в стенке отливки на этапе вторичного охлаждения могут быть опасными, с точки зрения возможности появления трещин на внутренней поверхности отливки.

Цель настоящей работы заключается в совершенствовании литейно-термической технологии на основе исследований и анализа термодинамических условий формирования отливок на всех ее этапах.

### Методика проведения исследований

Проведены экспериментальные исследования температурного режима расплава в системе «плавильная печь-разливочный ковш» и теплового режима работы элементов литниковой системы: металлопровода из песчано-жидкостекольной смеси и соединительного стакана. Измерения температу-



ры проводили термопарами (ХА) и (ПП) с записью данных при помощи измерительного стенда ИС 1 и выводом информации на компьютер в графическом и табличном виде. Режимы охлаждения отливок вне кристаллизатора также определяли экспериментально.

Данные по распределению температур в отливке при затвердевании и температурным полям кристаллизатора брали из ранее проведенных работ [5, 6]. Таким образом, были подготовлены исходные данные для исследования термомеханических условий формирования отливки на всех этапах.

Далее была разработана методика расчета температурных полей, напряжений и деформаций с применением программного обеспечения, основанного на использовании метода конечных элементов, математический аппарат которого реализован в пакете прикладных программ для инженерного анализа. При этом учитывали зависимость свойств материала исследуемого объекта от его температуры.

При формировании конечно-элементных моделей для расчета напряжений и деформаций учитывали осесимметричное температурное нагружение и напряженно-деформированное состояние отливки и кристаллизатора. Температуры, напряжения и деформации в сечении отливки и кристаллизатора определяли на различном уровне по высоте и в разных точках по толщине стенки. В указанных точках рассчитывали радиальные, осевые и тангенциальные напряжения, а также интенсивность напряжений, являющуюся интегральным показателем, учитывающим все действующие в точке компоненты напряжений.

### Результаты и их обсуждение

#### *Температурный режим расплава*

В результате экспериментальных исследований температурного режима расплава в системе «плавильная печь-ковш» установлено, что при литье специального низколегированного серого чугуна перлитного класса со степенью эвтектичности ~ 0,85 величину температуры перегрева расплава, подаваемого в кристаллизатор, необходимо выдерживать около 140 К. Учитывая, что температура ликвидус для такого чугуна находится в пределах 1215–1225 °С, то металл в плавильной печи необходимо перегревать до температуры 1480–1500 °С. В этом случае температура заливки с учетом потерь при переливе в ковш составляет около 1350–1370 °С. Такой уровень температуры должен поддерживаться на протяжении всей кампании разливки. Эта задача была решена за счет применения

технологического приема с периодическим доливом в разливочный ковш нормированных порций перегретого до 1390 °С расплава массой 40–50 кг через 180–200 с на протяжении всей кампании разливки.

Расчеты и анализ полученных результатов температурных режимов работы металлопровода из песчано-жидкостекольной смеси показали, что при разливке ~ 250 кг жидкого металла с точки зрения снижения потерь тепла от расплава в каналах более предпочтительным вариантом является применение металлопровода с меньшей толщиной стенки и предварительным его разогревом.

При непрерывно-циклическом литье заготовок из серого чугуна в условиях мелкосерийного производства на опытно-производственном участке института перешли на использование металлопровода с толщиной стенки 40 мм и прогревом ее до температур 150–180 °С.

Заметное влияние на температуру расплава и условия формирования отливки оказывает температурный режим соединительного стакана.

Анализ условий формирования отливки в кристаллизаторе, проведенный на базе разработанной модели с использованием метода конечных элементов, показал, что затвердевание нижней (торцевой) части отливки при непрерывно-циклическом литье происходит как за счет интенсивного радиального теплоотвода через рабочую втулку кристаллизатора, так и за счет осевого теплоотвода на материал соединительного стакана. Это приводит к образованию прилива на нижнем торце отливки по ее внутренней поверхности (рис. 1, а), что неоправданно увеличивает припуск на механическую обработку.

Для минимизации данного явления необходимо было снизить осевой теплоотток от нижнего торца затвердевающей отливки. Это было достигнуто за счет уменьшения поверхности сопряжения графитового элемента стакана с водоохлаждаемой стенкой кристаллизатора и существенным повышением термического сопротивления его стенки [7, 8].

Принятые технические решения по изготовлению технологической оснастки и не потребовали при их реализации применения новых дорогостоящих теплоизоляционных и огнеупорных материалов.

При этом использование новых конструкций металлопровода и соединительного стакана дали реальный эффект, заключающийся в повышении стабильности массы получаемых заготовок за счет снижения припуска на механическую обработку (рис. 1, б); исключении вероятности прекращения процесса литья по причине замерзания каналов литниковой системы.



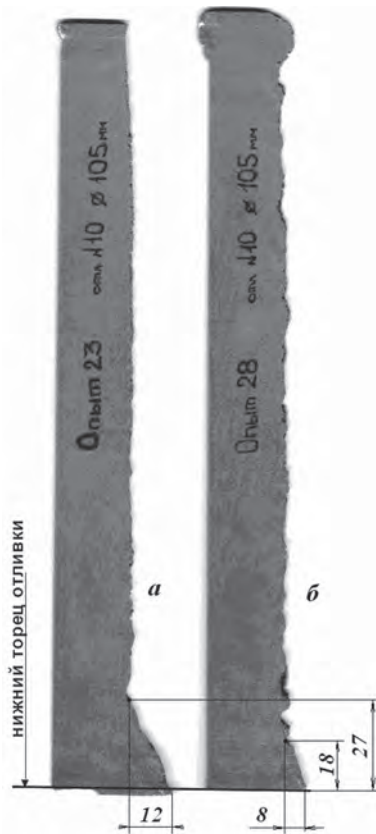


Рис. 1. Продольные темплеты отливок из серого чугуна: *a* – существующая технология; *б* – новая технология

### Напряженно-деформированное состояние кристаллизатора

При литье намораживанием термоциклирование стальной рабочей втулки кристаллизатора при периодических контактах с расплавом чугуна приводит к усталостному разрушению (разгару рабочей поверхности) и выходу ее из строя. Ресурс работы кристаллизатора зависит от величины деформаций, вызываемых знакопеременными тепловыми напряжениями, и продолжительности выдержки при максимальной температуре.

В результате исследований было установлено, что во всех случаях на рабочей (внутренней) поверхности кристаллизатора имеют место напряжения сжатия, а на водоохлаждаемой – растяжения. Причем на рабочей поверхности интенсивность напряжений имеет максимальное значение и в течение цикла изменяется в значительных пределах. На водоохлаждаемой поверхности и в средней зоне по толщине стенки эти напряжения значительно меньше и не превышают предела текучести стали в течение всей кампании разливки.

Основным критерием, который принимался во внимание при проведении анализа, были остаточные напряжения, фиксируемые в стенке втулки к концу цикла. Было установлено, что величина этих напряжений хорошо коррелирует с жестко-

стью рабочей втулки и максимальным градиентом температуры по толщине стенки. На основании результатов анализа было получено выражение, определяющее взаимосвязь толщины стенки и диаметра кристаллизатора [9].

Использование разработанных рекомендаций по определению рациональной толщины стенки рабочей втулки кристаллизатора из низкоуглеродистой стали при непрерывно-циклическом литье намораживанием заготовок из чугуна диаметром 60–220 мм и высотой 100–260 мм позволило обеспечить его высокую работоспособность.

### Термодеформационное взаимодействие отливки и кристаллизатора

В процессе затвердевания и охлаждения металла между отливкой и кристаллизатором образуется газовый зазор, существенно влияющий на их теплообмен и условия затвердевания отливки. Основной вклад в образование зазора и кинетику его изменения при литье намораживанием вносят усадка затвердевающей отливки и деформация кристаллизатора в течение цикла формирования отливки.

Зазор является величиной переменной во времени и определяется изменением температурного поля кристаллизатора и отливки в течение цикла затвердевания последней. Его размер складывается из суммы абсолютных величин усадки отливки и деформации кристаллизатора. При этом если наружный диаметр затвердевающей отливки за счет усадки в течение всего времени формирования уменьшается монотонно, то изменение внутреннего диаметра рабочей втулки кристаллизатора в течение цикла происходит по кривой с максимумом.

Анализ показывает, что в течение времени затвердевания отливки происходит постоянный рост газового зазора и в конце цикла он приобретает наибольшее значение (рис. 2). Причем максимальная интенсивность роста зазора имеет место в начальный период цикла. Средняя интенсивность

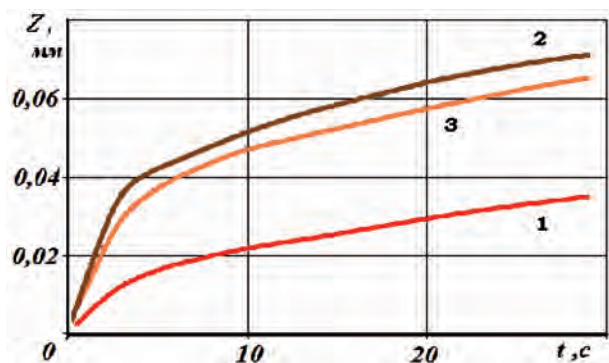


Рис. 2. Кинетика изменения зазора между отливкой и кристаллизатором в течение цикла в нижней (1), средней (2) и верхней (3) зонах по высоте кристаллизатора

увеличения зазора в первые 5–6 с составляет 0,0067–0,0073 мм/с.

С момента времени, соответствующего максимальному значению температуры рабочей поверхности кристаллизатора, происходит снижение интенсивности роста газового зазора в 5–7 раз по сравнению с начальным периодом формирования отливки. Это происходит за счет уменьшения доли деформации кристаллизатора в общей величине зазора.

Показано, что величина зазора в средней зоне по высоте кристаллизатора значительно больше, чем в зоне верхнего и нижнего торца (рис. 2), т. е. образуется бочкообразность. Это связано с особенностями принципиальной схемы литья и конструкции кристаллизатора. Образование бочкообразности может приводить к заклиниванию отливки при ее извлечении из кристаллизатора и прекращению процесса литья.

На основе анализа термомодеформационного взаимодействия отливки и рабочей втулки кристаллизатора получено выражение для определения толщины стенки стального кристаллизатора в зависимости от диаметра отливки и определен профиль (величина прямой конусности) рабочей поверхности кристаллизатора [10]. Так, например, при литье заготовок из серого чугуна диаметром 105 мм и высотой 240 мм разность диаметров верхнего и нижнего торца рабочей втулки составляет 0,8 мм. В этом случае бочкообразность компенсируется величиной конусности, что исключает заклинивание и обрыв затравочной части отливки при ее извлечении из кристаллизатора.

Использование кристаллизаторов новой конструкции позволило увеличить ресурс их работы, снизить припуск на механическую обработку отливок и повысить стабильность процесса литья.

### **Термонапряженное состояние отливки при транспортировке**

Расчеты напряженно-деформированного состояния отливки при транспортировке, проведенные с использованием метода конечных элементов, показывают, что даже при движении со средней линейной скоростью 0,2 м/с в момент резкой остановки поворотной системы максимальные значения интенсивности напряжений в отливке в зависимости от ее геометрических параметров могут достигать 15–25 МПа. Это сравнимо с пределом прочности чугуна при высоких температурах и может приводить к разрушению отливок в процессе транспортировки. Для предотвращения разрушения отливки необходимо обеспечить наряду с большой скоростью транспортировки плав-

ную безударную остановку поворотной системы. Для этого в конструкции литейной установки предусмотрено тормозное устройство в виде гидроцилиндра с перепускными отверстиями в поршне.

Исследования режимов транспортировки и напряжений, возникающих при этом, позволили произвести настройку тормозного устройства для плавной безударной, фиксированной остановки поворотной системы без разрушения отливки. Так, при скорости транспортировки 2 м/с и пути торможения 30 мм плавную безударную остановку обеспечивает тормозное устройство, в поршне которого выполнено шесть отверстий диаметром 5 мм. При этом напряжения, возникающие в стенке отливки, не превышают 3–5 МПа. Разработанные рекомендации снизили время смены позиций (с 5–6 до 3–4 с), что в свою очередь существенно повысило надежность и стабильность процесса литья.

Проведены также исследования влияния геометрических параметров на жесткость отливки при высоких температурах. Анализ результатов показал, что влияние диаметра на максимальное значение интенсивности напряжений в отливке от сил собственного веса носит нелинейный характер. При этом чем больше диаметр отливки, тем большее влияние на уровень действующих напряжений оказывает ее толщина.

В результате проведенных исследований определена область геометрических параметров, при которых значения остаточных деформаций отливок, охлаждающихся в горизонтальном положении, не превышают 1 мм. Полученные результаты позволяют оценить поведение отливок при высоких температурах в зависимости от соотношения диаметра и толщины стенки [11].

Проведенные исследования и полученные результаты термонапряженного состояния отливки дают возможность в каждом конкретном случае сформулировать требования к условиям разгрузки отливок и их передачи в зону вторичного охлаждения.

### **Термонапряженное состояние отливки при охлаждении и вне кристаллизатора**

В момент извлечения из кристаллизатора температура наружной поверхности отливки составляет около 960 °С, внутренней – ~ 1140 °С. После извлечения из кристаллизатора происходит достаточно быстрый разогрев наружной поверхности отливки, а внутренняя поверхность в течение некоторого времени (~ 5 с) сохраняет температуру солидуса, так как в это время происходит затвердевание части жидкой фазы, вынесенной внутренней поверхностью из расплава.



Высокая температура заготовок, извлекаемых из кристаллизатора, дает достаточно широкие возможности для управления процессом структурообразования на этапе вторичного охлаждения за счет первичного тепла отливки без применения дополнительных источников энергии. В частности, она обеспечивает распад цементита, образовавшегося в наружном слое отливки. При охлаждении полый цилиндрической отливки на воздухе в естественных условиях процесс распада цементита не всегда успевает пройти полностью. Полный распад эвтектического цементита происходит при выдержке извлеченной из кристаллизатора отливки на протяжении 180–200 с в термокамере, выполняющей функцию термоса, обеспечивающего охлаждение со скоростью не более 0,5 К/с. К моменту помещения в термокамеру разница температур между наружной и внутренней поверхностями отливки составляет около 40–45 К. В течение времени нахождения отливки в термокамере температуры поверхностей выравниваются и к моменту извлечения температура наружной поверхности составляет около 970 °С, а перепад по толщине стенки – 5–7 К (рис. 3).

Анализ напряжений в стенке отливки при описанных температурных условиях показал, что после извлечения из кристаллизатора на ее внутренней поверхности имеют место растягивающие напряжения, а на наружной – сжимающие (рис. 4). В момент извлечения из кристаллизатора происходит резкое повышение напряжений на обеих поверхностях на 15–20 %. Связано это с интенсивным перераспределением температур на этой стадии охлаждения за счет снижения интенсивности теплоотвода от наружной поверхности отливки.

Наличие растягивающих напряжений может служить причиной возникновения горячих трещин на внутренней поверхности отливки. Объясняется это тем, что в момент извлечения отливки из кристаллизатора температура внутрен-

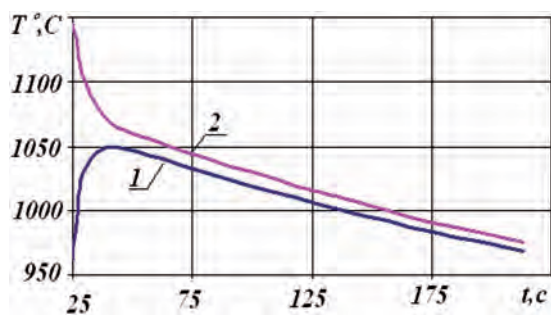


Рис. 3. Кинетика изменения температуры наружной (1) и внутренней (2) поверхностей отливки диаметром 105 мм с толщиной стенки 14 мм после извлечения из кристаллизатора

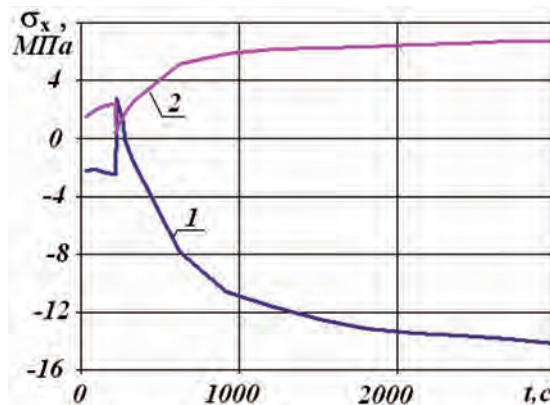


Рис. 4. Распределение напряжений по толщине стенки отливки: 1 – наружная поверхность; 2 – внутренняя поверхность

ней поверхности близка к температуре солидуса, а предел текучести чугуна близок к нулю.

Одним из методов, способствующих минимизации вероятности возникновения трещин, является снижение в допустимых пределах температуры расплава, подаваемого в зону формирования отливки. Осуществить это мероприятие позволило применение металлопровода и соединительного стакана специальной конструкции, обеспечивающих снижение тепловых потерь от расплава, находящегося в их каналах [7, 8].

На этапе охлаждения отливки в термокамере происходит плавное повышение напряжений на внутренней и наружной поверхностях. После извлечения из термокамеры имеет место перераспределение напряжений. Наружная поверхность, охлаждаясь, стремится уменьшить свои размеры, этому препятствуют внутренние слои отливки. В результате чего сжимающие тангенциальные напряжения перераспределяются и наводятся растягивающие. На внутренней поверхности снижаются растягивающие напряжения.

Дальнейшее охлаждение отливки происходит на воздухе в естественных условиях. Экспериментально установлено, что охлаждение наружной поверхности отливки в средней и нижней зонах по высоте, в области эвтектоидных превращений на воздухе со скоростью 1,5–1,2 К/с обеспечивает получение практически полностью перлитной матрицы (П96...П).

На основании анализа термонапряженного состояния отливки определен этап вторичного охлаждения, наиболее опасный с точки зрения возникновения трещин на их внутренней поверхности. Разработаны рекомендации по минимизации вероятности возникновения трещин.

### Выводы

1. На основе анализа тепловых условий формирования полых цилиндрических отливок из чу-



гуна при литье намораживанием получена зависимость изменения температуры расплава на протяжении кампании разлива в системе «заливочный ковш – кристаллизатор», на основании которой определены причины ее падения, разработана методика порционной подачи перегретого расплава в необогреваемый разливочный ковш с целью стабилизации температуры в заданном интервале для каждого конкретного случая литья. Предложено техническое решение по минимизации падения температуры жидкого металла в каналах литниковой системы за счет существенного повышения термического сопротивления ее стенок.

2. Анализ термодформационных условий позволил впервые выявить механизм образования и кинетики изменения газового зазора между тонкостенной металлической водоохлаждаемой формой и отливкой из чугуна, затвердевающей

в условиях пристеночной кристаллизации, для определения рациональных геометрических параметров кристаллизатора, обеспечивающих повышение ресурса его работы и стабильность процесса литья.

3. На основе анализа величины термических напряжений на всех этапах вторичного охлаждения установлено, что наиболее опасным с точки зрения возможности появления трещин на внутренней поверхности отливки является период времени сразу после извлечения ее из кристаллизатора до помещения в термокамеру, а также определены режимы охлаждения для получения заданной структуры.

4. Использование результатов исследований позволило стабилизировать процесс литья и получать заготовки с заданной структурой и свойствами.

### Литература

1. Марукович Е. И., Бевза В. Ф., Груша В. П. Реализация концепции пристеночной кристаллизации для получения высококачественных полых цилиндрических заготовок из чугуна // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. 24–26 апреля. 2007 г. Новополоцк. В 3-х т. Т. 1. С. 33–35.*
2. Marukovich E. I., Bevza V. F., Bodayko A. M., Hrusha U. P. Theoretical and Technological Basis of Casting of Hollow Billets by the method of Directional Solidification // *Литье и металлургия. 2011. №2. С. 63–72.*
3. Марукович Е. И., Бевза В. Ф., Груша В. П. Пристеночная кристаллизация – новые возможности сплавов // *Материалы 31-й ежегодной Междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 6–10 июня 2011 г. Ялта, С. 203–206.*
4. Марукович Е. И., Бевза В. Ф., Груша В. П. Формирование отливок в условиях пристеночной кристаллизации – основа высокого качества изделий // *Сб. материалов VII МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 19–21 сентября 2012 г. Минск, ФТИ НАН Беларуси. 2012 г. С. 259–269.*
5. Бевза В. Ф., Бодяко А. М. Параметры и условия работы кристаллизатора при непрерывно-циклическом литье // *Металлургия машиностроения. 2002. № 4(7). С. 46–48.*
6. Бевза В. Ф., Бодяко А. М. Температурное поле кристаллизатора при непрерывно-циклическом литье намораживанием // *Литье и металлургия. 2002. № 4. С. 96–98.*
7. Устройство для соединения кристаллизатора с литниковой системой: пат. 2943 Респ. Беларусь: МКИ В22D 11/10 / В. Ф. Бевза, Е. И. Марукович, В. С. Мазько, В. П. Груша; заявитель ИТМ НАН Беларуси. № и 20060055; заявл. 03.02.06.; опубл. 30.08.06 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2006. № 4. С. 159.*
8. Разливочный стакан: пат. 4552 Респ. Беларусь: МКИ В22D 11/10 / Е. И. Марукович, В. Ф. Бевза, В. П. Груша, В. С. Мазько; заявитель ИТМ НАН Беларуси. № и 20080029; заявл. 16.01.08; опубл. 30.08.08 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2008. № 4. С. 167.*
9. Бевза В. Ф. Напряженно-деформированное состояние полых цилиндрической отливки из серого чугуна при непрерывно-циклическом литье / В. Ф. Бевза, В. С. Мазько, В. А. Попковский, В. П. Груша // *Литье и металлургия. 2008. № 3(48). С. 139–141.*
10. Кристаллизатор для непрерывно-циклического литья заготовок из чугуна: пат. 2343 Респ. Беларусь. МКИ В22D 11/04 / В. Ф. Бевза, Е. И. Марукович, В. А. Попковский, В. П. Груша; заявитель ИТМ. НАН Беларуси. № и 20050290; заявл. 23.05.05; опубл. 30.12.05 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2005. № 4. С. 27.*
11. Бевза В. Ф., Попковский В. А. Влияние геометрических параметров на жесткость отливок при высоких температурах // *Литье и металлургия. 2000. № 3. С. 60–62.*

