



УДК 621.746

Поступила 18.11.2015

КОНСТРУКЦИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ДЛЯ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНА CRYSTALLIZER DESIGN FOR SEMI-CONTINUOUS MOLDING OF CAST IRON UNITS

*А. Н. КРУТИЛИН, П. Е. ЛУЩИК, А. А. АНДРИЦ, Л. П. ДОЛГИЙ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь*

*A. N. KRUTILIN, P. E. LUSHCHIK, A. A. ANDRITS, L. P. DOLGIJ,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

Рассмотрены основные технологические параметры, оказывающие влияние на коробление кристаллизатора при полунепрерывном литье чугуна. Проведен анализ конструктивных особенностей кристаллизатора на его коробление. На основании теоретического анализа в системе моделирования ProCast определена оптимальная конфигурация рабочей гильзы кристаллизатора.

The key technological parameters having impact on a crystallizer contraction at semi-continuous molding of cast iron are considered. The analysis of design particularities of a crystallizer on its contraction is carried out. On the basis of the theoretical analysis in ProCast system of modeling the optimum configuration of a working liner of a crystallizer is defined.

Ключевые слова. *Непрерывное литье, формирование отливки, кристаллизатор, коробление.*

Keywords. *Continuous molding, casting formation, crystallizer, contraction.*

При фундаментальном подходе к процессу формирования литой заготовки при непрерывном литье требуется анализ всего комплекса происходящих в ней термодинамических, гидродинамических, диффузионных и тепловых явлений, а также процессов, оказывающих влияние на изменение геометрии рабочей поверхности кристаллизатора, особенно в зоне формирования начальной корки.

Кристаллизатор является основным технологическим узлом установки непрерывного литья, в котором происходит формирование отливки, его конструкция в значительной мере определяет стабильность процесса, качество получаемых заготовок и технико-экономическую эффективность применения технологического процесса.

Одним из наиболее важных условий совершенствования конструкции кристаллизаторов является понимание происходящих в нем процессов. Основные требования к кристаллизатору – обеспечить максимальный отвод тепла от затвердевающей заготовки и получить на выходе из кристаллизатора достаточную толщину корки, которая позволит вести процесс с максимально допустимой скоростью литья. Естественно, что производительность установки и качество заготовки во многом определяется тем, насколько кристаллизатор удовлетворяет всем технологическим требованиям.

Проведенный ранее анализ доминирующих факторов, оказывающих влияние на стабильность процесса, показал, что основную роль в процессе формирования оказывают температурные условия, а влияние напряжений, возникающих от действия ферростатического давления и трения отливки о стенки кристаллизатора, носит второстепенный характер.

На начальной стадии формирования корки при непосредственном контакте жидкого металла и водоохлаждаемой стенки кристаллизатора интенсивность теплообмена между отливкой и кристаллизатором максимальная. Экспериментальные исследования показывают, что плотного контакта между поверхностью заготовки и стенками кристаллизатора не существует. Периодический контакт затвердевающей отливки со стенками кристаллизатора как по высоте, так и периметру заготовки ведет к образованию неравномерного фронта затвердевания, происходит искажение геометрии отливки.

При дальнейшем движении слитка в кристаллизаторе между корочкой и стенками кристаллизатора происходит образование газового зазора, возрастает термическое сопротивление, интенсивность теплообмена падает. Характер изменения газового зазора оказывает влияние как на температурное поле по сечению заготовки, так и на развитие усадочных процессов, что ведет к образованию значительных напряжений и возникновению деформации в затвердевающей отливке, которые увеличивают вероятность образования дефектов типа зависаний, искажения геометрии отливки и т. д.

На образование разнотолщинности непрерывнолитой заготовки оказывают влияние неравномерная подача металла по периметру заготовки, а также динамическое воздействие падающей струи расплава на затвердевающую корку. С повышением температуры перегрева расплава и скорости истечения струи неравномерность фронта затвердевания возрастает.

Изменение размеров отливки происходит не только при охлаждении, но и в результате силового взаимодействия отливки и кристаллизатора. Величина газового зазора между отливкой и кристаллизатором зависит от технологических параметров литья и конструктивных особенностей кристаллизатора.

При непрерывной разливке стали используются кристаллизаторы с уменьшением размеров по направлению движения слитка, что обусловлено желанием компенсировать усадку сплава с целью увеличения интенсивности теплообмена между отливкой и кристаллизатором.

Широкое использование графита на установках вертикального полунепрерывного литья сдерживается его высокой стоимостью и повышенным износом. Применение кристаллизаторов с металлическими рабочими втулками позволило значительно увеличить срок службы кристаллизаторов. Общеизвестно, что лучшим материалом, удовлетворяющим условиям работы кристаллизатора, является медь. Однако эксперименты, проведенные в лабораторных условиях, показали, что материал кристаллизатора не оказывает заметного влияния на скорость затвердевания металла в кристаллизаторе. Интенсивность охлаждения, а, следовательно, и скорость кристаллизации зависит от теплопроводности материала только в начальный момент при непосредственном контакте расплавленного металла с рабочей поверхностью кристаллизатора. Продолжительность этого контакта незначительна из-за усадочных процессов, происходящих в затвердевающей отливке. Высокое термическое сопротивление газового зазора между отливкой и кристаллизатором значительно снижает влияние материала рабочей втулки кристаллизатора на скорость кристаллизации.

При вертикальном полунепрерывном литье чугуна сборные кристаллизаторы со стальными рабочими втулками выдерживают до заметного коробления 250–300 заливок, т. е. почти в 1,5 раза меньше, чем с медными. Изменение качества отливки при переходе с медной втулки на стальную в процессе эксплуатации на промышленных установках не обнаружено. С экономической точки зрения все это дает основание рекомендовать для промышленного использования, особенно при получении цилиндрических заготовок, кристаллизаторы сборной конструкции с рабочими втулками из малоуглеродистой стали.

Наряду с материалом рабочей втулки на стойкость кристаллизатора и интенсивность охлаждения оказывает система водяного охлаждения. Конструкция кристаллизатора должна обеспечивать равномерное охлаждение рабочей втулки кристаллизатора по периметру. Интенсивность теплообмена определяется расходом воды и величиной проходного сечения между кожухом кристаллизатора и рабочей втулкой. Экспериментальные исследования показали, что скорость протекания воды, обеспечивающая пузырьковый режим кипения, для кристаллизатора диаметром 100 мм достигается при величине зазора 3 мм и расходе воды 4,5 л/с. С увеличением диаметра кристаллизатора расход воды должен быть увеличен. Температура воды на выходе из кристаллизатора не должна превышать 40–50 °С. Нарушение геометрической формы рабочей поверхности кристаллизатора в процессе эксплуатации способствует возникновению «зависаний корки».

В зоне формирования начальной корки коробление втулки максимальное. Градиент температуры по толщине рабочей втулки в этой зоне на участке длиной ~100 мм достигает максимума (на 50–100 °С выше, чем в других зонах кристаллизатора), соответственно и термические напряжения в этой зоне больше. По мере движения затвердевающей заготовки в кристаллизаторе градиент температуры по толщине втулки падает. Для предотвращения образования поверхностных дефектов в зоне «зависаний», а также возможного заклинивания чугунной заготовки гильза кристаллизатора должна иметь увеличение внутреннего диаметра в сторону движения слитка.

Кроме того, необходимо учесть, что в чугунах в процессе затвердевания наряду с усадкой происходит предкристаллизационное или так называемое предусадочное расширение, которое связывают с выделением свободного графита из расплава (~0,25%).

Проведена серия экспериментов по выбору оптимальной величины конусности рабочей втулки кристаллизатора. Опробованы кристаллизаторы диаметром 100 мм с разницей по диаметру между верхом и низом в 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, и 1,0 мм при высоте кристаллизатора 200 мм. Наилучшие результаты получены на кристаллизаторах с $\Delta d = 0,6$ мм. Величину $\Delta d = 0,8$ мм следует считать предельной, так как дальнейшее увеличение размера привело к значительному увеличению количества прорывов металла на выходе из кристаллизатора.

Результаты проведенных исследований были положены в основу конструирования кристаллизатора для промышленной установки. В ходе предварительных экспериментов были испытаны кристаллизаторы сварной и сборной конструкции. Вынужденная односторонняя подача расплавленного металла приводит к более быстрому выходу из строя кристаллизатора сварной конструкции по причине коробления. Если для отливок диаметром 100 мм стойкость сварного кристаллизатора до расточки составляет 200–250 заливок, то односторонний подвод металла сокращает этот период до 120–150 заливок, что недостаточно для условий промышленной эксплуатации. Сложность механической обработки, сравнительно низкая стойкость, а также ограниченность использования различных цветных металлов и сплавов в качестве материала для рабочей втулки кристаллизатора привели к необходимости разработки кристаллизатора сборной конструкции.

Кристаллизатор сборной конструкции представляет собой достаточно жесткую металлоконструкцию, воспринимающую основные механические нагрузки, он состоит из рабочей втулки, охлаждающего кожуха с коллектором и патрубками для равномерного подвода воды, крепежных фланцев. Кристаллизатор комбинированного типа позволил провести большой объем экспериментальных работ по определению оптимальных технологических параметров процесса.

Постоянный контроль за характером коробления рабочей втулки кристаллизатора позволил установить зоны, в которых вытягиваемый слиток отрывается от стенок кристаллизатора, и где наиболее плотный контакт. Описанная картина тепловой работы кристаллизатора достаточно точно отражает особенности технологического процесса.

Из опыта работы на установке полунепрерывного литья установлено, что деформированный профиль кристаллизатора имеет характерную бочкообразную форму с сужением в зоне формирования начальной корки.

Для того чтобы уменьшить коробление кристаллизатора в зоне формирования начальной корки, опробованы два варианта конструкции втулки: с поперечными ребрами жесткости и выступающими бобышками. На рис. 1, 2 приведены трехмерные изображения анализируемых вариантов.

Математическое моделирование в системе ProCast при одинаковых технологических параметрах литья в медный кристаллизатор позволило теоретически определить распределения температур в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора (рис. 3, 4) и твердой фазы в отливке (рис. 5).

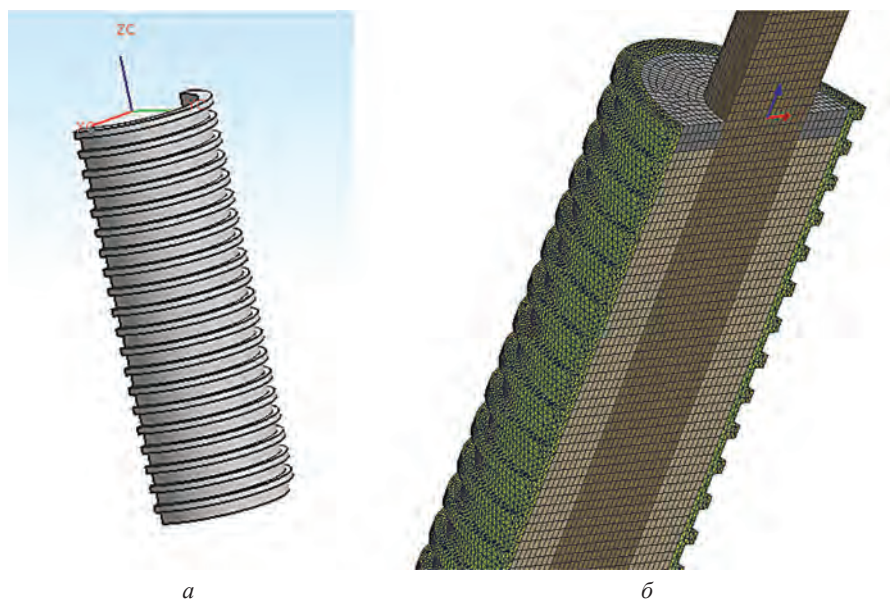


Рис. 1. Трехмерная модель кристаллизатора с ребрами (а) и конечно-элементная модель системы «отливка-кристаллизатор-стержень» (б)

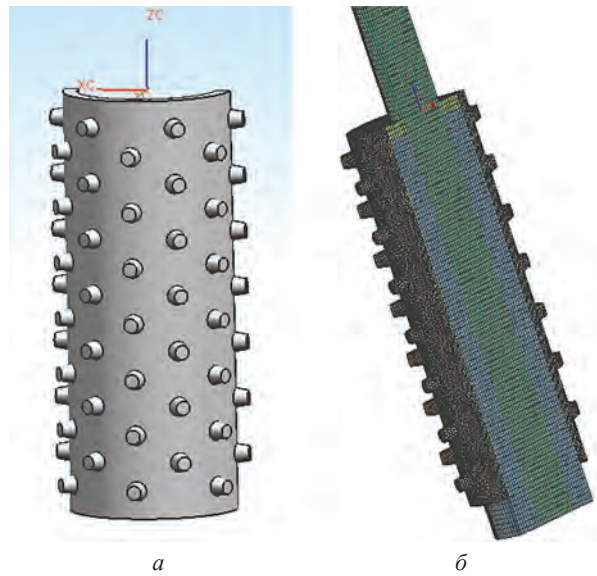


Рис. 2. Трехмерная модель кристаллизатора с бобышками (а) и конечно-элементная модель системы «отливка-кристаллизатор-стержень» (б)

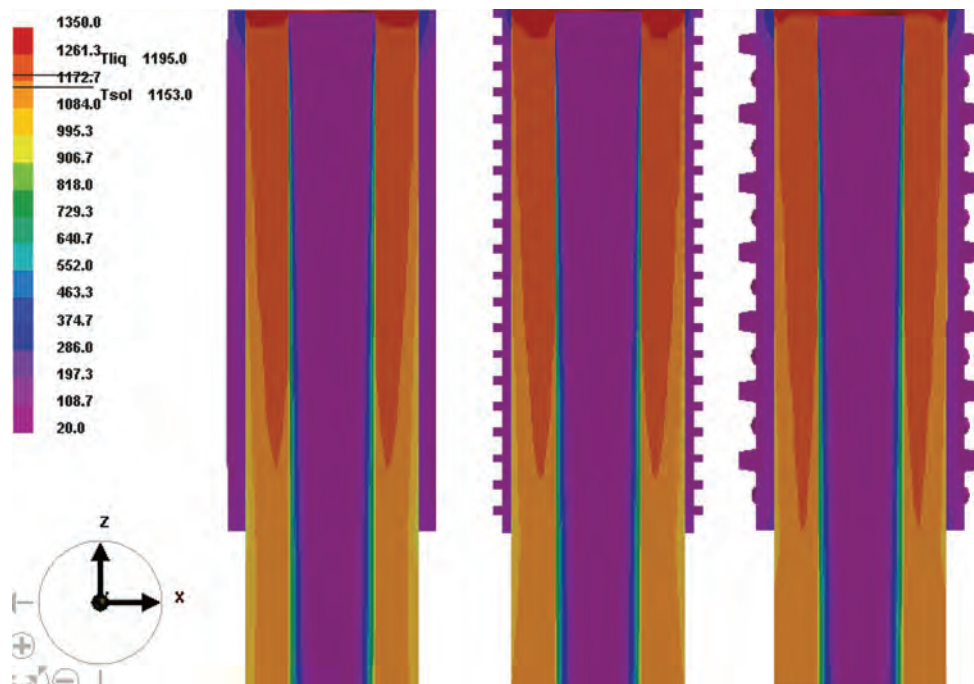


Рис. 3. Распределение температур в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что независимо от изменения конфигурации наружной поверхности рабочей втулки кинетика кристаллизации и распределение температур по высоте отливки практически остаются неизменными. Данный факт подтверждается экспериментальными исследованиями. Факторами, которые оказывают большое влияние на коробление кристаллизатора, являются конструктивные особенности кристаллизатора, в первую очередь это относится к креплению медной рабочей втулки в стальном кожухе кристаллизатора. В процессе экспериментальных исследований опробованы два варианта крепления: жесткое защемление только верхней части рабочей втулки и жесткое двухстороннее защемление. На рис. 6 приведены расчетные данные эффективных напряжений в плоском кристаллизаторе, кристаллизаторе с поперечными ребрами и бобышками при двухстороннем защемлении. Характерной особенностью конфигурации рабочей втулки кристаллизатора в верхней части является бочкообразная форма и расширяющаяся юбка в нижней части втулки ниже места защемления. Деформации кристаллизатора при закреплении в верхней и нижней части приведены на рис. 7.

Наименьшие напряжения и минимальные деформации имеют место при двухстороннем защемлении у кристаллизатора с рабочей втулкой, выполненной с поперечными ребрами.

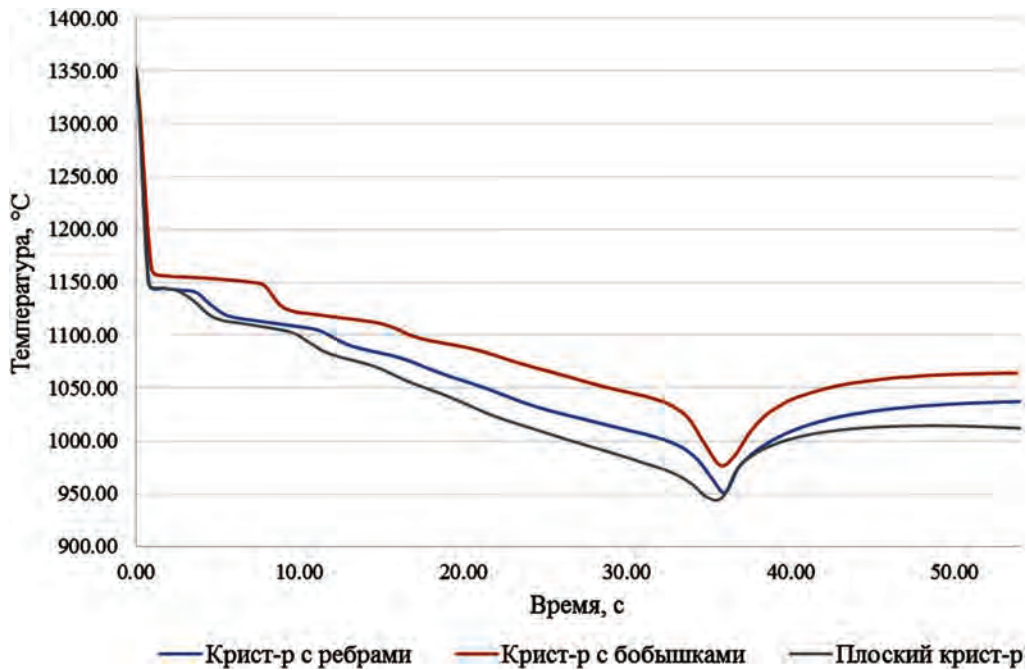


Рис. 4. Изменение температур на поверхности отливки при использовании различных конструкций кристаллизатора

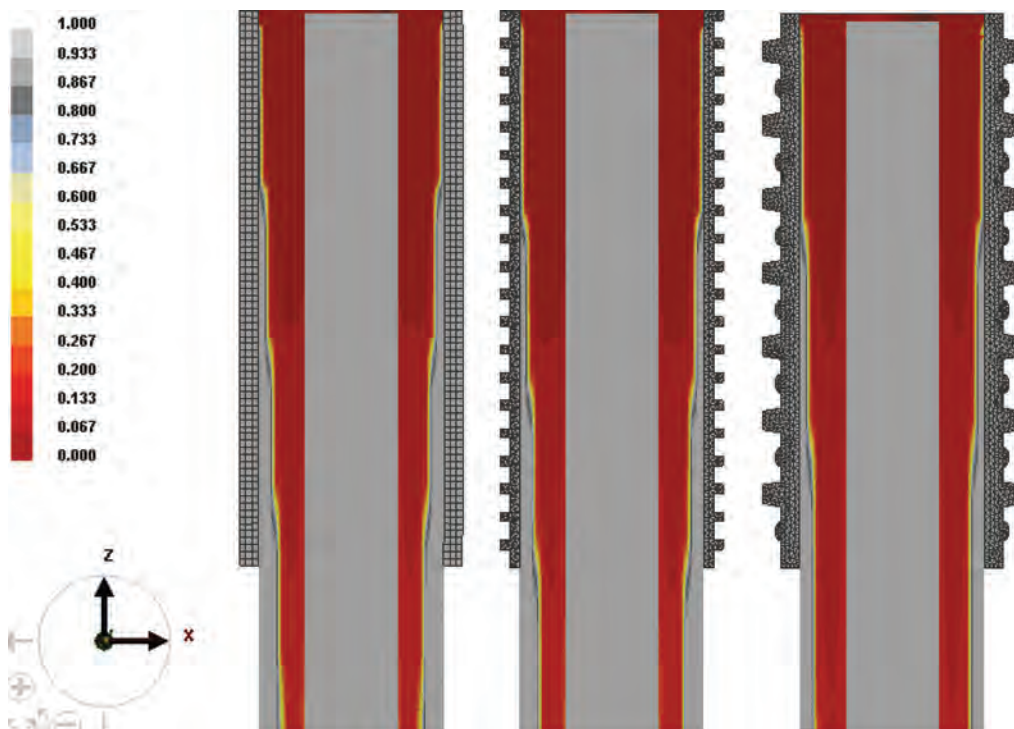


Рис. 5. Распределение твердой фазы в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

На рис. 8 представлены расчетные данные относительной стойкости рабочей втулки кристаллизатора с защемлением в верхней и нижней части. Относительная стойкость рабочей втулки с поперечными ребрами выше, чем при литье в кристаллизатор без ребер и кристаллизатор с бобышками.

Аналогичные расчеты (рис. 9–15) проведены и для случая одностороннего защемления в верхней части рабочей втулки кристаллизатора. Однозначно можно утверждать, что использование только верхнего крепления позволяет существенно уменьшить процесс коробления рабочей втулки. Изменение температур на поверхности отливки и величины зазора между отливкой и кристаллизатором для трех вариантов исполнения рабочей втулки практически идентично. Возникающие напряжения и связанные с ними деформации значительно уменьшаются. Относительная стойкость кристаллизатора с верхним защемлением и поперечным оребрением существенно выше, чем в случае двухстороннего защемления.

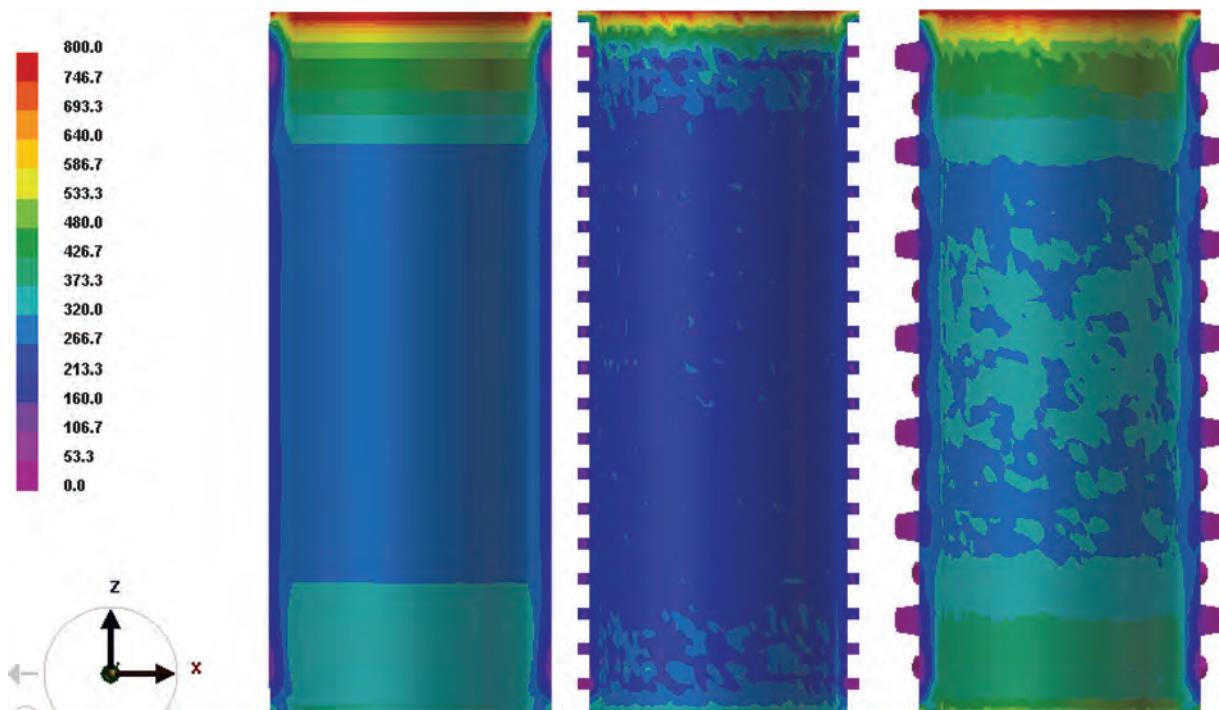


Рис. 6. Эффективные напряжения в кристаллизаторе в зависимости от конструкции при закреплении в верхней и нижней части. $\times 50$

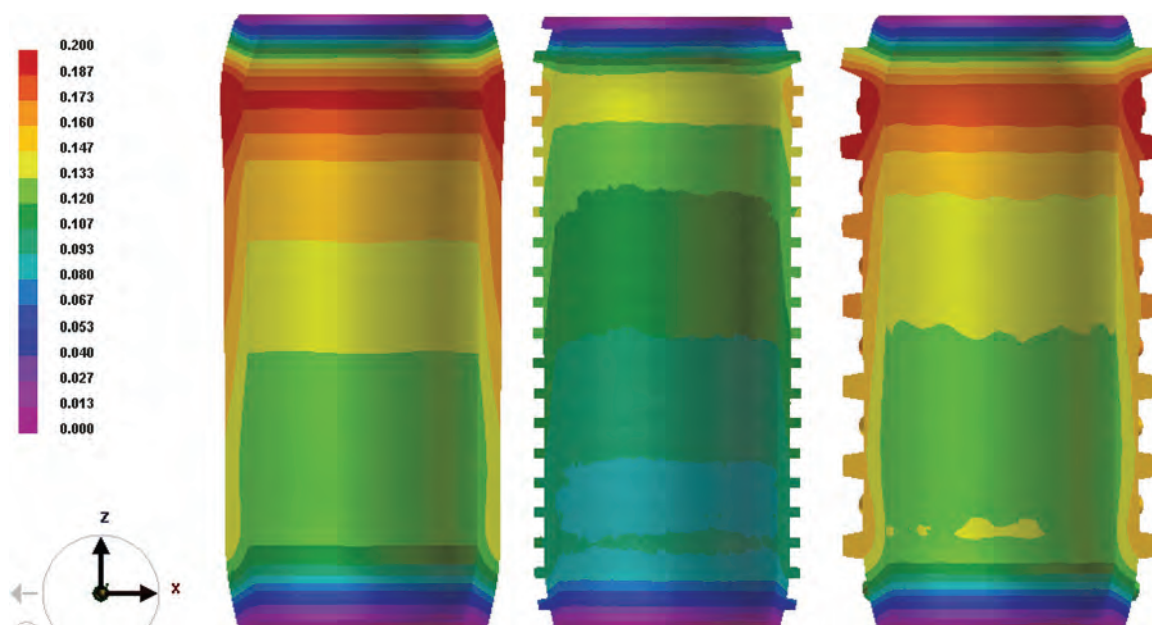


Рис. 7. Деформации кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении в верхней и нижней части. $\times 50$

Коробление медной втулки кристаллизатора в процессе эксплуатации подтверждает теоретические положения о зонах взаимодействия отливки и стенок кристаллизатора во время разливки.

Уменьшение газового зазора между отливкой и кристаллизатором положительно сказывается на скорости извлечения заготовки и, несмотря на то что в пределах кристаллизатора отводится до 30% теплоемкости жидкого расплава, стабильность процесса литья должна возрастать. Однако минимизация этого зазора ведет к увеличению силы трения, что может стать причиной нарушения стабильности процесса.

Практика показывает, что скорость коробления рабочей втулки со временем уменьшается по мере приближения рабочей поверхности к определенной форме.

Изучение процесса получения заготовок прямоугольного сечения показывает, что характер деформации в сравнении с цилиндрическими заготовками практически не изменяется, однако проблема состоит

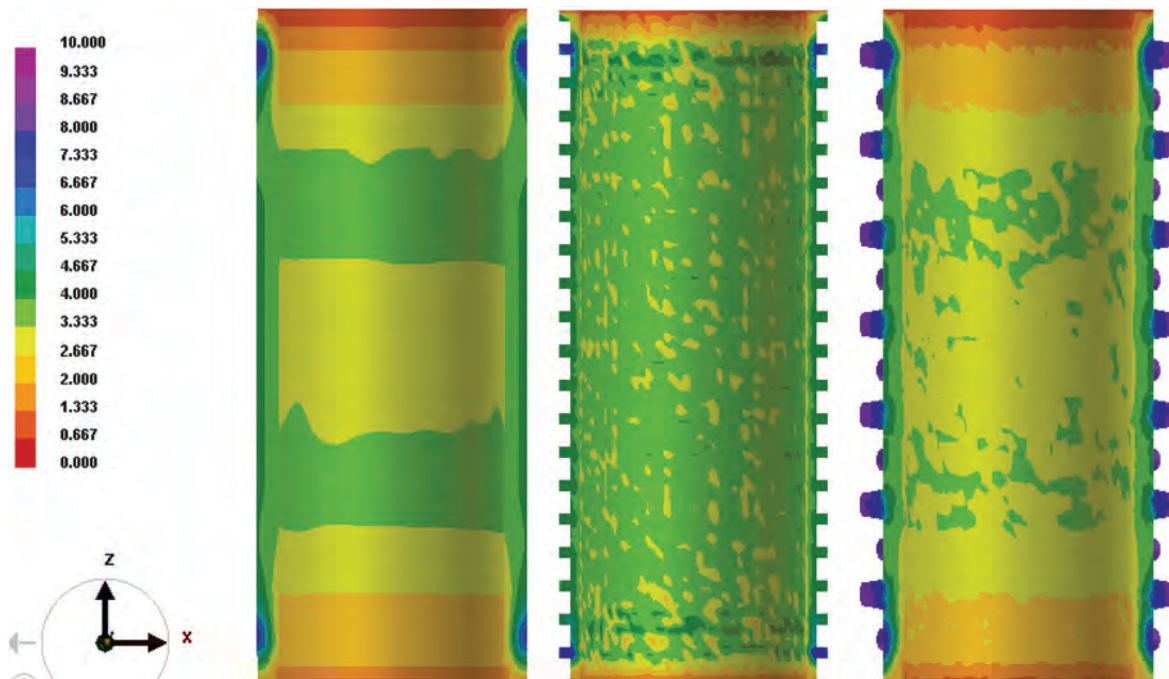


Рис. 8. Относительная стойкость кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении в верхней и нижней части

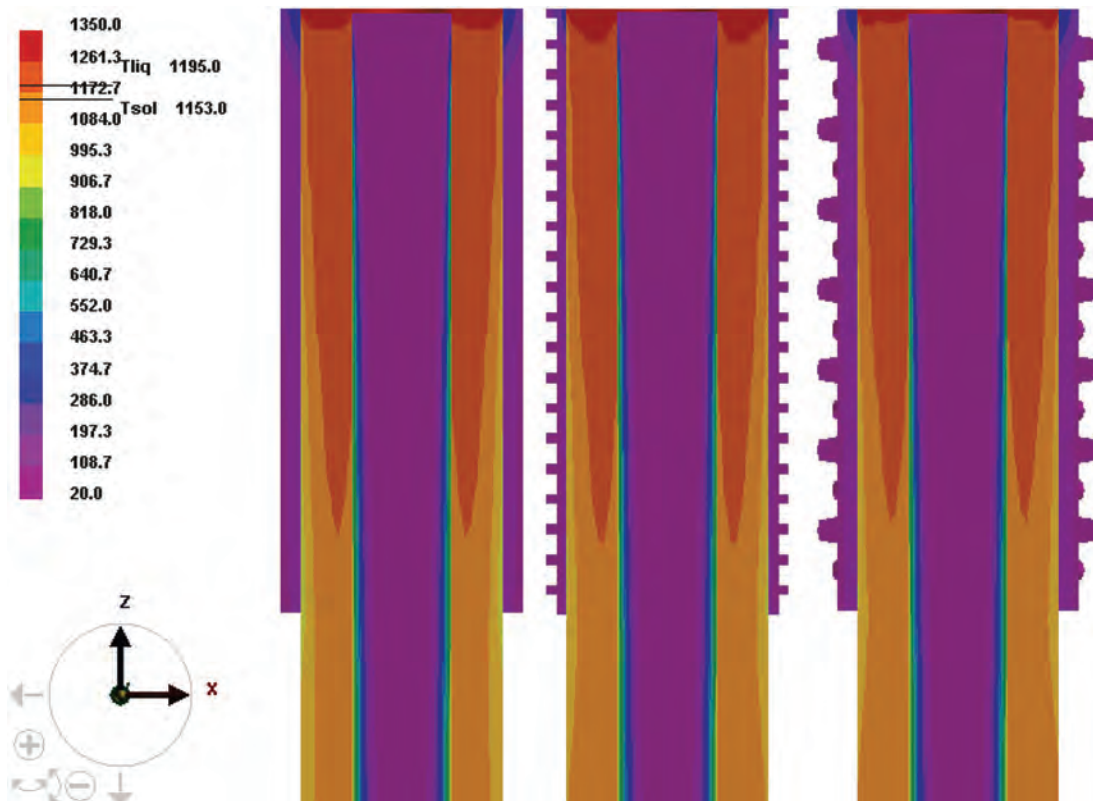


Рис. 9. Распределение температур в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

в увеличении скорости затвердевания и охлаждения затвердевающей заготовки в углах. При литье заготовок из чугуна с низким углеродным эквивалентом в углах заготовок появляется цементит, что вызывает необходимость в проведении высокотемпературного отжига.

Для обеспечения равномерного затвердевания заготовки и снижения интенсивности охлаждения в углах возможно нанесение на определенную высоту специальных рисок на поверхности кристаллизатора. Их глубина и размеры могут по-разному влиять на формирование начальной корки затвердевающего металла. С одной стороны, если металл не затекает в эти риски, происходит уменьшение интенсив-

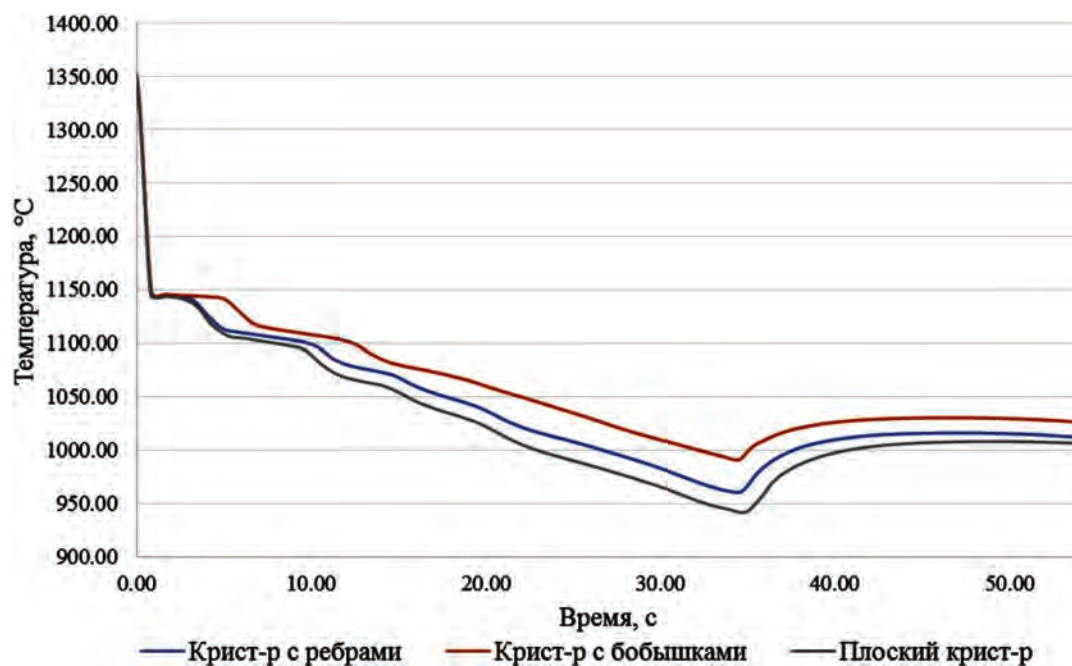


Рис. 10. Изменение температур на поверхности отливки при использовании различных конструкций кристаллизатора

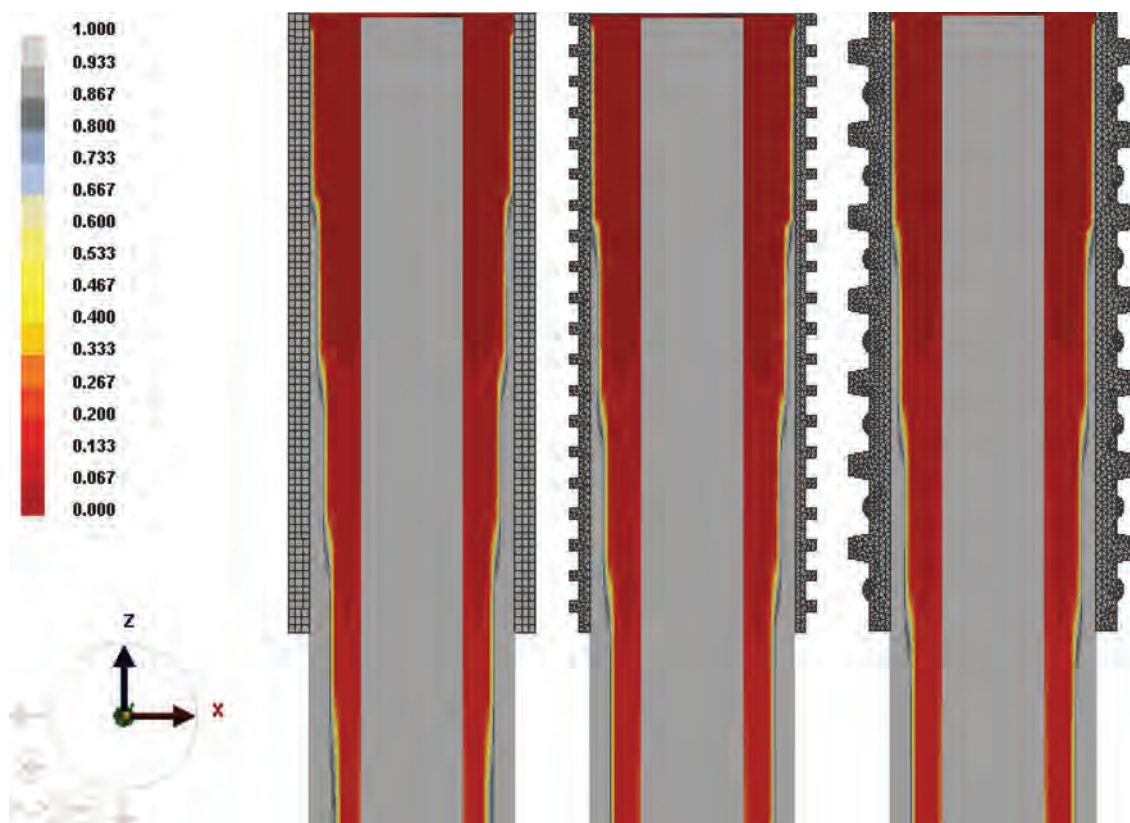


Рис. 11. Распределение твердой фазы в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

ности теплообмена, что оказывает негативное влияние на производительность процесса, но способствует получению качественной поверхности. В случае если происходит заполнение рисков металлом, скорость затвердевания по периметру заготовки выравнивается, практически исключается образование такого дефекта, как разнотолщинность.

Таким образом, наиболее эффективными являются меры, приводящие к оптимизации теплового и напряженно-деформированного состояния формирующейся оболочки слитка в кристаллизаторе. Учитывая, что кристаллизатор должен в течение длительного времени работать с сохранением геометрических размеров, с целью обеспечения качества получаемых заготовок, необходимо продолжить работы по соз-

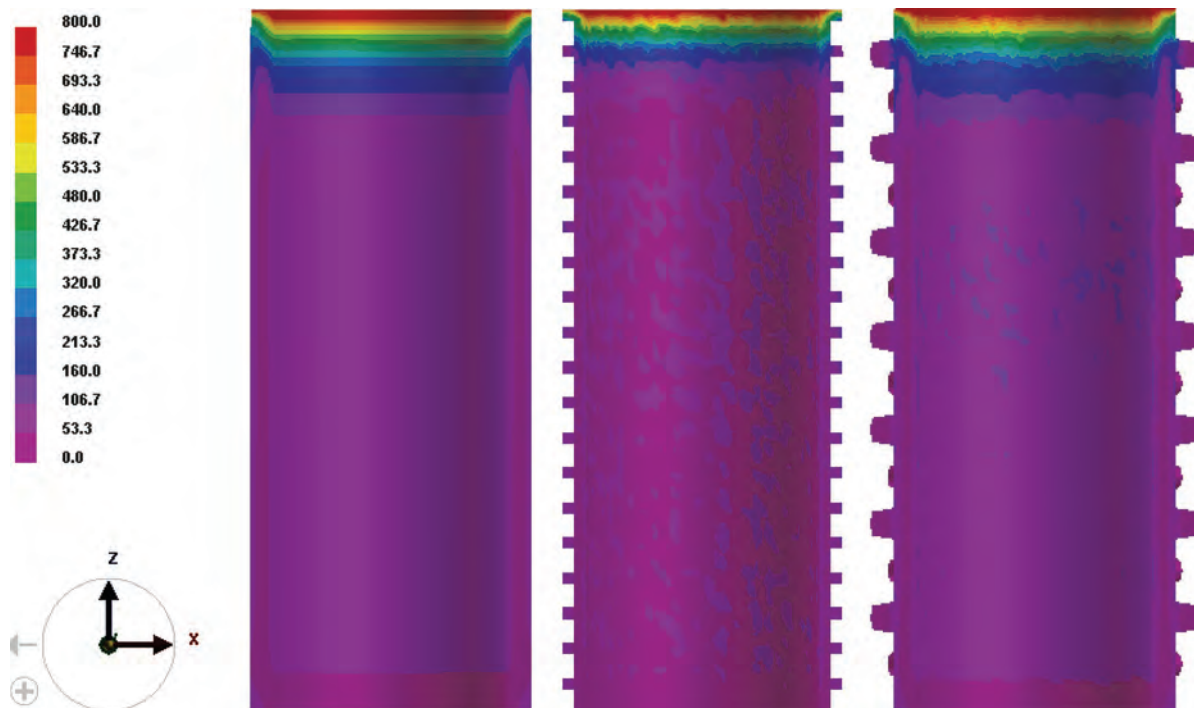


Рис. 12. Эффективные напряжения в кристаллизаторе в зависимости от конструкции при закреплении только в верхней части

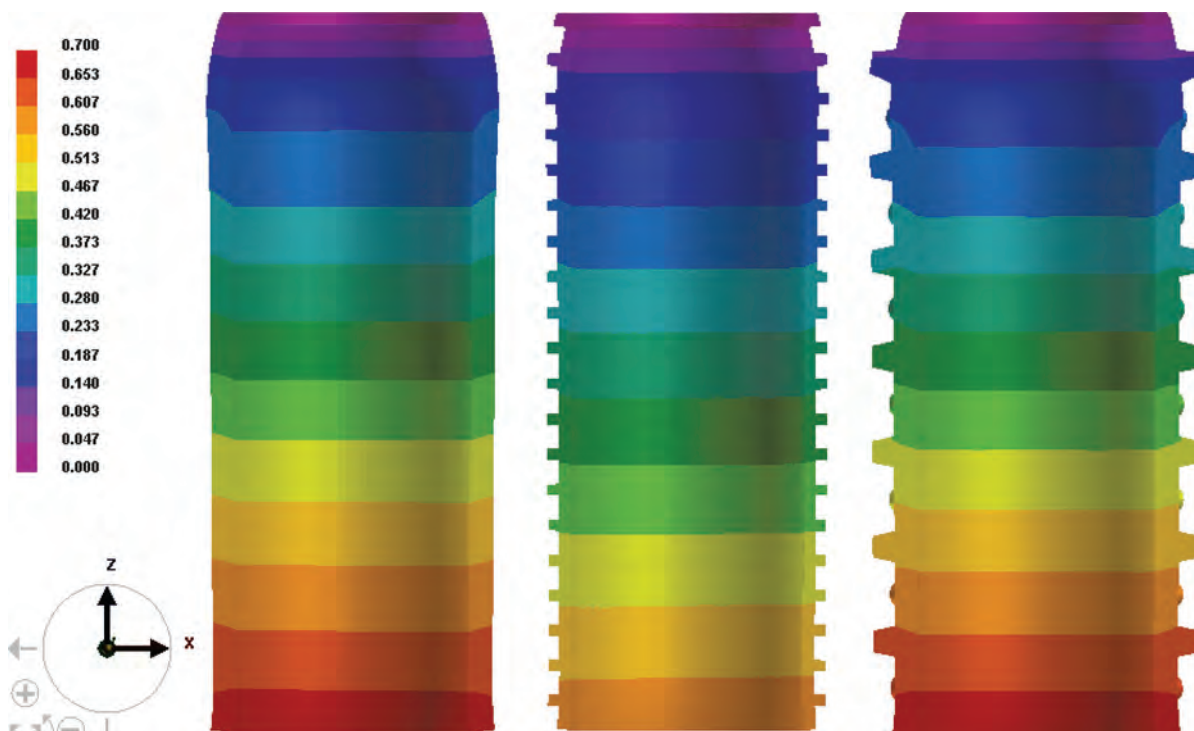


Рис. 13. Деформации кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении только в верхней части. $\times 50$

данию оптимальной конструкции кристаллизатора, обеспечивающей минимальное коробление рабочей гильзы кристаллизатора, ее рациональной конфигурации, обеспечения равномерности ее охлаждения.

Экспериментальные данные и результаты математического моделирования показывают, что использование поперечного оребрения позволило снизить напряжения, а, следовательно, и деформации в рабочей втулке кристаллизатора. Кристаллизатор данной конструкции позволил значительно уменьшить количество поверхностных дефектов.

Таким образом, на основе имитационного моделирования разработаны рекомендации по выбору оптимальной конструкции кристаллизатора для получения заготовок круглого и прямоугольного сечения деталей гидро- и пневмоаппаратуры.

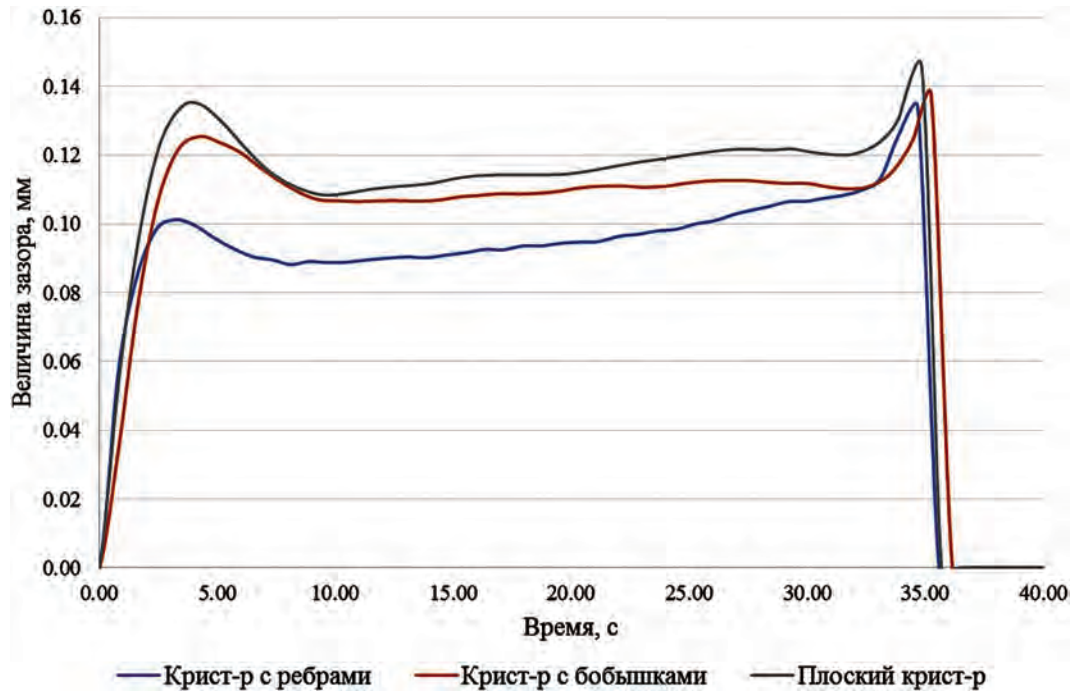


Рис. 14. Изменение величины зазора между отливкой и кристаллизатором

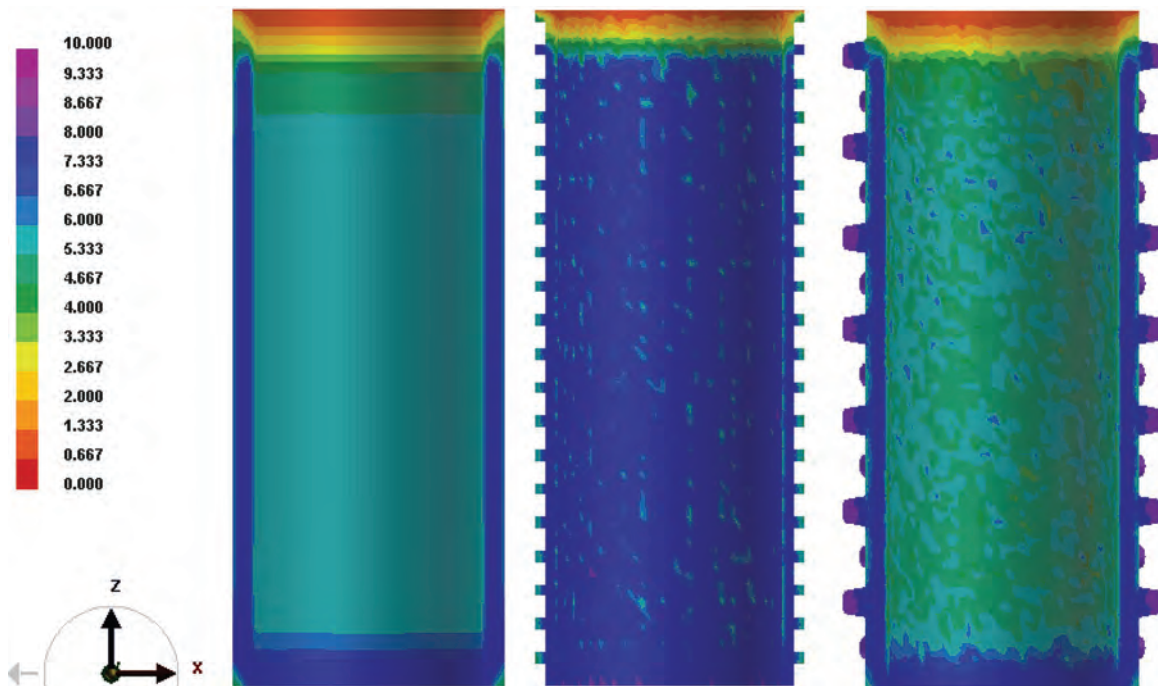


Рис. 15. Относительная стойкость кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении только в верхней части

Сведения об авторе

Крутилин Александр Николаевич, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь. E-mail: kant-minsk@tut.by.

Information about the author

Krutilin Aleksandr, Belarusian National Technical University, Nezavisimosti ave., 65, 220013, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: kant-minsk@tut.by.