

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧУГУНОВ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

*Е.И. Марукович, д.т.н, проф., директор, В.Ф. Бевза, к.т.н., зав. лаб., В.П. Груша, к.т.н., с. н.с.  
ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» (г. Могилев, Беларусь)  
В.А. Красный, к.т.н., доцент  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург)*

Рассмотрено влияние различных факторов формирования заготовок из серого низколегированного чугуна с пластинчатым графитом на структуру, свойства и ресурс работы деталей ДВС ответственного назначения. Показано существенное повышение ресурса работы деталей ДВС и деталей механизмов общепромышленного назначения, полученных методом направленного затвердевания по сравнению с ресурсом деталей, отлитых с применением других технологий.

Выбор и разработка износостойких, экономичных материалов, в частности чугунов с оптимальной структурой и высокими механическими свойствами для деталей ответственного назначения (гильзы цилиндров, поршневые и уплотнительные кольца, шестерни, втулки различного назначения и др.) является актуальной задачей и постоянно находится в центре внимания исследователей.

Для повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик чугуна, начиная со стадии получения заготовок и заканчивая финишными операциями изготовления деталей, применяют различные виды обработки, направленные на повышение качества изделий за счет получения заданной структуры и исключения различных дефектов.

На современном этапе развития науки и техники большие резервы повышения качества чугунов заложены в технологии активного и целенаправленного формирования структуры и свойств отливок. Один из способов реализации этих технологий — введение в расплавы в предкристаллизационный период модификаторов и микролегирующих добавок. Это наиболее простой, дешевый и высокоэффективный метод повышения технологических и служебных свойств металлоизделий.

Если легирование в большей степени влияет на внутренние свойства отдельных фазовых составляющих, рафинирование в основном определяет содержание неметаллических включений

и примесей, то модифицирование формирует макро- и микростроение всей структурной композиции литого материала. Легированные чугуны с пластинчатым графитом склонны к затвердеванию по метастабильной диаграмме, особенно при литье в металлическую форму. Поэтому графитизирующее модифицирование является неотъемлемой операцией, гарантирующей требуемые технологические свойства материала и, прежде всего, хорошую обрабатываемость резанием и минимальную усадку [1].

Структура и свойства чугуна в значительной степени зависят также от интенсивности теплоотвода в период первичной кристаллизации и условий последующего охлаждения. В этой связи режим охлаждения с регулируемой скоростью в определенном интервале температур — эффективное средство управления процессом структурообразования чугуна.

### **Способы обеспечения заданной микроструктуры деталей из чугунов**

подавляющее большинство чугуновых заготовок деталей машиностроения изготавливаются различными методами литья. При этом макродефекты заготовок образуются в основном в процессе литья и затвердевания расплава. Наиболее распространенными дефектами, существенно ухудшающими качество отливок, являются усадочные раковины и газоусадочная пористость. Эти виды брака образуются из-за дефицита жидкой фазы при затвердевании последних порций расплава в форме. Для устранения этого дефекта в традиционных методах литья применяют питающие бобышки и прибыли. Это приводит к усложнению технологии и увеличению расхода материала, но не всегда обеспечивает получение желаемого результата.

Прочностные характеристики чугуновых заготовок определяются не только отсутствием макродефектов, но и наличием микродефектов в структуре чугуна. Известно, что теоретическая прочность металла в десятки и даже в сотни раз больше, чем наблюдаемая в обычных условиях. Это связано с тем, что реальная структура металла поражена совокупностью макро- и микро-

дефектов, которые многократно снижают прочность. К первым относятся раковины, пористость, трещины, неметаллические включения и др. К микродефектам, дефектам кристаллической решетки, рассматриваемым на атомарном уровне, относят такие, у которых хотя бы один из трех размеров ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) сравним с периодом кристаллической решетки, составляющим 0,2–0,5 нм [2].

Для металлов главную роль в формировании их свойств играют линейные дефекты кристаллической решетки — дислокации, которые представляют собой нарушение правильной структуры вдоль некоторой линии в кристалле. Установлено, что реальная прочность металлов падает с увеличением числа дислокаций. Однако это происходит только до определенного момента. Достигнув минимального значения при некоторой критической их плотности, реальная прочность начинает возрастать. Это происходит за счет эффекта закрепления дислокаций.

Способами упрочнения, ведущими к увеличению полезной плотности дислокаций, являются механический наклеп, термомеханическая обработка металла — ковка, штамповка, прокатка при высоких температурах и др. Однако для образования дислокаций не обязательно приложение внешней деформирующей силы. Такой силой могут быть термические напряжения, возникающие при кристаллизации.

Существенное влияние на прочность чугуна оказывает объемная доля дендритных кристаллов, их длина и фазовый состав, а также степень ориентации по отношению к приложенным силам. Прочность дендритных ветвей (ДВ) в чугунах от СЧ15 до СЧ40 составляет около 800 МПа при перлитной основе и около 400 МПа при ферритной. В чисто эвтектических чугунах, при отсутствии ДВ, разрушение происходит почти исключительно отрывом при низких нормальных напряжениях — 70–100 МПа и только при наличии ДВ, оси которых отклонены от направления действующих сил от 0 до 60°, эвтектическая матрица вынужденно работает на срез, выдерживая большие разрушающие нагрузки [3].

Таким образом, для получения бездефектных заготовок из чугуна с заданной структурой и повышенными механическими свойствами, кроме применения оптимальной технологии приготовления и разлива расплава (легирование, модифицирование, определение термовременного режима разлива), необходимо также создать условия затвердевания и охлаждения чугуна, обеспечивающие получение мелкодисперсной с высокой плотностью дендритной структуры металлической матрицы без отбела и газоусадочной пористости. При этом для устранения отбела предпочтительно проводить термическую обра-

ботку за счет первичного тепла отливок в рамках единой литейно-термической технологии.

Этим требованиям в наибольшей степени отвечают технологии, основанные на использовании принципа направленности затвердевания металла. При получении полых цилиндрических заготовок без применения стержня методом направленного затвердевания такие дефекты, как шлаковые раковины, засоры и тому подобное исключаются за счет применения единой сифонной литниковой системы, постоянно действующей в течение всего процесса литья заготовок в непрерывно-циклическом режиме. Усадочные раковины и газоусадочная пористость исключаются за счет избыточного питания фронта затвердевания отливки в течение всего времени ее формирования в металлической форме. Это обусловлено тем, что масса расплава, участвующего в формировании каждой отливки, всегда больше массы затвердевшего металла, в том числе и в момент окончания ее затвердевания и извлечения из формы [4]. В работе [4] приведены схема и описание метода направленного затвердевания металла.

#### Исследование свойств и структуры и обсуждение результатов

Мелкозернистая плотная структура обеспечивается большой интенсивностью теплоотвода и, соответственно, высокой скоростью охлаждения расплава (чугуна) в металлической водоохлаждаемой форме. Скорость охлаждения металла определяет размер и характер положения дендритов. С ростом толщины намерзающей корочки размеры дендритов несколько увеличиваются [5] (рис. 1, кривая 1).

Свойства чугунных заготовок определяются не только строением дендритного каркаса, но и плотностью дендритной структуры, которая оценивалась отношением площади, занятой дендритами, к площади междендритных участков (рис. 1, кривая 2). В наружной зоне отливки плотность дендритов высока. С переходом в средние слои

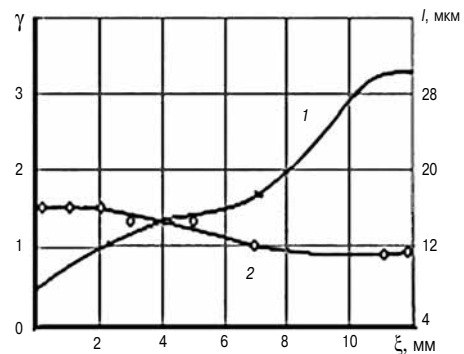


Рис. 1. Зависимость расстояния между осями дендритов второго порядка  $l$  (1) и плотности дендритной структуры  $\gamma$  (2) от толщины затвердевшей корочки металла

плотность структуры заметно падает, но и на внутренней поверхности она больше плотности дендритной структуры отливок, изготовленных в песчано-глинистых и стержневых формах.

Высокая скорость охлаждения металла может приводить к образованию отбела на наружной поверхности отливок. Однако большая скорость затвердевания металла способствует и ускоренному процессу графитизации. Дисперсные структурные составляющие (в наружной зоне  $l = 2-12$  мкм, размеры включений цементита и зерен первичного аустенита достигают  $2-3$  мкм) увеличивают количество центров и степень графитизации, а также сокращают пути диффузии углерода и самодиффузии железа. Большая скорость кристаллизации чугуна приводит к пересыщению аустенита углеродом и неравномерному распределению последнего между аустенитом и эвтектикой, что также облегчает графитизацию [6].

Рентгенографическими исследованиями установлено, что в структуре металла, затвердевшего в водоохлаждаемом кристаллизаторе, велика плотность дислокаций, а размер блоков мозаики при этом максимален. Причем уровень напряжений второго рода в структуре металла этого образца значительно выше, чем в образце, полученном литьем в кокиль. Цементит в кокильной отливке термодинамически более устойчив, чем цементит, образовавшийся в заготовке при направленном затвердевании, что обеспечивает его распад при температуре  $950-900$  °С в течение  $120-150$  секунд. При получении отливок с толщиной стенки до  $25$  мм эту операцию осуществляют, как правило, за счет самоотжига отливок, которые сразу после извлечения из кристаллизатора при средней температуре стенки около  $1000$  °С помещают в экранирующую камеру, выдерживают там заданное время, а затем извлекают из камеры и охлаждают на воздухе в естественных условиях.

При получении заготовок с толщиной стенки более  $25$  мм отливки сразу после извлечения из кристаллизатора помещают в печь, предварительно разогретую до  $950$  °С, выдерживают там около  $30$  мин, а затем охлаждают на воздухе.

Таким образом, создание определенной взаимосвязи теплофизических условий затвердевания с кристаллизацией дендритов, графитообразованием и величиной первичного зерна, а также с определенным режимом последующего охлаждения обеспечивает получение мелкодисперсной заданной металлической матрицы, повышенной плотности дендритной структуры и дислокаций и тем самым значительное повышение механических и эксплуатационных характеристик, что существенно увеличивает ресурс работы деталей.

Результаты успешного применения данного метода для изготовления деталей ответственного назначения освещены в ряде публикаций [4; 7-10]. В работе [7] отмечается, что применение поршневых колец тепловозных дизелей (рис. 2, а) из низколегированного чугуна с пластинчатым графитом (СЧХН), полученного методом направленного затвердевания (намораживания), позволило существенно снизить брак по литейным дефектам, получить высокую дисперсность макро- и микроструктуры, повысить износостойкость поршневых колец. Эксплуатационные испытания, проведенные на тепловозных дизелях 10Д100 и двигателях дизель-поездов, показали, что износостойкость поршневых колец, изготовленных по новой технологии, на  $15-20$  % выше по сравнению с кольцами серийного производства. Степень снижения упругости для них в  $1,3$  раза меньше, чем у аналогичных колец серийного производства.

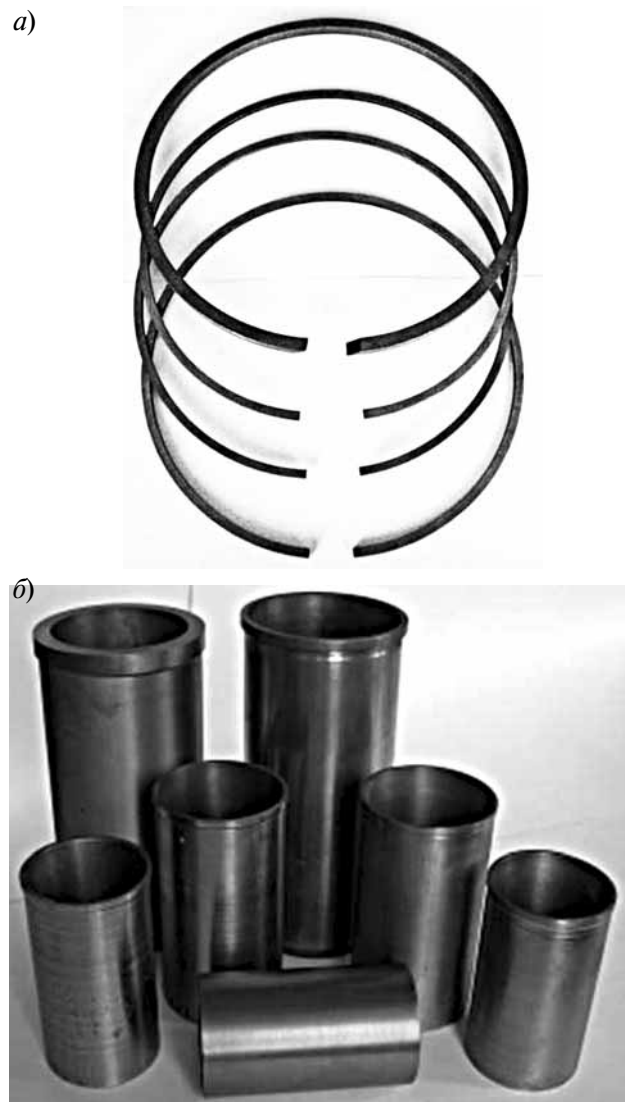


Рис. 2. Поршневые кольца (а) и гильзы цилиндров (б) из серого специального чугуна

Более высокие характеристики колец получены за счет формирования дисперсной матрицы (ПД 0,3–0,5) и оптимальной морфологии графита.

Структура отливок из низколегированного чугуна перлитного класса, получаемых методом направленного затвердевания, в максимальной степени соответствует требованиям, предъявляемым к машиностроительным деталям ответственного назначения, в том числе к гильзам цилиндров (рис. 2, б). Прочностные характеристики чугуна на 25–30 % выше по сравнению с аналогом, получаемым при литье в облицованный кокиль, а эксплуатационные свойства изделий на 15–20 % выше, чем при литье другими методами. Стендовые испытания гильз цилиндров разных производителей показали, что гильзы, полученные по методу направленного затвердевания в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к форсированным дизелям — их прочностные показатели превышают аналогичные характеристики серийных гильз, в том числе фирмы «Ичин» Чехия [4].

Уникальные результаты были получены при литье заготовок из белого высокохромистого чугуна (БВХЧ) с карбидами тригонального типа (M7C3) методом направленного затвердевания для изготовления деталей, работающих в условиях сухого трения и ударно-абразивного изнашивания.

Варьируя интенсивностью теплоотвода, величиной углеродного эквивалента, режимом охлаждения и другими параметрами процесса в структуре отливок получали от 18 до 70 % карбидов с различной направленностью: от полностью разориентированных до расположенных перпендикулярно к поверхности теплоотвода. Последние как раз и обеспечивают максимальную износостойкость при абразивном изнашивании в случае, когда их главные оси расположены перпендикулярно рабочей поверхности. При этом содержание хрома в чугуне составляло 12–14 %, что на 4–5 % ниже, чем при литье другими методами [8].

Практическое использование указанные результаты нашли при изготовлении детали «диск тормозной» (рис. 3, а, б), устанавливаемой в машинах для свивки корда сталепроволочного производства [9, 10]. Эта деталь работает в сопряжении с колодками из политетрафторэтилена в условиях сухого трения. Для ее изготовления использовались различные легированные стали (ШХ15; 18ХГТ; Х12М и др.). При этом основным недостатком был низкий ресурс работы: от трех до шести месяцев.

Применение детали «диск тормозной» из специального высокохромистого чугуна, получаемого методом направленного затвердевания, обеспечило увеличение ресурса работы в несколь-

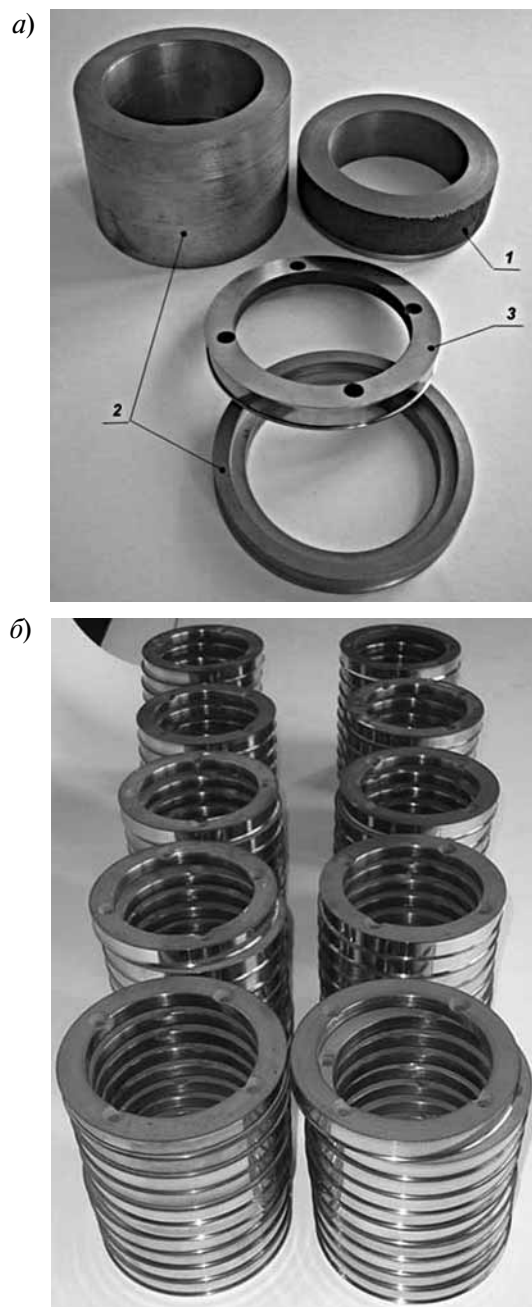


Рис. 3. Обработанная отливка (1), заготовки (2) и деталь «диск тормозной» (3) из БВХЧ (а) и опытно-промышленная партия дисков тормозных (б)

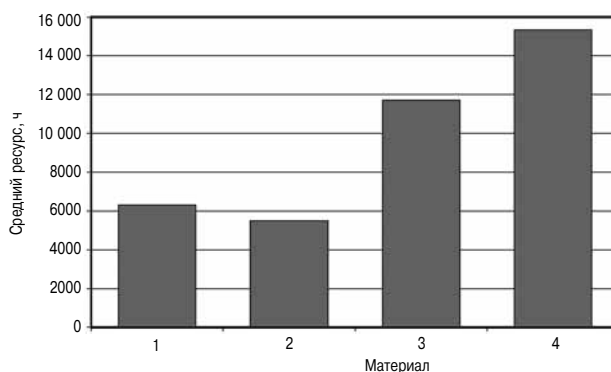
ко раз по сравнению с деталями из легированных конструкционных сталей. Контроль износостойкости дисков показал, что за 3 месяца эксплуатации износа на рабочей поверхности дисков не наблюдалось. Кроме того, было установлено повышение качества свивки и увеличение производительности канатного оборудования.

Проведенные исследования позволяют расширить номенклатуру и область применения заготовок, получаемых методом направленного затвердевания. Например, одной из быстроизнашивающихся деталей является червячное ко-

Таблица 2

**Ресурс работы редукторов ГУД 2334 А с червячными колесами из различных материалов**

№	Материал колеса	Профиль зацепления	Средний ресурс, ч
1	Бронза БрА9Ж4 улучшенная	Архимедов	6244
2	Бронза БрО10Н1Ф1	Архимедов	5548
3	Чугун (НЦЛНЗ)*	Архимедов	11752
4	Чугун (НЦЛНЗ)*	Утолщенный	15510



**Рис. 5. Сравнительный ресурс редукторов с червячными колесами из бронзы и чугуна**

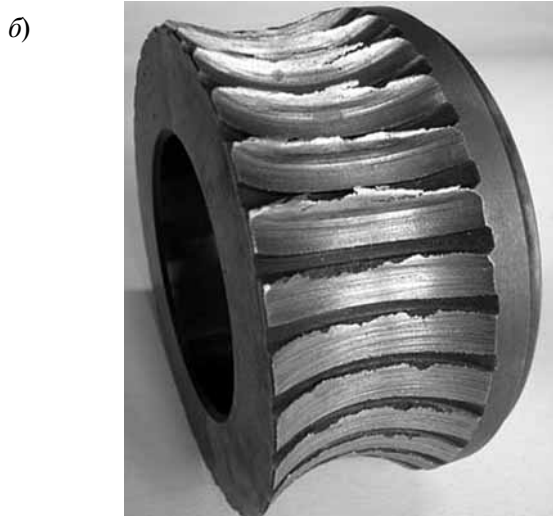
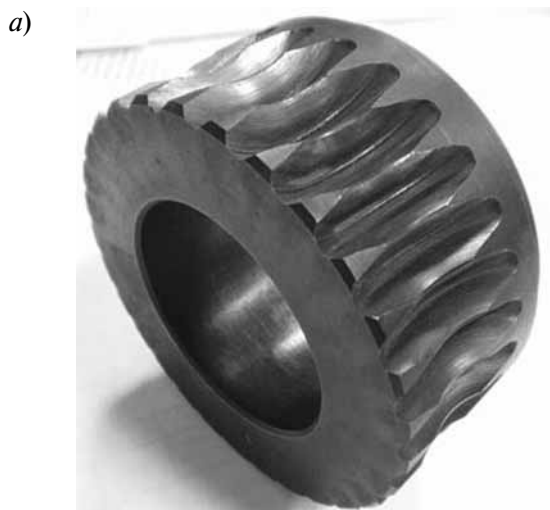
Промышленные испытания редукторов с бронзовыми червячными колесами и экспериментальными колесами из чугунных заготовок, полученных методом направленного затвердевания без применения стержня, показали неоспоримое преимущество последних (табл. 2 и рис. 5).

Анализ результатов промышленных испытаний показал, что средний ресурс работы редукторов с чугунными червячными колесами нормального профиля в 1,88 и 2,12 раза выше, чем ресурс редукторов с бронзовыми колесами соответственно из БрА9Ж4 улучшенной и БрО10Н1Ф1. Чугунные колеса с утолщенным профилем обеспечили увеличение ресурса работы редукторов соответственно в 2,48 и 2,80 раза.

Таким образом, создание оптимальных условий затвердевания и охлаждения отливок на макро- и микроуровне придает чугуну новые повышенные механические и эксплуатационные характеристики, ставит его в разряд высокоэффективных конструкционных материалов и значительно расширяет область его применения.

**Литература**

1. Бестужев Н.И., Константинович О.А., Бестужев А.Н. Инокулирующее модифицирование высококачественных чугунов — направление повышения



**Рис. 4. Новое (а) и изношенное (б) червячное колесо**

лесу (рис. 4, а, б) редуктора ГУД2334А привода дозирующих насосов пряядильных машин фирмы UNDE, используемых при производстве полиэтилентерефталата. В базовой комплектации эти редукторы оснащались червячными колесами из сплавов на основе меди. Было предложено заменить материал этих деталей на чугун.

Опытно-промышленная партия полых заготовок червячных колес была изготовлена методом направленного затвердевания из низколегированного серого чугуна с пластинчатым графитом (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав чугуна опытно-промышленной партии заготовок червячных колес**

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	P
Содержание, %	3,07	1,66	1,0	0,12	0,14	0,22	0,035	0,09
	3,08	1,95	1,1	0,15	0,15	0,30	0,040	0,12

конкурентоспособности отливок // Литейное производство. — 2005. — № 5. — С. 8–12

2. Гуляев А.П. *Металловедение*. — М.: Металлургия, 1966. — 480 с.

3. Ильинский В.А., Костылева Л.В. Зависимость прочности серого чугуна от его первичной структуры // Литейное производство. — 1997. — № 5. — С. 25–26.

4. Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П., Богданов Б.И., Красный В.А. Литье полых цилиндрических заготовок из чугуна методом пристеночной кристаллизации // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 23–27.

5. Бевза В.Ф., Марукович Е.И., Павленко З.Д., Туттов В.М. Непрерывное литье намораживанием. — Минск: Наука и техника, 1979. — 208 с.

6. Богачев И.Н., Давыдов Г.С., Рожкова С.Б. Графитизация и термическая обработка белого чугуна. — М.: Машиностроение, 1964.

7. Сапожников С.А., Асташкевич Б.М. Структура и свойства чугунных поршневых колец, изготовленных методом непрерывно-циклического литья // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2003. — № 3. — С.13–16.

8. Бодяко А.М., Бевза В.Ф., Галагаев С.В. Непрерывно-циклическое литье намораживанием — эффективная технология получения высококачественных заготовок // Литье и металлургия. — 2005. — № 3 (35). — С. 20–27.

9. Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П., Красный В.А. Формирование отливок из высокохромистого чугуна в металлической водоохлаждаемой форме // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 41–45.

10. Marukovich Y.I., Bevza U.F., Grusha V.P. Continuously - iterative casting by freezing — up of tube billets / 71 WORLD FOUNDRY CONGRESS Advanced Sustainable Foundry 19–21 may 2014. BILBAO, SPAIN.



**АГРОИНФО' 2015**  
6-я международная научно-практическая конференция

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ В АПК

**22-23 октября 2015 г. г. Новосибирск - р.п. Краснообск**

Адрес: 630501, р.п. Краснообск Новосибирской области, ФГБНУ СибФТИ

Тел. (383) 348-16-95, 348-59-16 Факс (383) 348-35-52

Сайт конференции <http://www.conf.nsc.ru/agroinfo2015>

Сайт СибФТИ <http://sibfti.sorashn.ru>

### ОРГАНИЗАТОРЫ

- ФГБУ "Сибирское отделение аграрной науки"
- ФГБУН «Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН»
- ФГБНУ «Сибирский физико-технический институт аграрных проблем»
- ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» – г. Санкт-Петербург
- ФГБНУ «Росинформагротех» – г. Москва
- ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»
- ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»
- ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
- ФГУП «Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии»

### ПЛЕНАРНЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

### СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

(по тематическим направлениям)

1. Применение компьютерных программ баз данных и экспертных систем в сельском хозяйстве
2. Измерительные системы, приборы и перспективные инструментальные методы исследования в биологии и сельском хозяйстве
3. Информационные технологии в инженерно-техническом обеспечении АПК

### ВЫСТАВКА ПРИБОРОВ, ПРЕЗЕНТАЦИИ КНИГ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ ДЕМОНСТРАЦИИ

ПОСЕЩЕНИЕ МУЗЕЕВ И ВЫСТАВОК Институтов Сибирского отделения  
РАН, СНИИМ, НГАУ, НГТУ, СГУГиТ