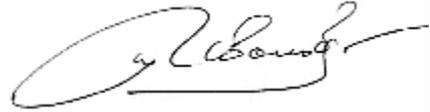


На правах рукописи



Иванов Михаил Александрович

ЧУГУННЫЕ ИЗЛОЖНИЦЫ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ
ДЛЯ ЛИТЬЯ ЦИНКОВЫХ БЛОКОВ

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2007

Работа выполнена на кафедре «Литейное производство» Южно-Уральского государственного университета.

- | | |
|-----------------------|---|
| Научный руководитель | – доктор технических наук, профессор
Б.А. Кулаков. |
| Официальные оппоненты | – доктор технических наук, профессор
К.Н. Вдовин,
– кандидат технических наук,
Е.Ф. Аверьянов. |
| Ведущее предприятие | – ОАО «Челябинский цинковый завод»
(г.Челябинск). |

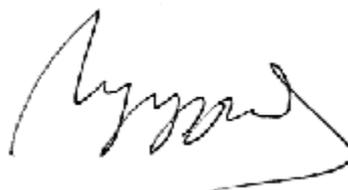
Защита диссертации состоится 31 мая 2007 г., в 14⁰⁰ часов, в ауд. 201 (гл. корп.) на заседании диссертационного совета Д212.298.06 в Южно-Уральском государственном университете.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. 8 (351) 267-90-96, факс 8 (351) 267-90-96, e-mail: kul@lit.susu.ac.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан «___» апреля 2007 года.

Учёный секретарь совета



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Стойкости изложниц для изготовления стальных слитков посвящено много исследований, изучены различные типы конструкций, режимы охлаждения, а также геометрия изложниц. Чугунным изложницам для литья слитков из цинка и сплавов на его основе практически не уделяется внимания. Актуальность диссертации диктуется малым количеством наливов (стойкостью) изложниц при изготовлении цинковых блоков массой 1–2 т. И хотя температура заливки цинка 450–480 °С невелика по сравнению с температурой заливки стальных слитков 1550–1600 °С, уровень стойкости изложниц на цинковых заводах достаточно низок, что приводит к снижению конкурентоспособности, как на российском, так и на мировом рынках.

Одним из направлений повышения стойкости изложниц является выявление её связи с различными факторами, изучение механизма образования трещин, а также закономерностей в распределении температурных полей в изложницах, на основе которых возможен прогноз стойкости.

Главной характерной особенностью тепловой работы любой изложницы, в том числе и для цинковых блоков, в процессе ее эксплуатации являются резкие циклически повторяющиеся односторонние нагревы от заливаемого во внутреннюю полость жидкого сплава и последующие охлаждения, включая период после выбивки затвердевшего слитка. Многократные повторения чрезвычайно интенсивных термических воздействий на изложницу как на конструкцию в целом, так и на материал, являются основными причинами ее разрушения и выхода из строя. Сложный тепловой режим работы изложницы с охлаждением в проточной воде требует четкой согласованности её тепловых потоков и одновременно осложняет проведение измерений.

Таким образом, отсутствие информации о влиянии технологии изготовления изложниц для литья цинка и условий их эксплуатации требует проведения комплексных исследований и является весьма актуальной задачей литейного производства в плане повышения их стойкости.

Часть разделов работы выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ и Правительства Челябинской области (2005 г.).

Цель и задачи исследования. Настоящая диссертационная работа имела целью разработать способы повышения стойкости изложниц для литья однотонных блоков цинка на основе установления закономерностей температурно-деформационных процессов и термоусталостной прочности при различных режимах охлаждения. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ стойкости изложниц в условиях ОАО «ЧЦЗ» и её связи с различными факторами;
- определить закономерности термических воздействий на изложницу;
- изучить механизм возникновения напряжений в стенке изложницы;
- разработать способы повышения стойкости изложниц;
- провести опытно-промышленные испытания разработок с оценкой их эффективности.

Научная новизна. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, обеспечивающих новые технологические решения в изготовлении и эксплуатации чугунных изложниц для литья

цинка и сплавов на его основе. В том числе:

- результаты анализа стойкости эксплуатируемых изложниц для литья однотонных цинковых блоков;
- данные статистического анализа связи факторов технологического процесса изготовления изложниц с их стойкостью, выявление тенденции влияния на стойкость продолжительности и температуры чугуна при заливке им форм;
- методика математического моделирования температурных полей изложниц с толщинами стенок от 30 до 70 мм с режимами охлаждения проточной и стоячей водой, а также на воздухе с использованием разделительного теплоизоляционного покрытия и без него;
- зависимости температуры от времени в различных точках изложницы при различных сочетаниях условий охлаждения и толщин стенок на основе компьютерного моделирования;
- теоретическое и экспериментальное подтверждение возможности применения разработанной компьютерной программы для расчета температурных полей изложниц;
- механизм образования трещин в изложницах в пределах одного цикла заливки цинка и за счет накопления остаточных деформаций с ростом количества циклов.

Практическая ценность работы. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований осуществлены технологические и конструктивные изменения, которые в комплексе привели к повышению качества изложниц и, как следствие, к лучшей стойкости. Просчитаны температурные поля изложницы, выделены оптимальные толщины стенок для различных режимов и скоростей охлаждения с позиции наибольшей стойкости.

Изменение технологии изготовления изложниц позволило снизить брак, исключить дефекты, провоцирующие их низкую стойкость, повысить качество их поверхности. Стабилизация газового режима формы путем интенсификации отвода газов через форму исключила выход газа через прибыли в момент затвердевания изложницы.

Разработан состав разделительного теплоизоляционного покрытия, который не снижает марки чистого цинка и имеет хорошие кроющие и седиментационные свойства. Интенсификация теплоотвода в одних элементах изложниц и его равномерность в других обеспечена использованием в охлаждающих ваннах с водой новой схемы расположения труб с различными диаметрами выходных отверстий. Внедрение данной схемы в производственный цикл позволило улучшить режим охлаждения, исключить образование газовых «мешков» под дном изложницы, ускорить охлаждение блока.

Показана целесообразность перехода производства изложниц с серого чугуна СЧ20 на высокопрочный ВЧ45–ВЧ50.

Реализация работы. На ЗАО «Поликом» (г. Челябинск) проведены промышленные испытания разработанной технологии изготовления изложниц, а предложенный процесс эксплуатации изложниц прошел опытно-промышленное испытание на ОАО «Челябинский цинковый завод» (ОАО «ЧЦЗ»).

Апробация работы. Основные материалы диссертации были представлены на VII съезде литейщиков России, г. Новосибирск (2005 г.), на научно-технических конференциях в ЮУрГУ (2003, 2004, 2005 гг.), сделан доклад на кафедре «Литейного производства» ЮУрГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных статей.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 117 наименований и 4 приложений; содержит 120 страниц машинописного текста, 25 таблиц, 41 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование темы диссертации, её актуальности, представлена структура, краткое содержание глав, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние производства изложниц для литья слитков из разных сплавов, рассмотрены факторы, влияющие на расход изложниц, особенности условий эксплуатации изложниц. Произведен анализ влияния параметров изготовления, материала изложницы и термических напряжений на их стойкость. Отмечено, что полностью отсутствуют сведения о стойкости изложниц для литья цинковых блоков, и требуются комплексные исследования этого процесса.

Показано, что перспективным является использование методов математического моделирования для описания температурного поля изложницы и термических напряжений. На основании этого обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследований.

Во второй главе проведен анализ эксплуатации изложниц для однотонных цинковых блоков на ОАО «ЧЦЗ», крупнейшем производителе цинка в России. Все изложницы для цинка и сплавов на его основе отливаются из технологичного литейного сплава – чугуна марки СЧ20. Это не самый лучший материал для изложниц, он значительно уступает нелегированной низкоуглеродистой стали по термопрочности, однако стальные изложницы не используются из-за вероятности снижения марки и, соответственно, стоимости чистого цинка вследствие возможного насыщения его железом и коррозии таких изложниц в воде.

Выявлено, что приемлемым для предприятия является стойкость в 2000 заливок. Однако стойкость изложниц, используемых на ОАО «ЧЦЗ», по 33 наблюдениям, колеблется от 4 до 1772 заливок. Средняя стойкость – 783 заливок, расход изложниц на тонну залитого цинка – 2 кг/т. Причиной быстрого выхода изложниц – до 400 заливок (24% от задействованных) – были трещины в вертикальных боковых стенках, примерно в середине продольного размера, а при более длительной эксплуатации, такой причиной были трещины в виде сетки разгара на дне изложницы.

При эксплуатации изложница находится в ванне с водой, поэтому наличие сквозных трещин и, как следствие, поступление воды внутрь изложницы не допускается. Такие изложницы выводят из эксплуатации и отправляют на переплав.

Истинное экспериментальное определение температур в изложнице затруднено из-за проточного водяного охлаждения, поэтому для выяснения особенностей тепловой работы и причин образования трещин в изложнице необходимо было создать математическую модель описания температурных полей, провести её полный анализ и выявить схемы протекания и развития температурной неоднородности.

В третьей главе проведено исследование возможностей использования коммерческих программных продуктов для описания температурного поля излож-

ницы в процессе её эксплуатации. Анализ этих программ показал, что они оптимизированы для моделирования заливки и кристаллизации сплава при различных видах литья с позиций образования дефектов. Ограниченно их можно использовать для описания температурного поля одного неполного цикла заливки. Для решения задач, связанных с описанием полного цикла работы изложницы, они не подходят. Поэтому была разработана специальная математическая модель описания полного цикла работы изложницы.

Для описания тепловой задачи выбран простой в реализации и зарекомендовавший себя метод конечных разностей (МКР), который успешно применяется для моделирования процессов передачи тепла и кристаллизации сплавов.

На основе общего уравнения теплопроводности Фурье для нестационарного теплообмена без внутренних источников тепла в трехмерном декартовом пространстве методом формальной замены производных конечно-разностными выражениями через центральные разностные операторы на равномерной сетке получили следующее уравнение:

$$t_{x,y,z}^{n+1} = t_{x,y,z}^n + F_c (t_{x+1,y,z}^n + t_{x-1,y,z}^n + t_{x,y+1,z}^n + t_{x,y-1,z}^n + t_{x,y,z+1}^n + t_{x,y,z-1}^n - 6t_{x,y,z}^n), \quad (1)$$

где $t_{x,y,z}^{n+1}$ – температура в точке узла конечно-разностной сети, °С; n – шаг расчета,

ед.; x,y,z – координаты узла сетки, ед; $F_c = \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$ – сеточное число Фурье; a – коэффициент температуропроводности, м²/с, Δt – шаг расчета по времени, с; Δx – расстояние между расчетными точками (шаг сетки), м.

Тогда условие устойчивости для равномерной сетки запишется в виде

$$F_c = \frac{a \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{6}. \quad (2)$$

Термические напряжения в любых конструкциях возникают вследствие различия в изменениях температур, а, следовательно, температурных деформаций отдельных участков (элементов). В изложницах температурная неравномерность образуется в результате одностороннего нагрева заливаемого в полость изложницы металла. Условием образования трещин в этом случае для одноосного напряженного состояния является соотношение:

$$\sigma = \frac{1}{2} [\alpha^{\parallel} \Delta t E(t)] \frac{1}{1 + \mu} = \sigma_B, \quad (3)$$

где σ – главные напряжения, МПа; σ_B – временное сопротивление разрыву чугуна, МПа; α^{\parallel} – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), 1/К; Δt – перепад температур, К; $E(t)$ – величина модуля упругости при температуре в рассматриваемый момент времени, МПа; μ – коэффициент Пуассона, доли ед.

Если уровень деформаций не выходит за пределы величины суммарно упругой деформации и временного сопротивления разрыву материала, то разрушение наступает только от остаточных явлений в каждом цикле, которые представляют собой в таком процессе пластические деформации. Поэтому условием разрушения (образования сетки разгара) может быть уравнение Менсена–Кофина:

$$\varepsilon_{oc}^n N = C. \quad (4)$$

Здесь ε_{oc}^n – остаточные деформации, накапливаемые с каждым циклом, доли ед.; n – коэффициент, характеризующий механизм накопления деформации;

N – количество циклов теплосмен, ед.; C – коэффициент, характеризующий деформационную способность материала, доли ед.

С учетом условий термоциклирования и диаграммы деформирования чугунов количество циклов, которое выдерживает материал, определяется по формуле:

$$N = \frac{\varepsilon_y + \varepsilon_{пл}}{\varepsilon_y \cdot \Pi}, \quad (5)$$

где ε_y – предельные упругие деформации, %; $\varepsilon_{пл}$ – пластическая деформация, %; Π – ползучесть, %.

Скорость ползучести серого чугуна принимается приближенной из условия релаксационной способности, не превышающей релаксацию стали 45, равную $\Pi \approx 0,1$ % от уровня упругой деформации при температурах в пределах 200–400 °С.

Уровень предельных упругих деформаций находится из условия:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_B}{E}. \quad (6)$$

Здесь σ_B – временное сопротивление разрыву, МПа; E – модуль упругости, МПа.

Использование в комплексе разработанных отдельно математических моделей расчета температурных полей, теплопередачи через стенку требует проведения физического и математического моделирования для проверки их адекватности. В результате анализа полученных данных выявлено, что они повторяют характер изгибов, как на температурной шкале, так и на временной. Подтверждена адекватность по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Таким образом, разработаны математические модели определения температурных полей на основе метода конечных разностей, полей напряжений и модели передачи тепла через стенку при охлаждении проточной, стоячей водой и воздухом, и с возможностью варьировать толщину разделительного теплоизоляционного покрытия. Для реализации математических моделей создана новая компьютерная программа. Проведена проверка адекватности моделей методом физического и математического моделирования.

В четвертой главе производился поиск способов повышения стойкости изложниц, а также изучение механизма образования напряжений в стенке изложницы.

Для анализа температурного режима работы изложницы по разработанной математической модели получены поля температур и напряжений, и на их основе – диаграммы средних температур поверхностей изложницы, температурных градиентов и соответствующих напряжений при сочетаниях различных толщин стенок (30..70 мм), режимов охлаждения и толщины теплоизоляционного разделительного покрытия изложницы. Температура заливки тонного блока цинка принималась 450 °С, продолжительность заливки 240 с, время до выбивки блока 43 минуты.

Моделирование производилось на симметричной бездефектной модели (рис. 1), поэтому контрольные точки расставлены в одной четверти, и, вследствие симметрии, отражают процессы, происходящие в целой изложнице.

Увеличение толщины стенки изложницы повышает её общую теплоаккумулирующую способность, что приводит к возможности поглощения большего

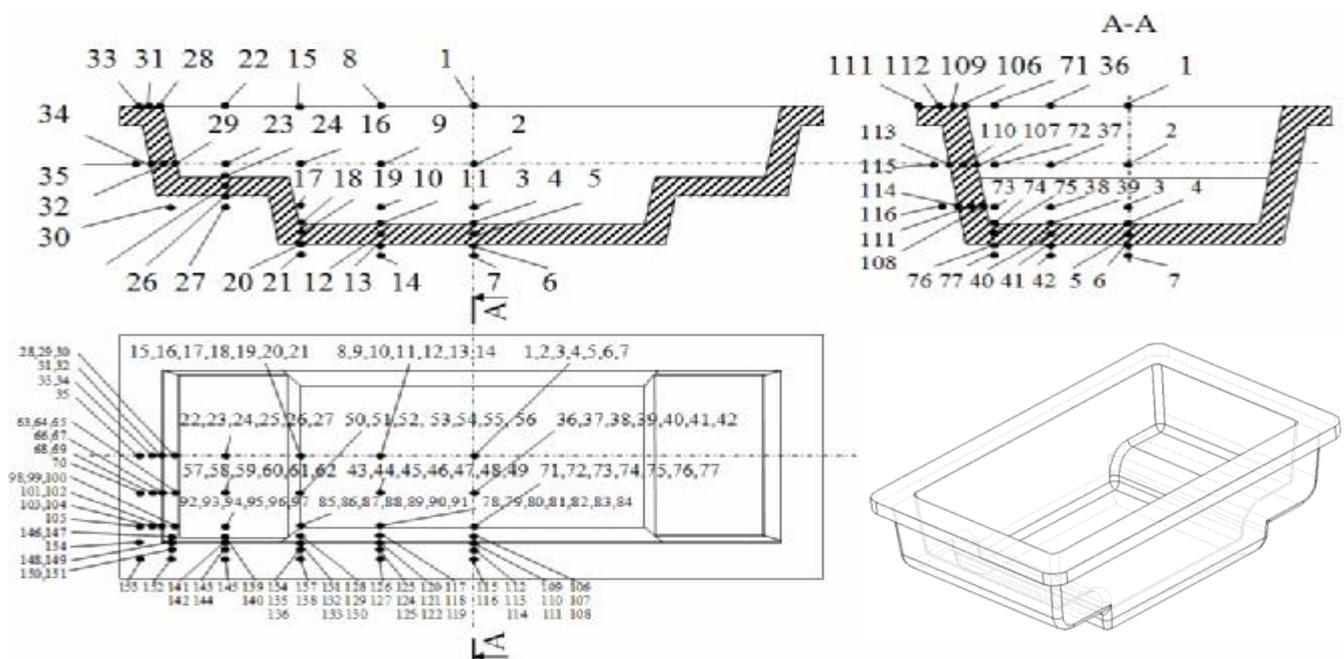


Рис. 1. Схема расположения контрольных точек

6

количества тепла в начальный момент времени. Это хорошо видно на рис. 2, где температура внутренней поверхности для любой толщины стенки и для любого режима охлаждения через 4 минуты с начала заливки примерно одинакова и только для воздуха выше на 13–57 °С из-за низкой скорости охлаждения. Наружная поверхность охлаждается по-разному и находится на различных расстояниях относительно внутренней поверхности. Поэтому четко прослеживается уменьшение средней температуры наружной поверхности с ростом толщины стенки независимо от характера охлаждения. Использование теплоизоляционного разделительного покрытия на основе оксида цинка толщиной 0,1 мм снижает среднюю температуру внутренней поверхности на 112–126 °С, а наружной на 19–88 °С.

Через 15 минут после начала заливки (рис. 3) влияние режима охлаждения и толщины стенки проявляется более полно. С ростом толщины стенки увеличивается теплоёмкость изложницы. При охлаждении в стоячей воде температура на внутренней поверхности 70-ти миллиметровой стенки по сравнению с 30-ти миллиметровой ниже на 98 °С. Использование теплоизоляционного покрытия снижает температуру внутренней поверхности на 22–32 °С. Охлаждение на воздухе в целом повторяет условия охлаждения стоячей водой, только с более высокими температурами. Так, средняя температура внутренней поверхности 30 мм стенки по сравнению с периодом 4 минуты увеличивается на 33 °С, в тоже время для 70 мм стенки уменьшается на 67 °С. Это свидетельствует о недостаточной теплоаккумулирующей способности тридцатимиллиметровой стенки. Уменьшение температуры внутренней поверхности на 12 °С происходит в стенке толщиной 50 мм. При охлаждении проточной водой средняя температура внутренней поверхности 30-ти мм стенки с покрытием выше на 14 °С, чем без покрытия. Это объясняется сильным разогревом фланца изложницы, который не охлаждается водой.

Однако с увеличением толщины стенки перепад выравнивается. Проточная вода обеспечивает наиболее быстрое охлаждение изложницы и наименьшие средние температуры из всех режимов охлаждения.

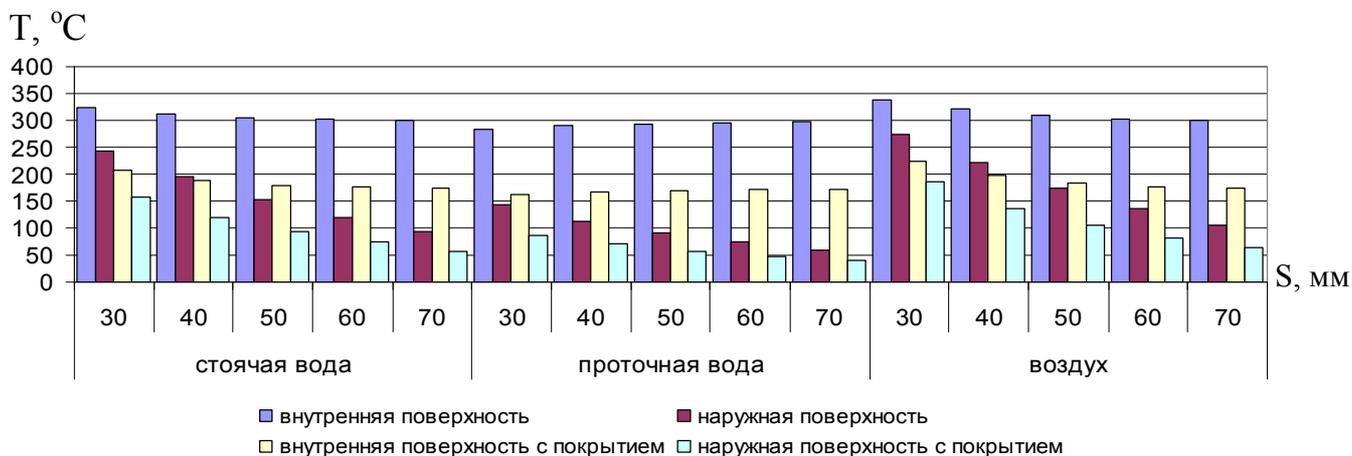


Рис. 2. Средняя температура в изложнице через 4 минуты при различных толщинах стенок

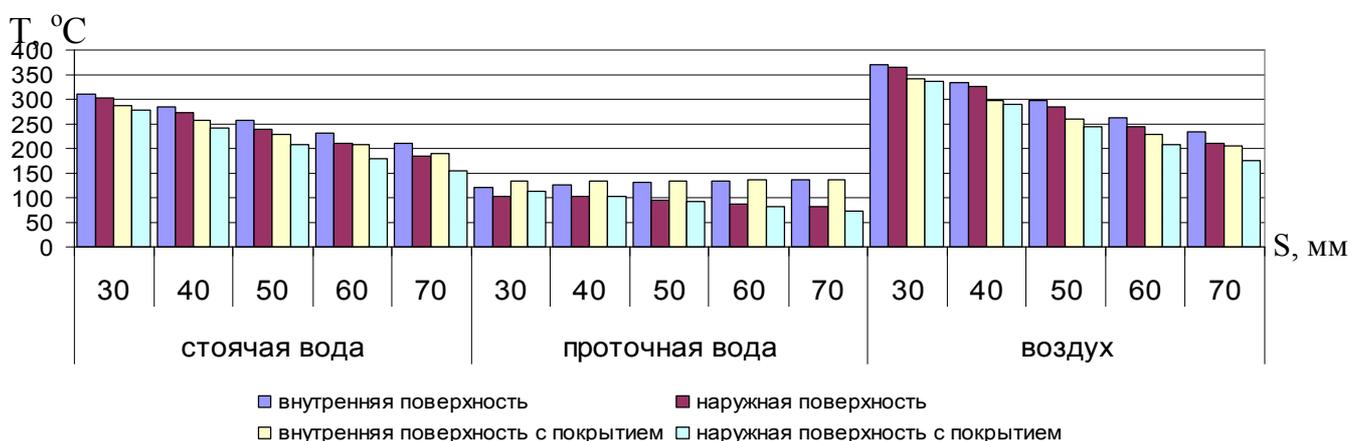


Рис. 3. Средняя температура в изложнице через 15 минут при различных толщинах стенок

Средние напряжения по уравнению (3) в стенках изложницы через 4 минуты представлены на рис 4. Хорошо видно, что с увеличением толщины стенки уровень напряжений растет в линейной зависимости независимо от режима охлаждения. Это объясняется тем, что изложница не успевает прогреться до наружной поверхности, и чем большее расстояние нужно прогреть, тем выше и напряжения. В стоячей воде увеличение толщины стенки с 30 до 70 мм приводит к повышению напряжений с 48 до 114 МПа. В проточной воде напряжения растут с 81 до 132 МПа, а на воздухе с 37 до 107 МПа. Охлаждение проточной водой приводит к самому большому уровню напряжений, затем по убыванию напряжений идет стоячая вода и воздух. Использование разделительного покрытия приводит к снижению напряжений на 37 – 43 %.

Через 15 минут (рис. 5) резкие перепады температур в стенке изложницы выравниваются, и уровень напряжений, соответственно, снижается. Использование проточной воды в зависимости от толщины стенки с 30 до 70 мм способствует росту напряжений от 10 до 38 МПа. Это связано с тем, что при активном охлаждении наружная поверхность контактирует со средой с постоянной температурой.

Разделительное покрытие сработало в начальный период после заливки, а по истечении 15 минут напряжения в стенках практически выравниваются при всех значениях толщин и режимах охлаждения. При этом абсолютный уровень

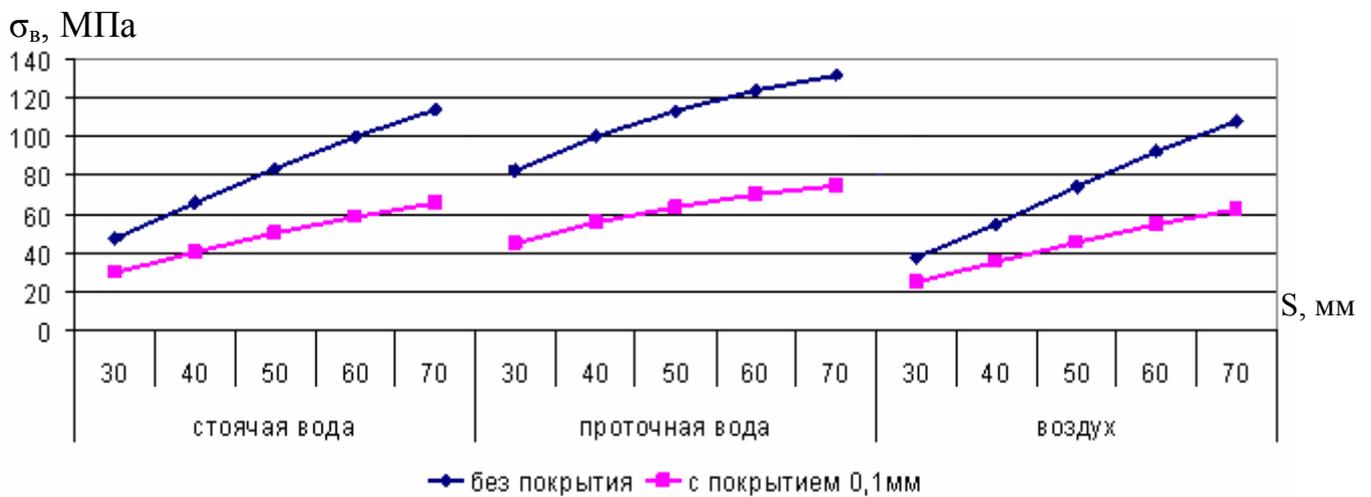


Рис. 4. Средние напряжения в стенках изложницы через 4 минуты

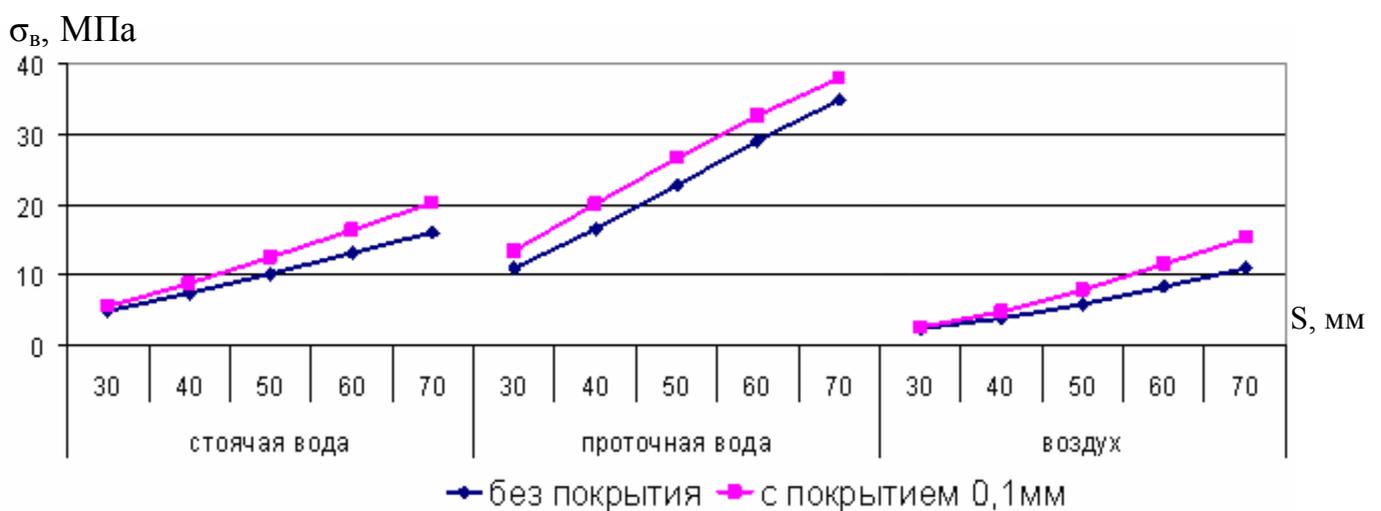


Рис. 5. Средние напряжения в стенках изложницы через 15 минут

напряжений снижается более чем в два раза. Уменьшение коэффициента теплопередачи между расплавленным металлом и изложницей, при нанесении теплоизоляционного покрытия, дает возможность в более «мягких» условиях прогреться стенке по толщине, снижая вероятность образования трещин. При охлаждении на воздухе 30-ти мм стенка быстро прогревается по толщине и имеет самый низкий уровень напряжений.

В связи с тем, что полный цикл состоит из двух непрерывных по времени полуциклов – нагрева и охлаждения, интерес представляет скорость охлаждения изложницы после максимального нагрева, тем более, что по времени 2-й полуцикл значительно превосходит первый. Скорости охлаждения изложницы в зависимости от характера охлаждения и толщины её стенки представлены на рис. 6. Замечено, что в пассивных режимах охлаждения (воздух, стоячая вода) с ростом толщины стенки повышается скорость охлаждения изложницы за счет увеличения её теплоаккумулирующей способности.

При активном режиме охлаждения изложниц проточной водой скорость падения температуры растет с увеличением толщины стенки до 50 мм, а далее (с 50 до 70 мм) скорость не повышается, что свидетельствует о достижении баланса тепловых потоков в изложнице независимо от изменения толщин и наличия покрытия. При использовании разделительного теплоизоляционного покрытия

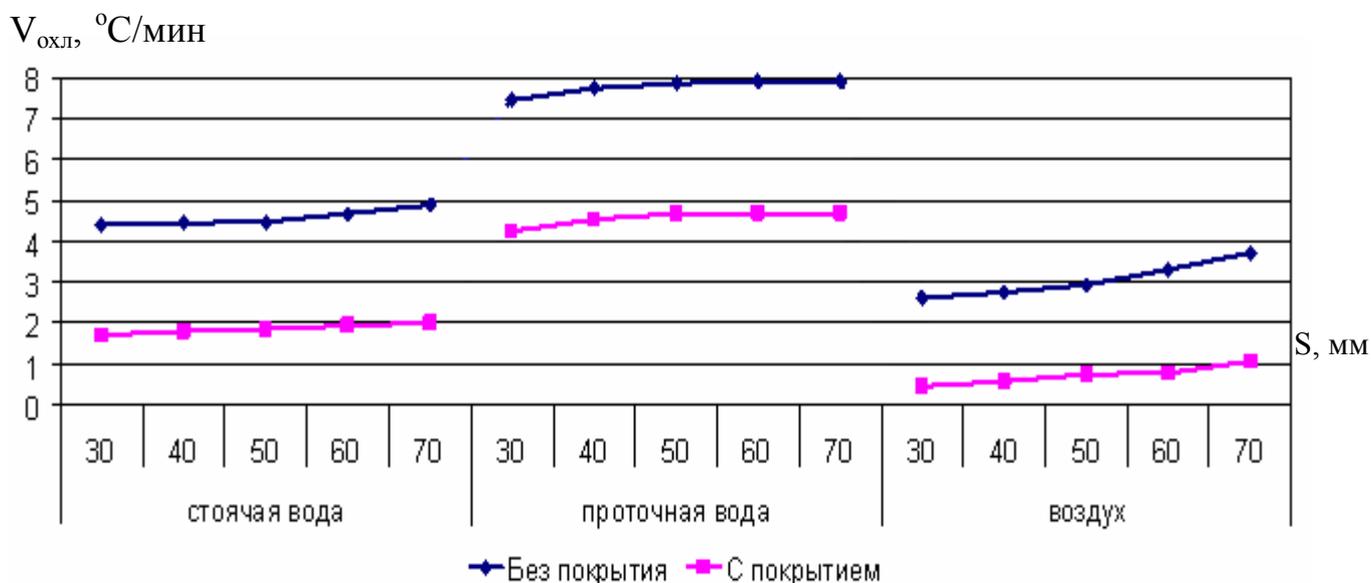


Рис. 6. Скорость охлаждения внутренней поверхности изложницы

с увеличением толщины стенок с 30 до 70 мм скорость охлаждения изложниц повышается благодаря большей теплоаккумулирующей способности её стенок, которые отбирают тепло быстрее даже через слой покрытия, чем отдают вовне.

По данным температурного анализа сформулирован механизм возникновения напряжений в изложнице. При заливке металла стенка изложницы подвергается воздействию температуры, которая фронтом проходит сквозь изложницу от внутренней до наружной поверхности. Этот процесс можно условно разделить на 3 этапа: нагрев внутренней поверхности, прогрев до середины стенки и полный прогрев от внутренней до наружной поверхности изложницы.

По установленной эпюре распределения температуры в стенке изложницы в определенный момент времени с начала заливки методом конечных элементов рассчитана трехосная схема напряжений, в которой по двум осям ОХ, ОZ напряжения находятся около нуля. Распределение температур в стенке изложницы и компонента нормальных напряжений по оси ОУ для трех этапов, представлены на рис. 7. Через 30 секунд после начала заливки, внутренняя и наружная поверхности испытывают напряжения сжатия 112 и 115 МПа соответственно, а центр стенки растянут с напряжением 87 МПа. При дальнейшем прогреве, через 2 мин с начала заливки, начинается выравнивание температур по сечению, идет снижение напряжений сжатия внутренней и наружной поверхностей до 23 и 25 МПа соответственно и напряжений растяжения центра стенки до 21 МПа. И заключительный этап, полный прогрев, через 4 минуты с начала заливки, характеризуется снижением растяжения центра стенки до 3 МПа и ослаблением сжатия внутренней и наружной поверхности до 2,5 МПа.

Проходя сквозь стенку изложницы, фронт тепла вызывает деформации с различными знаками, которые после прохождения фронта, постепенно снижаются. Таким образом, определяющим является скорость прохождения температурного фронта или внутренние перепады температур, которые определяются как разница перепадов между внутренней поверхностью и серединой стенки и серединой стенки и наружной поверхностью (рис. 8, формула (7)).

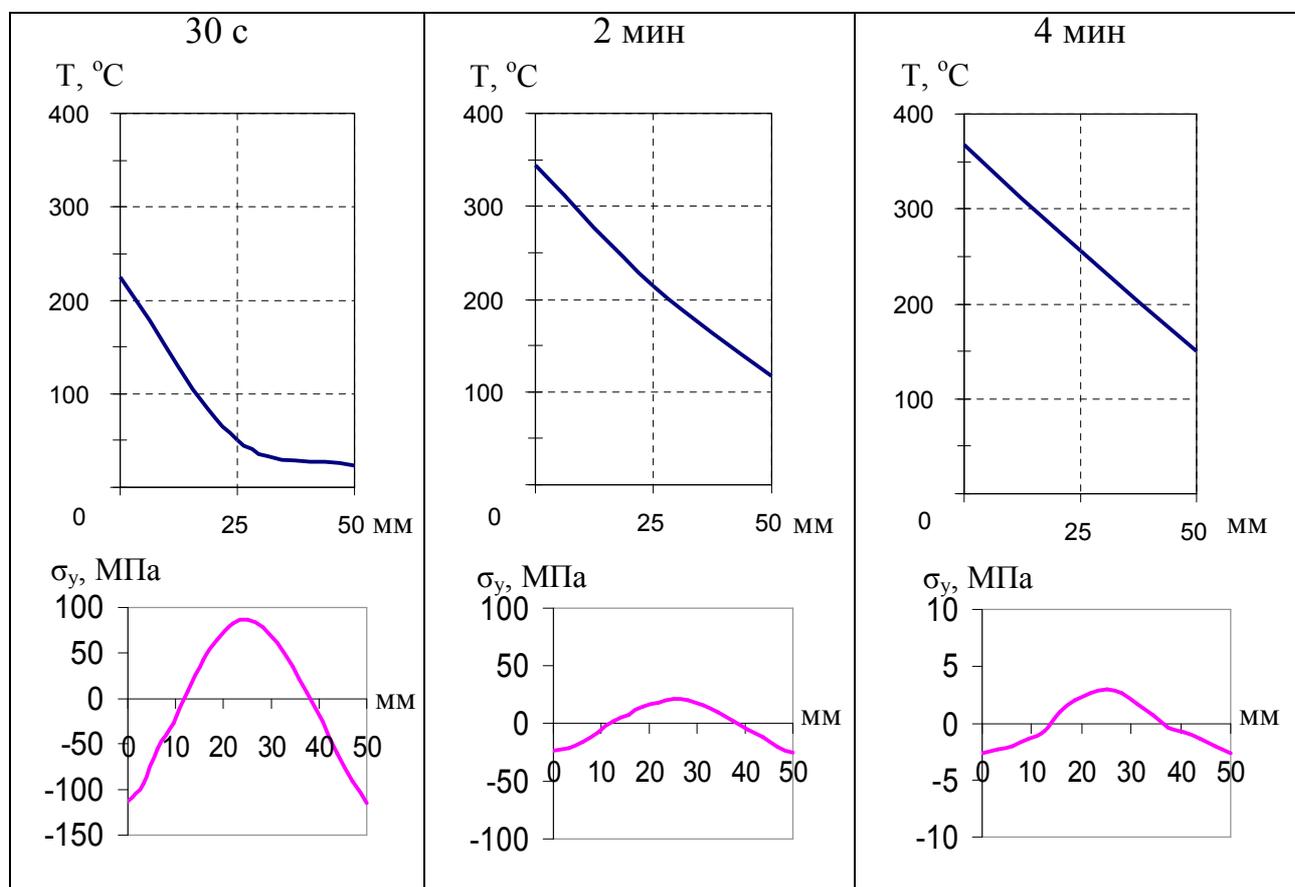


Рис. 7. Распределение температур и компонента нормальных напряжений по оси OY в стенке 50 мм изложницы при охлаждении проточной водой в период заливки

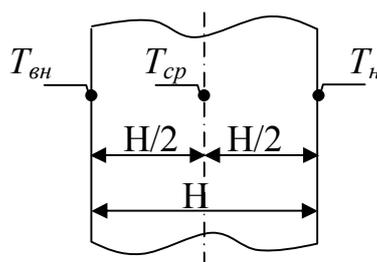


Рис. 8. Схема расчета внутреннего перепада температур

$$T_n = (T_{вн} - T_{ср}) - (T_{ср} - T_n), \quad (7)$$

где T_n – температура внутреннего перепада, °С;
 $T_{вн}$ – температура внутренней поверхности изложницы, °С;
 $T_{ср}$ – температура в середине стенки изложницы, °С;
 T_n – температура наружной поверхности изложницы, °С.

Чем больше такой перепад, тем меньшую стойкость изложницы можно ожидать, так как растягивающие напряжения центра действуют более длительное время. Поэтому более пластичный материал будет самым долговечным в этих условиях. Расчетные температуры внутреннего перепада для различных толщин стенок, режимов охлаждения и разделительного покрытия представлены на рис. 9.

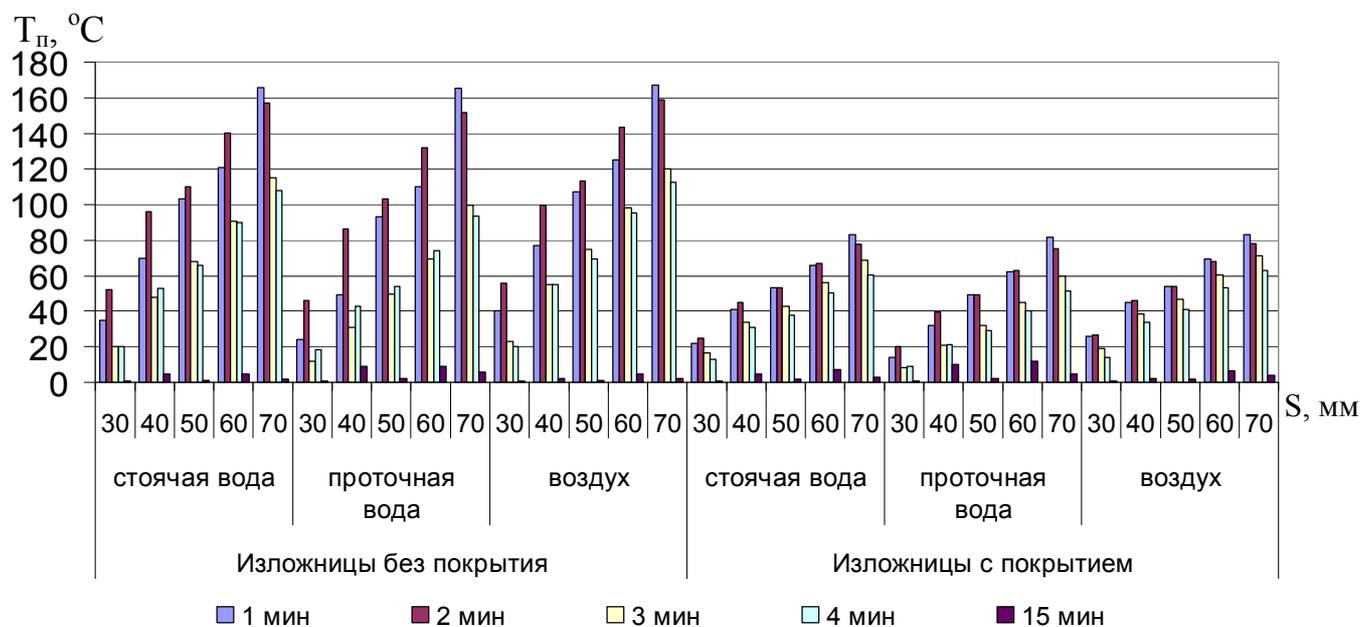


Рис. 9. Диаграмма внутреннего перепада температур

Хорошо видно, что уже в первые 4 минуты заливки происходит прогрев и снижение внутреннего перепада, который через 15 минут близок к нулю. Увеличение толщины стенки сопровождается запаздыванием во времени прогрева середины стенки изложницы, что повышает внутренний перепад, а значит, растягивающие напряжения середины стенки изложницы действуют более длительное время.

Определена критическая температура, при которой происходят деформации текучести в условиях жестко закрепленного образца и его одностороннего нагрева. Такое условие соответствует первичному нагреву изложницы, когда вокруг прогретого участка большое количество холодного металла, который не дает расширяться. Для чугунов марок СЧ20, ВЧ45, ВЧ50 критические температуры $\Delta T_{кр}$ равны соответственно 117, 180, 202 °С. Так как изложница не закреплена жестко, то по мере прогрева не представляется возможным использовать это предельное значение, в связи с изменением условий области его применения.

Таким образом, при различных режимах охлаждения без разделительного теплоизоляционного покрытия изложницы с толщиной стенки более 50 мм имеют перепад больше критического, что косвенно свидетельствует о возникновении в них пластических деформаций. Поэтому такие изложницы будут иметь низкую стойкость. В то же время, использование разделительного теплоизоляционного покрытия снижает первоначальный тепловой удар и не исключает из эксплуатации изложницы с толщиной стенки более 50 мм.

Основное условие эксплуатации изложниц на производстве – высокая скорость охлаждения блока цинка. Для этого сама изложница также должна иметь высокую скорость охлаждения. В связи с этими положениями представляется возможным рекомендовать оптимальные толщины стенок изложниц для каждого режима охлаждения. Но прежде необходимо отметить изложницы с толщинами стенок 60 и 70 мм, которые без разделительного теплоизоляционного покрытия имеют внутренний перепад больше критической температуры, приводящий к образованию пластической деформации. Такие изложницы изначально не могут

иметь высокую стойкость. При охлаждении на воздухе 30 мм внутренняя поверхность не только не охлаждается, но и нагревается, в то время как 50 мм за счет большей теплоаккумулирующей способности несколько снижает температуру внутренней поверхности и имеет более высокую скорость охлаждения. Охлаждение стоячей водой ускоряет процесс падения температуры, однако 30 мм стенка практически не остывает, и 50 мм толщина стенки изложницы также является наиболее оптимальной. Интенсивное охлаждение проточной водой не выделяет однозначного лидера между 30 и 50 мм стенками. Однако имеются свои особенности, так, 30 мм стенка имеет высокий градиент температур, а это значит, что поток воды охлаждает изложницу практически до внутренней поверхности. Такая изложница не накапливает в себе тепло, а сразу отдает его. Поэтому скорость охлаждения блока цинка будет сильно зависеть от равномерности охлаждения. В то время как 50 мм изложница в какой-то мере лишена этого, имеет более высокую, нежели 30 мм изложница, скорость охлаждения и средний градиент в группе.

Согласно формулам (4)–(6) представляется возможность рассчитать теоретическую термостойкость изложниц из чугуна СЧ20, ВЧ45 и ВЧ50. Пластическая деформация чугуна СЧ20 согласно справочным данным равна $\varepsilon_{пл} \approx 0,4\%$. А уровень предельных упругих деформаций, рассчитанный по формуле (6), равен $\varepsilon_v = 0,00158$ долей ед. Используя формулу (5) получаем теоретическую термостойкость чугуна СЧ20 $N = 3532$ заливок. Для высокопрочного чугуна ВЧ45 $\varepsilon_{пл} \approx 10\%$, $E = 16,5 \cdot 10^4$, $\varepsilon_v = 0,00273$ долей ед, а $N = 37\,667$ заливок. Для высокопрочного чугуна ВЧ50 $\varepsilon_{пл} \approx 7\%$, $E = 16,5 \cdot 10^4$, $\varepsilon_v = 0,00303$ долей ед, а $N = 24\,100$ заливок. При ежедневной заливке 15 блоков цинка получаем примерное время работы изложницы из чугуна СЧ20 0,7 года, ВЧ45 6,9 года, ВЧ50 4,4 года. Из этого следует, что термостойкость материала, даже СЧ20, значительно выше уровня наблюдаемой стойкости изложниц, и основной причиной выхода изложниц являются трещины, обусловленные дефектами литья.

Для выяснения наличия дефектов в изложнице был проведен компьютерный анализ с учетом параметров существующей технологии изготовления (температура заливки $1260\text{ }^\circ\text{C}$, продолжительность заливки 30 секунд) и геометрии изложницы (толщина стенки 50 мм), который выявил наличие обширной области усадочных дефектов в донной части изложницы и прилегающих стенках (рис. 10).

Для обеспечения стабильности техпроцесса необходимо рассмотреть возможность заливки изложницы продолжительностью 60 с. При таком режиме происходит локальный разогрев питателей и снижается температура металла, поступающего в прибыль, что способствует нарушению направленности затвердевания. В результате чего неизбежно образование усадочной пористости. Поэтому, применительно к параметрам существующей технологии, а именно продолжительности заливки 60 секунд, было принято решение придать равномерный уклон 3° на внешней стенке таким образом, чтобы толщина стенок изложницы изменилась от 50 мм у фланца до 63 мм в стыке с донной частью.

Компьютерный анализ измененной конструкции показал, что нарушения направленности затвердевания отливки не происходит, прибыли сработали полностью, усадочная раковина обнаруживается только в прибыли, и отсутствует усадочная пористость в донной части изложницы (рис. 11).

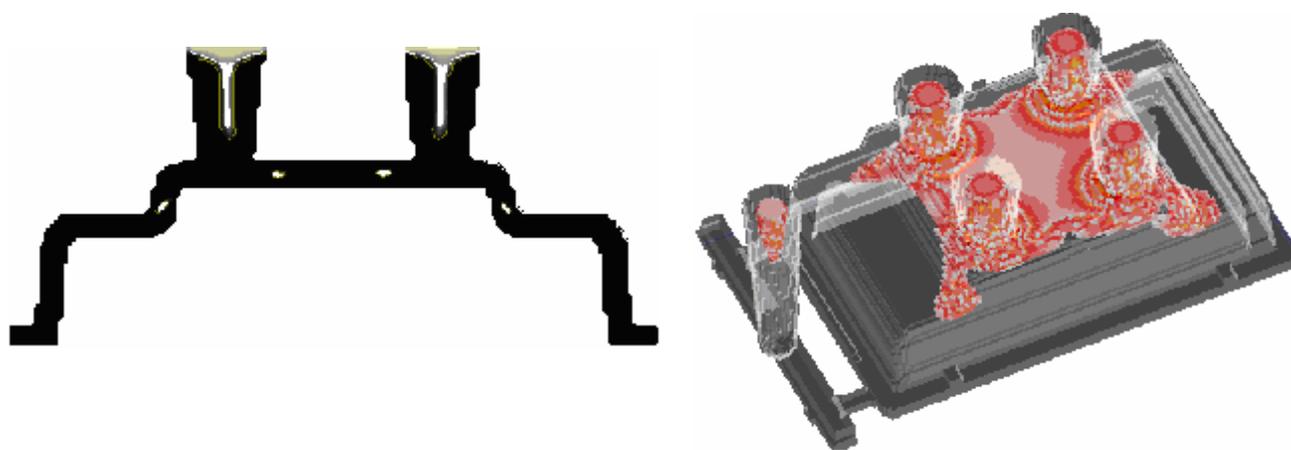


Рис. 10. Затвердевание базовой изложницы с толщиной стенки 50 мм

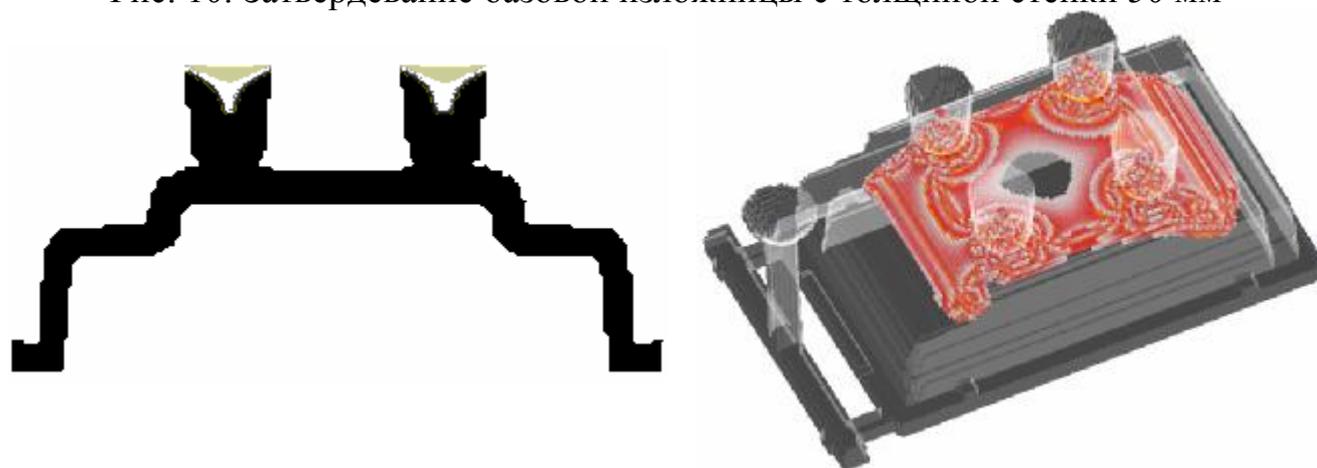


Рис. 11. Затвердевание измененной изложницы с равномерным уклоном в стенке 3°

Таким образом, равномерный уклон в 3° обеспечивает стабильность производства и гарантирует получение бездефектной изложницы при температурах заливки 1260–1280 °С и продолжительности заливки не более 60 с.

Кроме того, на основе контроля и фиксирования параметров выявлена связь стойкости с температурой заливки формы изложницы чугуном. Методом наименьших квадратов сформировано уравнение зависимости стойкости N от температуры заливки T . Коэффициент корреляции составил 0,701. Полученное уравнение для интервала $T = 1220–1340$ °С представлено ниже:

$$N=31,413T - 38685,527, \quad (8)$$

где N – стойкость изложниц, шт.; T – температура заливки, °С.

Полученная зависимость показывает, что с увеличением температуры заливки стойкость возрастает, что подтверждается снижением дефектности изложниц.

При переводе производства изложниц с серого чугуна на высокопрочный рационально изменение толщин стенок. Чем больше пластичность у материала, работающего в условиях теплосмен, тем больше его стойкость. Выбор чугуна ВЧ50 обусловлен относительной легкостью получения, высокой пластичностью и высоким уровнем теоретической стойкости, а также близкими по сравнению с ВЧ45 тепловыми параметрами. Для определения влияния толщин стенок изложницы использовались модели с толщинами 30, 50 и 70 мм с режимом охлаждения проточной водой (рис. 12, 13).

Интенсивный нагрев изложницы из ВЧ50 в период заливки сплава сменяется охлаждением, причем, чем толще стенка (рис. 12), тем охлаждение менее эффективно. Коэффициент температуропроводности у высокопрочного чугуна ВЧ50 примерно в 2 раза меньше, чем у серого СЧ20. Это является причиной невозможности быстро отвести тепло от изложницы в условиях охлаждения проточной водой и приводит к тому, что уровень напряжений в стенках, напрямую зависящий от перепада температур, растет с увеличением толщины её стенки.

Изложница в точке с толщиной стенки 30 мм, по сравнению с толщиной 50 мм, имеет температуры внутренней поверхности ниже на 2–15 °С, а внешней выше на 66–78 °С. Это приводит к меньшему перепаду в каждой из стенок и, соответственно, самому низкому уровню максимальных напряжений (94–100 МПа). Изложница с толщиной стенки 70 мм имеет внутренний перепад больше критического для чугуна марки ВЧ45 и равный критическому для чугуна ВЧ50 (рис.13).

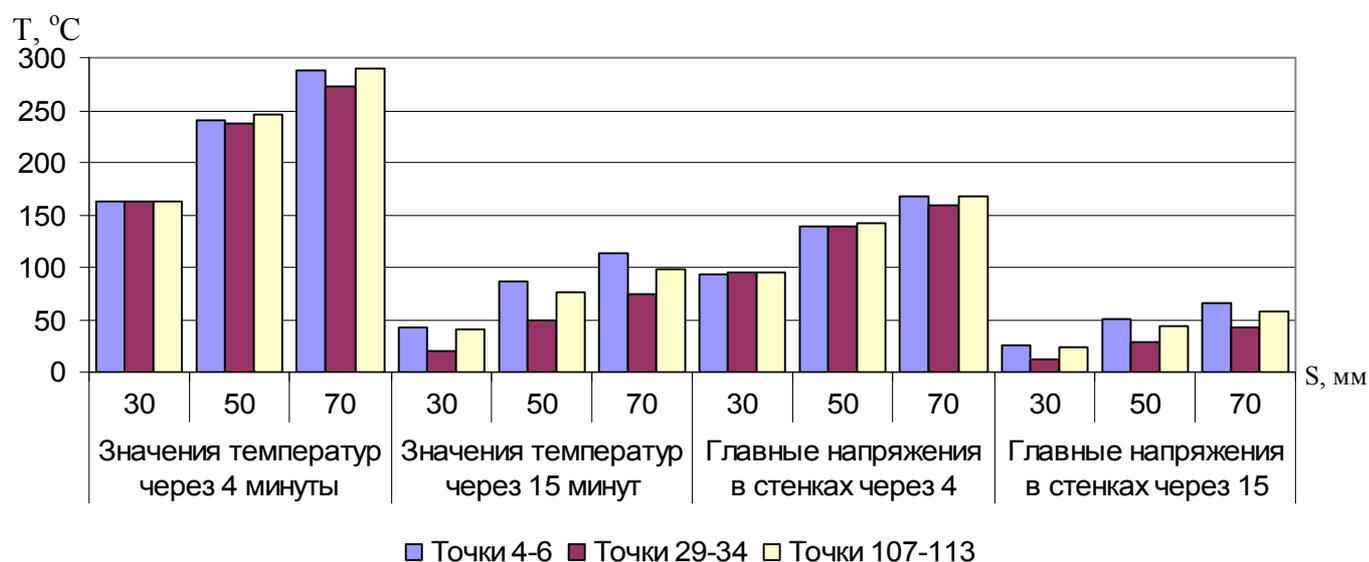


Рис. 12. Перепады температур и напряжения в стенках изложницы в различные моменты времени

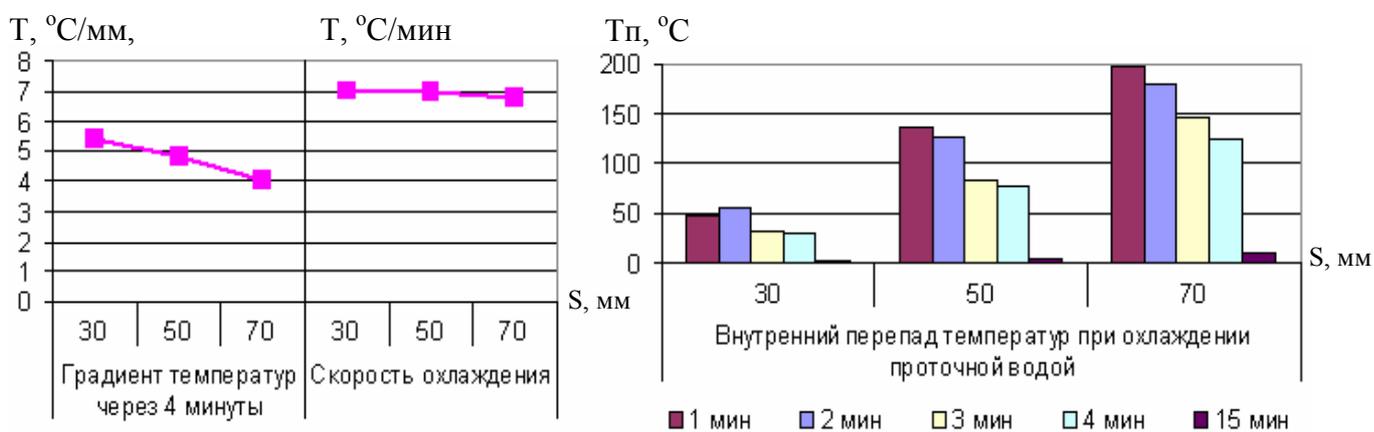


Рис. 13. Градиент температур, скорость охлаждения и внутренний перепад температур при охлаждении изложницы проточной водой в различные моменты времени при толщинах стенок 30, 50 и 70 мм

Таким образом, представленные перепады температур, уровни напряжений, градиент и скорость охлаждения, а также их изменение во времени показали, что оптимальным с позиции скорости охлаждения блока цинка и стойкости изложниц являются для чугуна СЧ20 толщины стенок 50 мм при охлаждении на воздухе и в стоячей воде, а при охлаждении в проточной воде – 30 и 50 мм. Установлено, что при переходе с серого чугуна на высокопрочный при охлаждении в проточной воде оптимальным является и 30-ти, и 50-ти миллиметровая изложница.

В пятой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний производства и эксплуатации изложниц с применением рекомендаций, описанных в главе 4. Снижение дефектности изложниц и постоянный визуальный контроль за производством позволил увеличить максимальную стойкость изложниц до 3354 заливок, что близко к расчетной стойкости, при средней стойкости из 20-ти изложниц 1311 заливок (см. таблицу).

Ведомость стойкости изложниц в КЭЦ по измененной технологии

№ п/п	№ изложницы	Кол-во заливок, шт	Расход изложниц, кг/т	Средняя стойкость, шт	Средний расход, кг/т
1	10	3354	0,24	1542	1,05
2	11	2546	0,32		
3	12	1157	0,71		
4	13	212	3,87		
5	14	1182	0,69		
6	15	754	1,09		
7	16	2694	0,30		
8	17	547	1,50		
9	18	563	1,46		
10	19	2407	0,34		
11	20	1910	0,43		
12	21	1194	0,69		
13	22	221	3,71		
14	23	1251	0,66		
15	24	1189	0,69		
16	25	1470	0,56		
17	26	483	1,70		
18	27	1889	0,43		
19	28	609	1,35		
20	29	579	1,42		

Комплекс мер по повышению стойкости изложниц обеспечил получение суммарного ожидаемого годового экономического эффекта в размере 2,033 млн. руб. (в ценах января 2006 г.). Использование описанных методик и механизмов возможно как при литье однотонных блоков цинка, так и при литье в кокиль, а также в любые металлические формы различных сплавов, где происходит односторонний нагрев и последующее охлаждение на воздухе, в проточной или стоячей воде.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Средний уровень стойкости изложниц для литья однотонных цинковых блоков не удовлетворяет производство и составляет менее 900 заливок при среднем расходе около 2 кг на тонну цинка. Заметное влияние на стойкость изложниц оказывает их высокая дефектность, которая обуславливает образование трещин и приводит к их отбраковке до 24% в начальной стадии эксплуатации (до 400 заливок). Установлены зависимости стойкости изложниц от параметров технологического процесса их изготовления, так повышению стойкости на 100 заливок способствует повышение температуры заливки чугуна на 3,2 °С в интервале 1220–1340 °С.

2. Разработана математическая модель на основе метода конечных разностей для расчета тепловых полей в пределах полного рабочего цикла. Разработана аналитическая математическая модель определения полей напряжений в стенке изложницы на основе распределения температурных полей. Проведена экспериментальная проверка адекватности математической модели расчета температурных полей. Адекватность подтверждена по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Определена теоретическая термостойкость изложниц из чугунов марок СЧ20, ВЧ45, ВЧ50, которые составили соответственно 3532, 37 667, 24 100 заливок.

3. На основе численного моделирования выделены оптимальные толщины стенок для различных режимов охлаждения. Установлено, что изложницы с толщинами стенок 60 и 70 мм имеют меньшую стойкость, так как медленнее других прогреваются, а значит, высокие напряжения растяжения центра стенки действуют более длительное время. При охлаждении на воздухе и в стоячей воде оптимальной является 50 мм изложница, так как 30 мм за счет недостаточной теплоаккумулирующей способности сильно разогревается и медленно остывает, а в случае охлаждения воздухом внутренняя поверхность, не только не остывает, но и нагревается, что недопустимо с позиции скорости охлаждения блока цинка. При охлаждении проточной водой допустимо использовать как 30, так и 50 мм изложницы. Однако скорость охлаждения блока цинка в случае 30 мм стенки в большей мере зависит от равномерности охлаждения.

4. Определен механизм возникновения напряжений в стенке изложницы. При первоначальном нагреве, внутренняя и наружная поверхности испытывают напряжения сжатия 112 и 115 МПа соответственно, а центр стенки растянут с напряжением 87 МПа. При дальнейшем прогреве начинается выравнивание температур по сечению, идет снижение напряжений сжатия внутренней и наружной поверхностей до 23 и 25 МПа соответственно и напряжений растяжения центра стенки до 21 МПа. И заключительный этап, полный прогрев, через 4 минуты с начала заливки, характеризуется снижением растяжения центра стенки до 3 МПа и ослаблением сжатия внутренней и наружной поверхности до 2,5 МПа. Таким образом, определяющей является скорость прохождения через стенку изложницы фронта температуры или внутренние перепады температур.

5. Методом математического моделирования установлены закономерности возникновения усадочной пористости в изложницах при их изготовлении, которые провоцируют образование сквозных трещин в изложницах на ранней стадии их эксплуатации (до 400 заливок), поэтому для устранения дефектности стенкам изложницы придали равномерный уклон в 3° от фланца к донной части с целью

обеспечения направленности затвердевания и улучшения питания донной части. Такое изменение привело к снижению брака изложниц с 24% до 13%.

6. Повышение термостойкости изложниц дополнительно возможно за счет использования теплоизоляционного разделительного покрытия, а также замены серого чугуна СЧ20 высокопрочным ВЧ45, ВЧ50, обладающим повышенной термоусталостной прочностью и пластичностью. С целью выравнивания температурных полей предложена новая схема подвода проточной воды, обеспечивающая меньшие температурные перепады между отдельными участками изложниц.

7. Разработанные технологии изготовления и эксплуатации изложниц прошли промышленное опробование на ОАО «ЧЦЗ», ЗАО «Поликом» (г. Челябинск). Полученные данные подтверждают целесообразность их дальнейшего применения для повышения качества изготовления и стойкости изложниц, снижения его себестоимости. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанных технологий составил 2,033 млн. руб. (в ценах января 2006 г.).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Иванов, М.А. Использование метода конечных разностей для описания температурного поля работы изложницы [текст]/ М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // Авиационно-технологические системы: Межвузовский сборник научных трудов. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2004. – С. 188–194.

2. Иванов, М.А. Влияние технологических параметров литья изложниц на их стойкость [текст]/ М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». Выпуск 4. – 2004. – № 8(37). – С. 103–106.

3. Швецов, В.И. Повышение стойкости изложниц для цинковых блоков [текст]/ В.И. Швецов, Б.А. Кулаков, М.А. Иванов // Литейщик России. – 2005. – № 10. – С. 40–43.

4. Иванов, М.А. Работоспособность изложниц из высокопрочного чугуна при литье цинка [текст]/ М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // Литейщик России. – 2006. – № 9. – С. 18–21.

5. Иванов, М.А. Температурные поля изложницы при литье однотонных блоков цинка [текст]/ М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». Выпуск 6. – 2005. – № 10(50). – С. 99–101.

Иванов Михаил Александрович

ЧУГУННЫЕ ИЗЛОЖНИЦЫ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ
ДЛЯ ЛИТЬЯ ЦИНКОВЫХ БЛОКОВ

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 11.04.2007. Формат 60*84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ 84/21.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск,
пр. им. В.И. Ленина, 76.