

8. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршнев, Д. С. Козак, Ю. Д. Бачинский // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 17-24.
9. Бубликов В. Б. Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование высокопрочного чугуна // Литейн. пр-во. – 2003. – № 8. – С. 20-22.
10. Медь в высокопрочном чугуне / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршнев и др. // Процессы литья. – 2010. – № 3 (81). – С. 46-57.
11. Влияние никеля на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршнев и др. // Там же. – 2011. – № 2 (86). – С. 24-33.

Поступила 05.07.2011

УДК 621.51:438.74.042

Н. И. Тарасевич, С. В. Скрипник*, И. Н. Тарасевич

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Национальный технический университет Украины «КПИ, Киев

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КОРПУСА КОМПРЕССОРА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ЛИТЬЕМ

Рассмотрены гидродинамические и теплофизические особенности заполнения формы жидким металлом при получении корпуса компрессора газовой турбины в вертикальной машине центробежного электрошлакового литья.

Ключевые слова: центробежное электрошлаковое литье, газовая турбина, компрессор, жидкий металл.

Розглянуто гідродинамічні та теплофізичні особливості заповнення форми рідким металом при одержанні корпусу компресора газової турбіни у вертикальній машині відцентрового електрошлакового лиття.

Ключові слова: відцентрове електрошлакове лиття, газова турбіна, компресор, рідкий метал.

There are considered the hydrodynamic and thermophysical characteristics of filling a mold with liquid metal while obtaining a gas turbine body in the electrocinder spun casting machine with vertical axis.

Keywords: electrocinder spun casting, a gas turbine body, compressor, liquid metal.

Центробежное литье нашло свое применение в промышленно развитых странах мира около 100 лет тому назад. Основная номенклатура отливок при центробежном литье – трубные изделия из черных, цветных металлов и биметалла, получаемых в изложницах с горизонтальной осью вращения [1, 2]. При изготовлении фасонных отливок, а также машиностроительных деталей типа колец и бандажей больших размеров предпочтительно применение вертикальной оси вращения. Такая технологическая схема позволяет упростить подготовку оборудования и оснастки при

ISSN 0235-5884. Процессы литья. 2011. № 6 (90)

Кристаллизация и структурообразование сплавов

получении мелких партий заготовок различных размеров, а также исключить дождевание и образование полосчатости в центробежных отливках. Качество и служебные свойства таких заготовок превышают требования государственных стандартов на кованный металл идентичного состава [3, 4]. Однако в настоящее время в силу исторически сложившихся условий в машиностроительном производстве используются в основном кованосварные заготовки деталей и узлов с большим количеством трудоемких технологических переделов и механической обработки. Их изготовление характеризуется продолжительным циклом производства и значительным браком, в том числе и при сварке заготовок.

Возросший уровень качества специальных видов литья машиностроительных заготовок, особенно электрошлаковых, может стать альтернативой получения их вместо свариваемых поковок [3-5]. По мнению многих исследователей это позволит в 1,5-2,0 раза сократить расход жидкого металла и в 2-3 раза снизить трудоемкость литья и механической обработки при сохранении служебных свойств готовых изделий.

Центробежное электрошлаковое литье (ЦЭШЛ) с вертикальной осью вращения во многих случаях позволяет получать сложные стальные отливки благодаря своим специфическим особенностям. Эти условия направленного затвердевания отливки от металлической формы за счет использования утепляющего шлака и действия центробежных сил обеспечивают продолжительный плотный контакт между формой и отливкой при переходе металла из жидкого состояния в твердое [3].

Учитывая сложность электрошлакового оборудования, проведение прямых экспериментов, связанных с замерами температур, скоростей движения жидкого металла и шлака, затруднено. Поэтому современным инструментарием научных исследований является вычислительный эксперимент на базе математического и компьютерного моделирования [6, 7]

Цель настоящего исследования – провести оценку изменения гидродинамических потоков и температуры в процессе заполнения формы жидким металлом. Геометрия отливки и формы представлена на рис. 1.

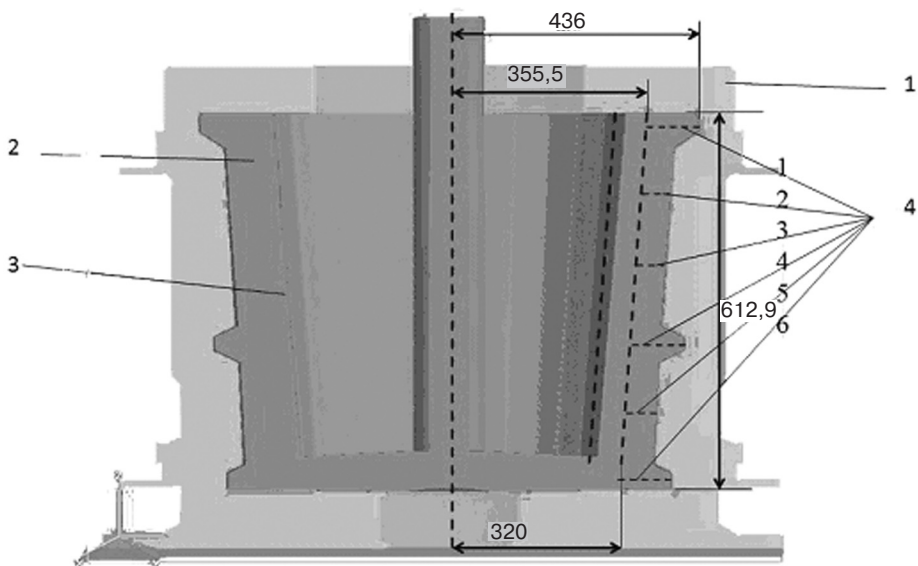


Рис. 1. Общий вид расчетной области: 1 – форма; 2 – отливка; 3 – шлак; 4 – горизонтальные сечения

При проведении вычислительного эксперимента были приняты следующие допущения:

– заполнение формы проходило в течение 40 и 80 с;

Кристаллизация и структурообразование сплавов

– начальная температура формы составляла 200 °С;
 – начальная температура шлака АН-295 на поверхности, граничащей с металлом, – 1700 °С;
 – жидкая сталь марки 15Х12Н2МВФАБ (ЭП 517) заливалась при температуре 1560 °С;
 – теплофизические характеристики, используемые при вычислительном эксперименте, представлены в таблице;
 – расчеты проводились с использованием пространственной модели и программного пакета LVMFlow.

На рис. 2, 4 представлено поле скоростей жидкого металла после заполнения формы. В представленных вариантах изменяли время заполнения формы (массовую скорость разливки) 40 и 80 с. Видно, что заполнение формы сопровождается преимущественно

двумя разнонаправленными потоками – восходящим, преимущественно по центру сечения отливки, и нисходящим – вдоль свободной поверхности на границе «шлак-металл». На размер рассматриваемых зон, а также на интенсивность локальных вихрей оказывают существенное влияние массовая скорость разливки и угловая скорость вращения формы.

Рассмотрим структуру поля скоростей при заполнении отливки в течение 80 с (низкая массовая скорость разливки), рис. 2.

При заполнении формы наблюдается образование трех вихревых областей, которые преимущественно формируются в районе фланцевых выступов. В нижней части формируется вихрь за счет заполнения объема нижнего фланца и удара поступающего металла в боковую стенку изложницы, что приводит к формированию обратного потока.

На выходе из желоба (как показывают расчеты) линейная скорость течения металла находится на уровне 0,2 м/с, а при попадании в область нижнего фланца падает до 0,07 м/с. Такое резкое торможение жидкого металла приводит к тому, что заполнение объема отливки носит направленный турбулентный характер.

Области больших скоростей (скорость более 0,2 м/с) наблюдаются на границе «шлак-металл», небольшие области у боковой стенки изложницы – под вторым и третьим фланцами.

Такой режим заливки может привести к загрязнению металла шлаком (из-за наличия на граничащей

Теплофизические характеристики металла, используемые при вычислительном эксперименте

Теплопроводность	Вт/(м·°С)	30
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°С)	711
Плотность (1460 °С)	кг/м ³	7000
Плотность (1590 °С)	кг/м ³	6890
Кинематическая вязкость	10 ⁻⁵ м ² /с	0,043
Коэффициент теплопередачи	кВт/(м ² ·°С)	10
Модуль Юнга (800 °С)	ГПа	112
Модуль Юнга (1200 °С)	ГПа	100
Модуль Юнга (1455 °С)	ГПа	0,5
Коэффициент Пуассона	–	0,290
Предел текучести (20 °С)	МПа	200
Предел текучести (1000 °С)	МПа	50
Предел текучести (1450 °С)	МПа	1
Температура ликвидуса	°С	1509
Температура солидуса	°С	1500

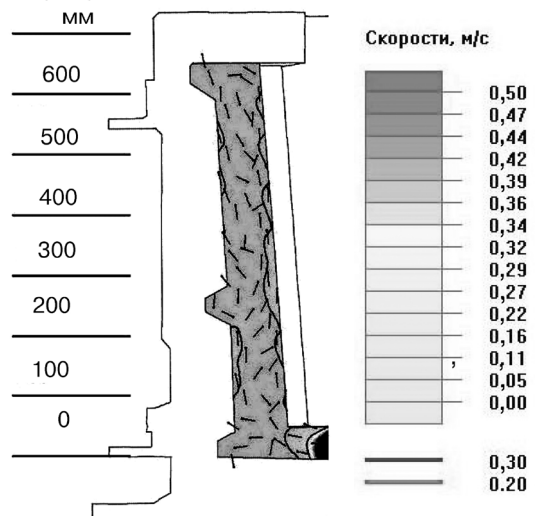
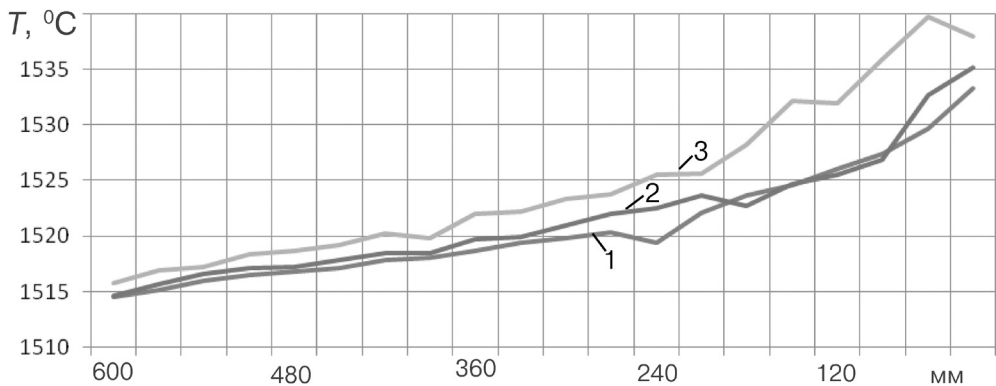


Рис. 2. Поле скоростей при заливке формы за 80 с

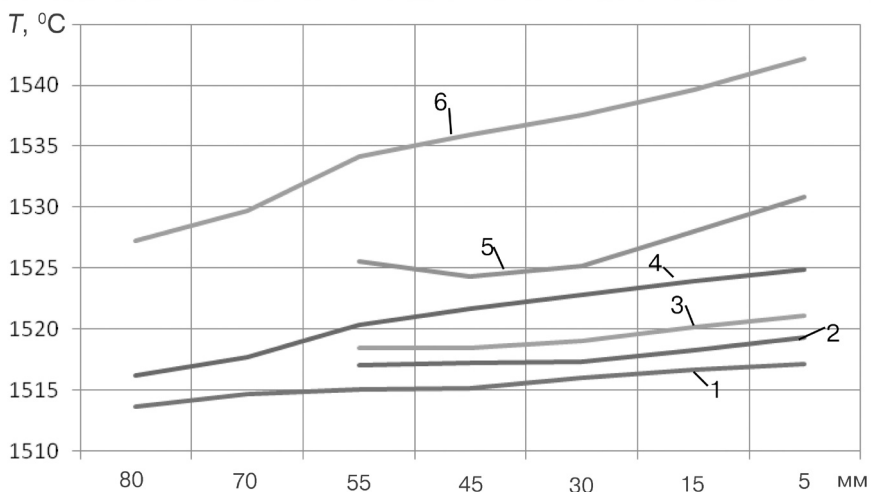
Кристаллизация и структурообразование сплавов

со шлаком поверхности локальных вихрей). Рассматриваемый режим заливки приводит к разности температур как по высоте отливки, так и ее толщине (рис. 3). В нижней части отливки, у донной поверхности, наблюдаются области высоких температур. Разница температур в нижней части отливки между наружной и внутренней поверхностями максимальная и достигает $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. По высоте отливки эта величина падает. Так, на уровне второго фланца она составляет $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в верхней части перепад температуры по сечению не превышает $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура жидкого металла вдоль внутренней поверхности формы изменяется от $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$ в области донной поверхности до $1515\text{ }^{\circ}\text{C}$ в верхней части отливки. На границе со шлаком эта температура соответственно равна 1540 и $1516\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, градиент температур у теплоотводящей поверхности по высоте отливки меняется от $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нижней части до $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в верхней.

Полученные результаты показали, что стартовые условия для кристаллизации отливки по ее высоте разные. Увеличение массовой скорости (время заливки



а



б

Рис. 3. Температурное поле отливки после заполнения формы за 80 с; а – изменение температуры по высоте отливки: 1 – вдоль стенки формы, 2 – середина толщины отливки, 3 – со стороны шлака; б – вдоль радиуса по горизонтальным сечениям в соответствии с рис. 1

40 с) (рис. 4) приводит к увеличению скорости жидкого металла на входе в нижнюю часть отливки до 0,5 м/с. При достижении боковой стенки отливки она падает до 0,16 м/с, образуя в нижней части локальный небольшой вихрь. Большая линейная скорость на входе в отливку обеспечивает устойчивый восходящий поток по высоте отливки, причем средняя скорость потока составляет 0,3 м/с, наблюдается образование вихрей с затуханием скорости в их центре у поверхности шлака в нижней части отливки, а также в верхней, включая фланец.

В рассматриваемом варианте наблюдается снижение градиента температуры как по высоте, так и радиусу отливки (рис. 5). Разность температур между торцами отливки не превышает 8 °С.

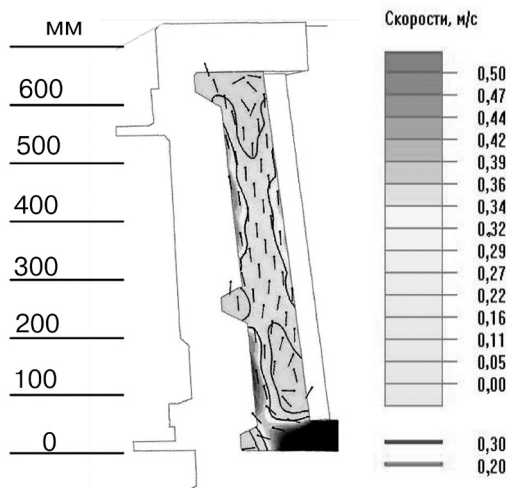


Рис. 4. Поле скоростей при заливке формы за 40 с

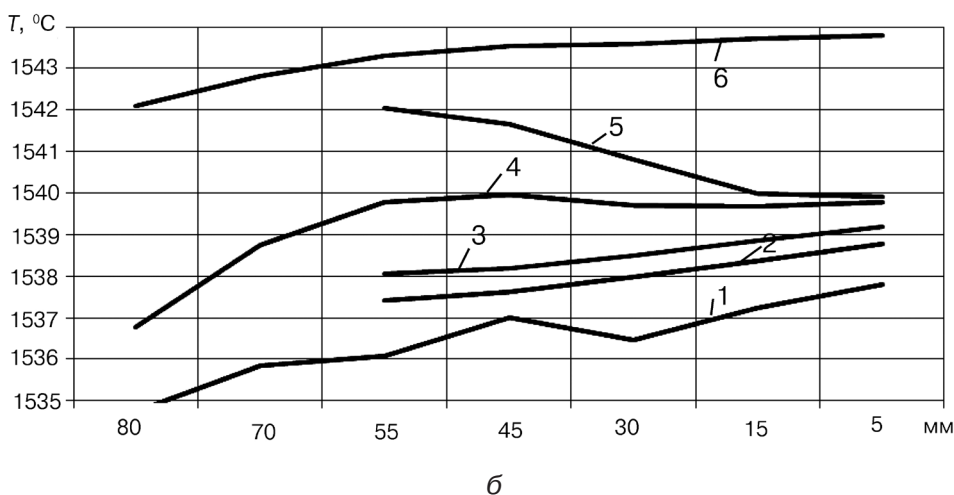
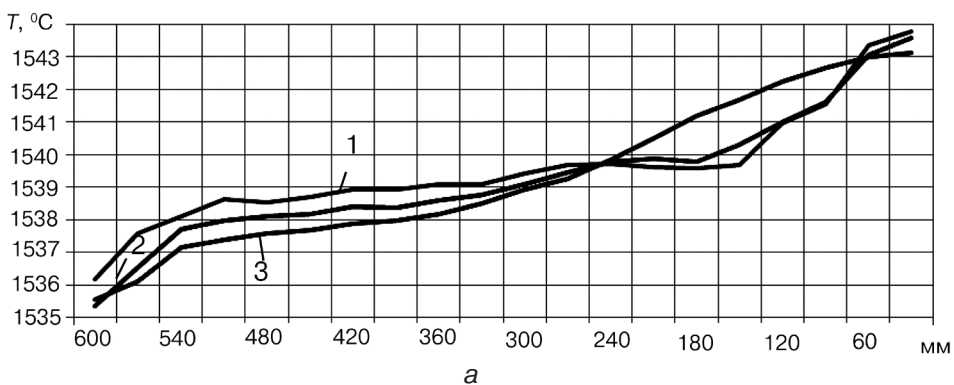


Рис. 5. Температурное поле отливки после заполнения формы за 40 с; а – изменение температуры по высоте отливки: 1 – вдоль стенки изложницы, 2 – середина толщины отливки, 3 – со стороны шлака; б – вдоль радиуса по горизонтальным сечениям в соответствии с рис. 1

Кристаллизация и структурообразование сплавов

Интересно перераспределение температур вдоль радиуса на разных уровнях отливки. Так, в нижней части в области фланца температура жидкого металла равна 1544,0 °С, а со стороны шлака – 1544,8 °С. Из-за образования локального вихря у поверхности шлака и смещения восходящих потоков жидкого металла в сторону изложницы (ввиду преимущественного действия центробежной силы), а также высоких температур у стенок изложницы и более низких со стороны шлака эта разница колеблется от 1 до 2 °С. На уровне второго фланца температура металла составила 1540,6 °С. В области фланца она падает до 1537,8 °С. У стенки изложницы, выше этого уровня, отсутствие ярко выраженных вихрей приводит к тому, что температура металла у наружной поверхности изложницы ниже и отличается от температуры со стороны шлака на 0,5-1,0 °С.

Время затвердевания отливки после заполнения изложницы составляет 17-19 мин. Во всех вариантах жидкий металл переходит в твердое состояние за счет преимущественного теплоотвода через стенку изложницы. Начало затвердевания происходит в области верхнего фланца, так как в этой области после заполнения изложницы металл имеет более низкую температуру по сравнению с нижней частью, где температура выше из-за поступления жидкого металла из желоба. Затвердевание носит направленный характер. Последние объемы металла затвердевают в нижней части отливки между первым и вторым фланцами (рис. 6).

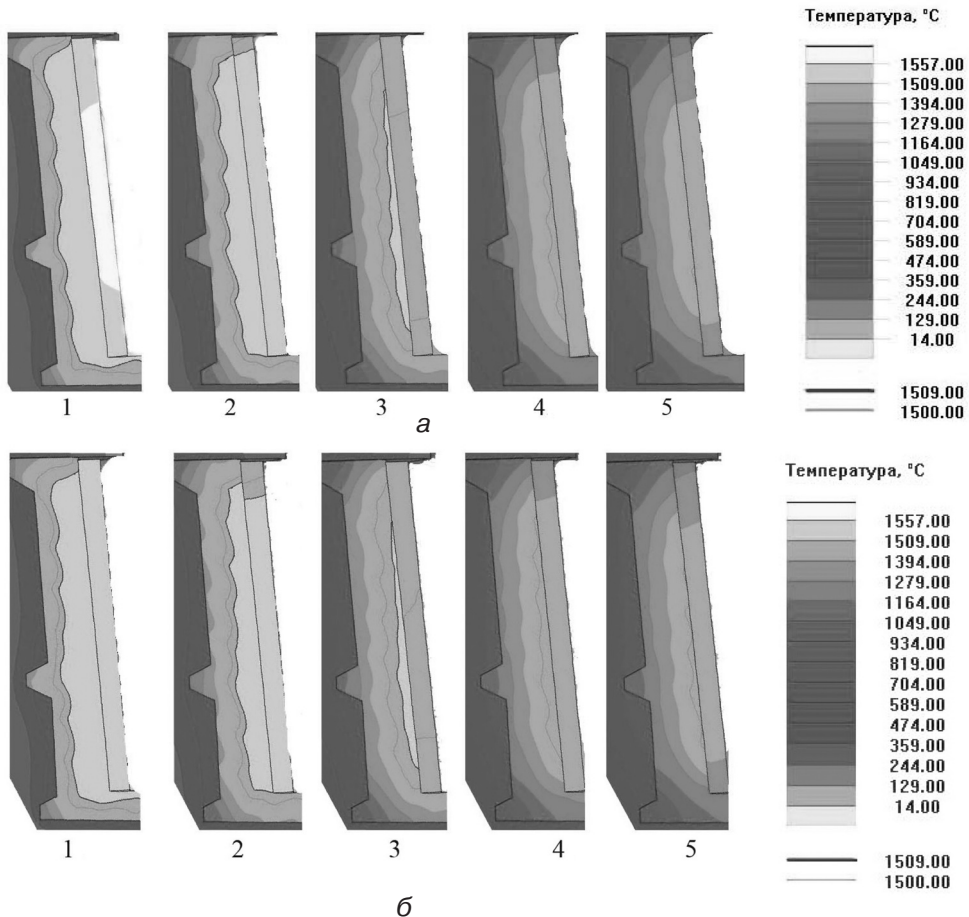


Рис. 6. Кинетика затвердевания отливки; а – при заполнении изложницы за 80 с; моменты времени: 1 – 3 мин 17 с, 2 – 5 мин 39 с, 3 – 10 мин 02 с, 4 – 15 мин 39 с, 5 – 18 мин 10 с; б – при заполнении изложницы за 40 с; моменты времени: 1 – 3 мин 25 с, 2 – 5 м 19 с, 3 – 10 мин 11 с, 4 – 16 м 11 с, 5 – 19 мин 11 с

Выводы

- Движение потока металла по высоте крупногабаритных корпусных отливок ЦЭШЛ с соотношением высоты к диаметру 0,8 должно происходить со скоростью не менее 0,5 м/с. При меньшей скорости возможно объемное затвердевание в верхней части отливки, которое нарушает ожидаемый направленный характер затвердевания.
- Перепад температуры по высоте отливки при скорости заливки 12,5-13,0 кг/с составляет 10-12 °С, что позволяет заливать сталь во вращающуюся изложницу с минимальным перегревом.
- Для исключения образования дефектов усадочного характера у свободной поверхности (граница отливка-шлак) желательнее использовать облицовку теплоизо-



Список литературы

лирующими материалами на участках изложницы между фланцами.

1. Юдин С. Б., Левин М. М., Розенфельд С. Е. Центробежное литье. – М.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
2. Шевченко А. И. Центробежное литье под флюсом. – Киев: Наук. думка, 1991. – 193 с.
3. Медовар Б. И., Маринский Г. С., Шевцов В. Л. Центробежное электрошлаковое литье. – Киев: Общество Знание, УССР, 1983. – 48 с.
4. Скрипник С. В., Чернега Д. Ф. Центробежное электрошлаковое литье конусных заготовок из стали 20Х13 // Литейн. пр-во. – 2009. – № 2. – С. 15-19.
5. Скрипник С. В. Об альтернативном способе производства крупногабаритных полых заготовок в газовом турбиностроении // Современная электрометаллургия. – 2009. – № 2. – С. 18-22
6. Тарасевич Н. И., Шелковникова Л. П., Корниец И. В. Исследование процессов формирования крупногабаритных центробежнолитых отливок: Препринт. – Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1988. – 43 с.
7. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов / Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, И. Н. Тарасевич, А. В. Дудченко // Металл и литье Украины. – 2010. – № 5. – С. 20-25.

Поступила 10.10.2011

С Новым 2012 годом!

**Дорогие коллеги, авторы, читатели,
друзья!**

**Примите наши самые искренние
поздравления с Новым годом!**

*Пусть в Новом году Вам всегда сопутствуют
успех, оптимизм, душевное спокойствие и
уверенность в завтрашнем дне!*

*Пусть в Новогоднюю ночь в каждом доме,
в каждой семье прозвучат самые теплые и
душевные пожелания близким и друзьям!*

**И пусть все они сбудутся
в 2012 году!**

