

УДК 621.74

**В.А. Попковский, канд. техн. наук, доц., Е.И. Марукович, д-р техн. наук, проф.,
В.Ф. Бевза, канд. техн. наук, В.П. Груша**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ КРИСТАЛЛИЗАТОРА В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

Проведен анализ изменения температуры, напряжений и деформаций в стенке стального водоохлаждаемого кристаллизатора при периодических тепловых воздействиях на его рабочую поверхность. Показано, что деформации кристаллизатора в течение каждого цикла происходят по кривой с максимумом. Полученные результаты использовали для оптимизации профиля внутренней поверхности кристаллизатора при непрерывно-циклическом литье чугуна.

При непрерывно-циклическом литье намораживанием (НЦЛН) полых цилиндрических заготовок из чугуна используют водоохлаждаемые кристаллизаторы скольжения гильзового типа с рабочей втулкой из малоуглеродистой стали [1]. При этом профиль ее внутренней поверхности во многом определяет стабильность процесса литья и качество получаемых заготовок. Целью настоящей работы является анализ напряженно-деформированного состояния рабочей втулки кристаллизатора в процессе разлива и разработка рекомендаций по оптимизации профиля ее внутренней поверхности.

При НЦЛН стенка кристаллизатора в каждом цикле по всей высоте испытывает периодическое тепловое воздействие с внутренней стороны от контакта с жидким, а затем с затвердевающим металлом при постоянном охлаждении наружной поверхности проточной водой, т.е. в течение цикла работает в нестационарных тепловых условиях, в соответствии с тепловым воздействием происходит деформация рабочей втулки. При установившемся режиме литья циклы повторяются примерно в одном и том же интервале температур с постоянным периодом, равным времени затвердевания отливки. В связи с этим изменение температуры рабочей (внутренней) поверхности стенки кристаллизатора можно определить как стационарно-периодическое. Поэтому для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) стенки в процессе разлива достаточно рассмотреть условия ее работы в течение одного цикла.

Задачу определения температур и деформаций в стенке кристаллизатора рассматривали как несвязанную квазистационарную задачу термопластичности [2]. Решали ее в два этапа: на первом рассчитывали температурное поле стенки рабочей втулки, на втором – термические напряжения и упругопластические деформации. Анализ НДС рабочей втулки осуществлялся на основе использования теории неизотермического пластического течения [2, 3].

Исследования проводили при литье заготовок чугуна в стальной кристаллизатор диаметром 140 мм, толщиной стенки 12,5 мм и полезной высотой 240 мм. Время затвердевания отливки (продолжительность цикла t_4) составляло 29 с. Принято, что температура водоохлаждаемой поверхности остается постоянной в течение всей кампании разлива и составляет 90 °С.

Расчет выполнялся с использованием метода конечных элементов, математический аппарат которого реализован в пакете прикладных программ NASTRAN.

Контакт рабочей поверхности кристаллизатора с жидким металлом в начальный момент формирования каждой отливки осуществляется автоматически при извлечении из кристаллизатора предыдущей отливки. При соприкосновении расплава с рабочей поверхностью происходит резкое повышение ее температуры, а затем относительно плавное ее понижение и продвижение тепловой волны от внутренней поверхности к наружной (рис. 1).

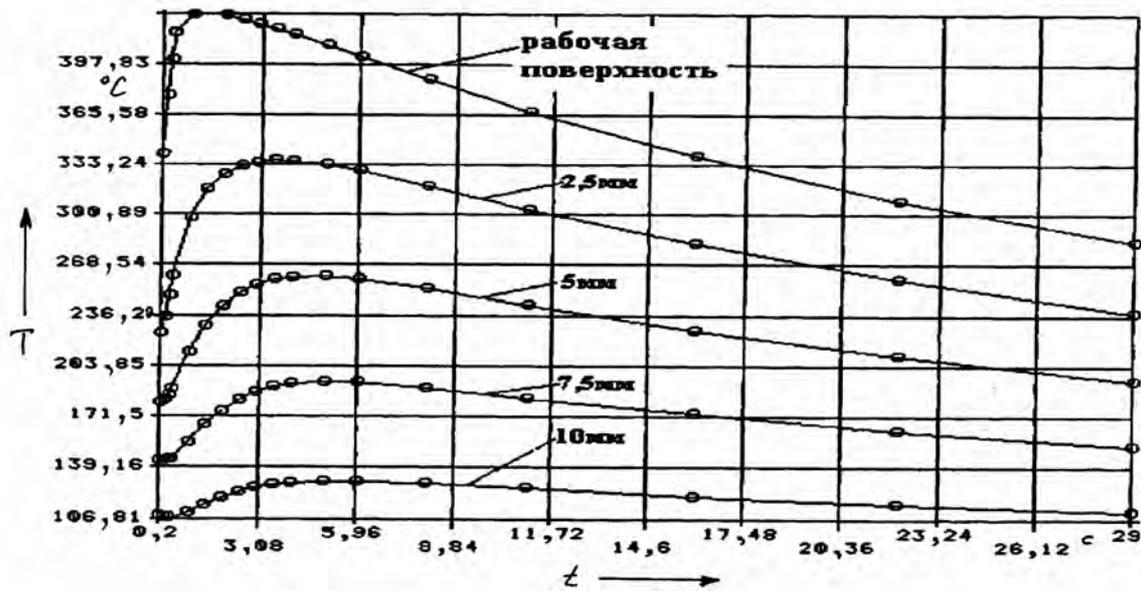


Рис. 1. Изменение температуры в стенке кристаллизатора в течение цикла на различном удалении от рабочей поверхности

Наибольший перепад температур по толщине стенки за период формирования отливки наблюдается в момент, соответствующий максимальному значению температуры на рабочей поверхности, а следовательно, и средняя температура стенки кристаллизатора изменяется в течение каждого цикла по кривой с максимумом, а температура наружной поверхности затвердевающей отливки монотонно понижается вплоть до ее извлечения из кристаллизатора. В соответствии с температурным состоянием изменяются напряжения в стенке кристаллизатора и его деформации.

Для исследования НДС рабочей втулки использовались конечные элементы, представляющие собой кольцо с треугольным осевым сечением (рис. 2). Эти конечные элементы обладают гарантированной сходимостью, так как удовлетворяют необходимым требованиям к функциям перемещений [4]. Физическая нелинейность, определяемая зависимостью механических свойств материалов от температуры, учитывалась с помощью теории неизотермического пластического течения [5].

Напряжения и деформации в сечении кристаллизатора определялись на различном уровне по высоте рабочей втулки и в различных точках по толщине стенки (рис. 3).

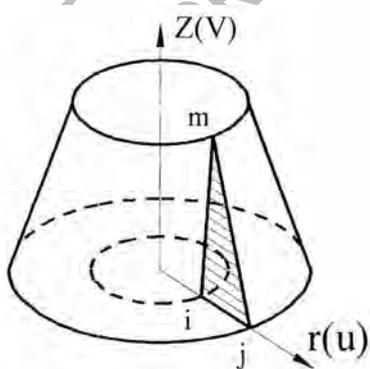


Рис. 2. Кольцевой конечный элемент

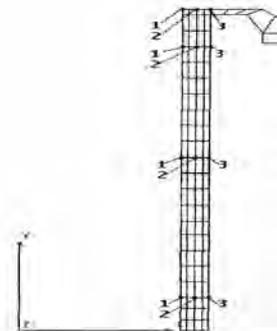
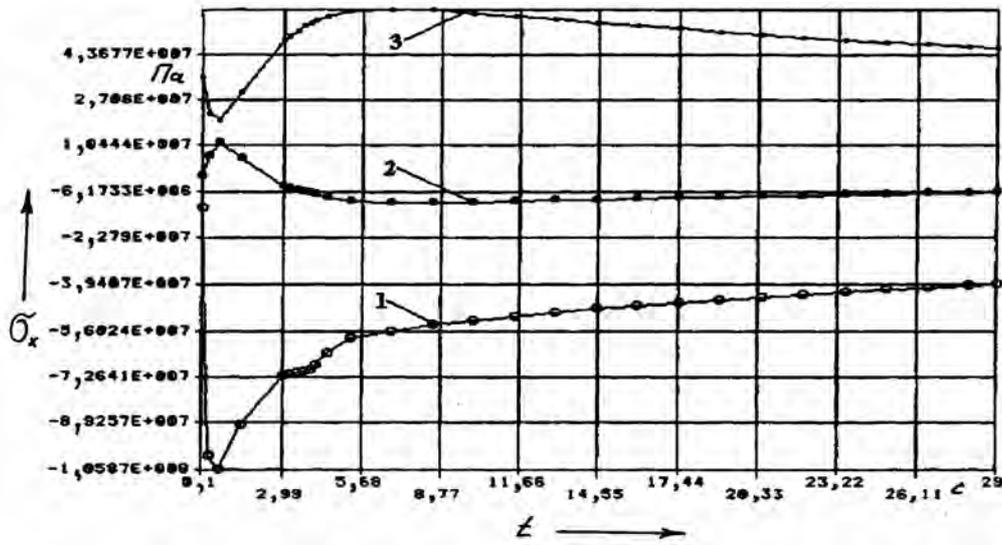
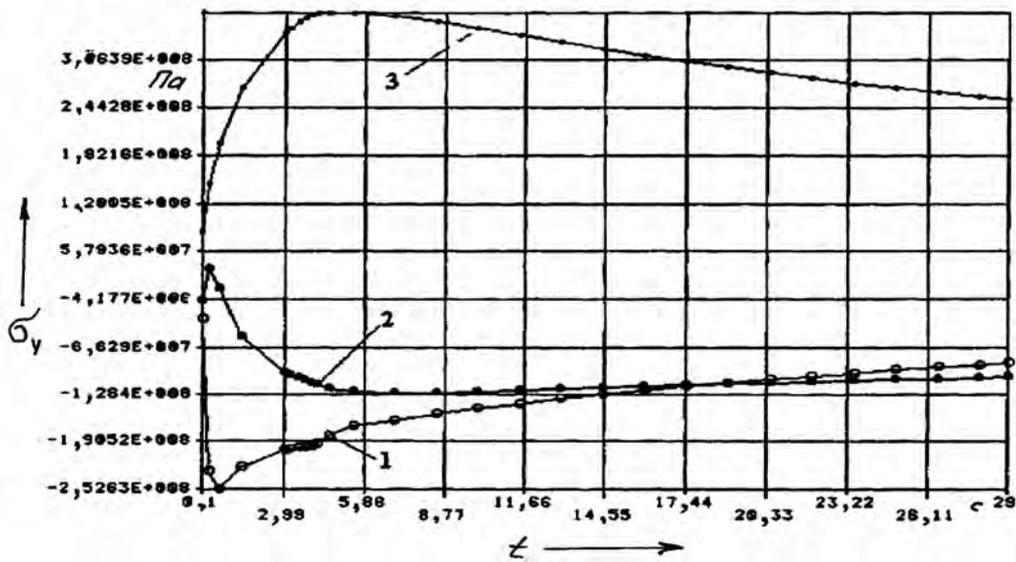


Рис. 3. Схема расположения точек, в которых определялась кинетика изменения компонент напряжений

а)



б)



в)

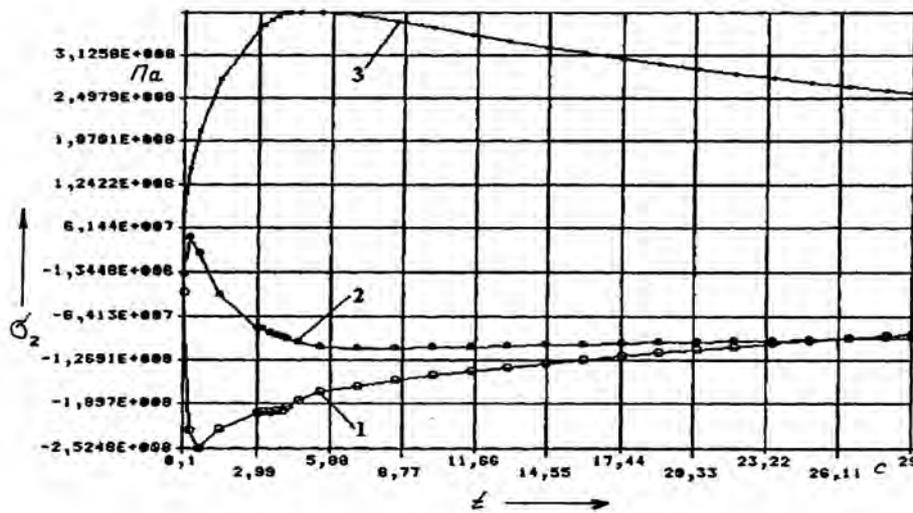


Рис. 4. Кинетика изменения радиальных (а), осевых (б), тангенциальных (в) напряжений в различных точках по толщине стенки кристаллизатора

Расчеты показали, что на рабочей поверхности имеют место напряжения сжатия, а на водоохлаждаемой – растяжения. Причем на этих поверхностях все компоненты напряжений имеют максимальную величину. В средней области по толщине стенки напряжения всех видов имеют заметно меньшее значение (рис. 4, а...в).

На рабочей поверхности кристаллизатора напряжения всех видов резко возрастают в момент контакта с жидким металлом, а затем в течение цикла монотонно снижаются (рис. 4, кривая 1). Анализ показал, что интенсивность напряжений распределяется неравномерно по высоте рабочей втулки кристаллизатора. В зоне верхнего торца, имеющего водоохлаждаемый фланец, эта интенсивность значительно выше, чем в нижележащих зонах. При этом слои материала стенки рабочей втулки со стороны внутренней поверхности к концу цикла приобретают значительное перемещение вверх в осевом направлении. Установлено, что основной вклад в величину интенсивности напряжений вносят осевые нормальные напряжения, которые являются одной из основных причин упругопластического деформирования кристаллизатора.

В соответствии с характером изменения напряжений в стенке кристаллизатора в течение цикла изменяется размер и профиль внутренней полости рабочей втулки. В начале цикла происходит относительно интенсивное увеличение ее внутреннего размера в радиальном направлении, а затем плавное уменьшение до конца цикла (рис. 5).

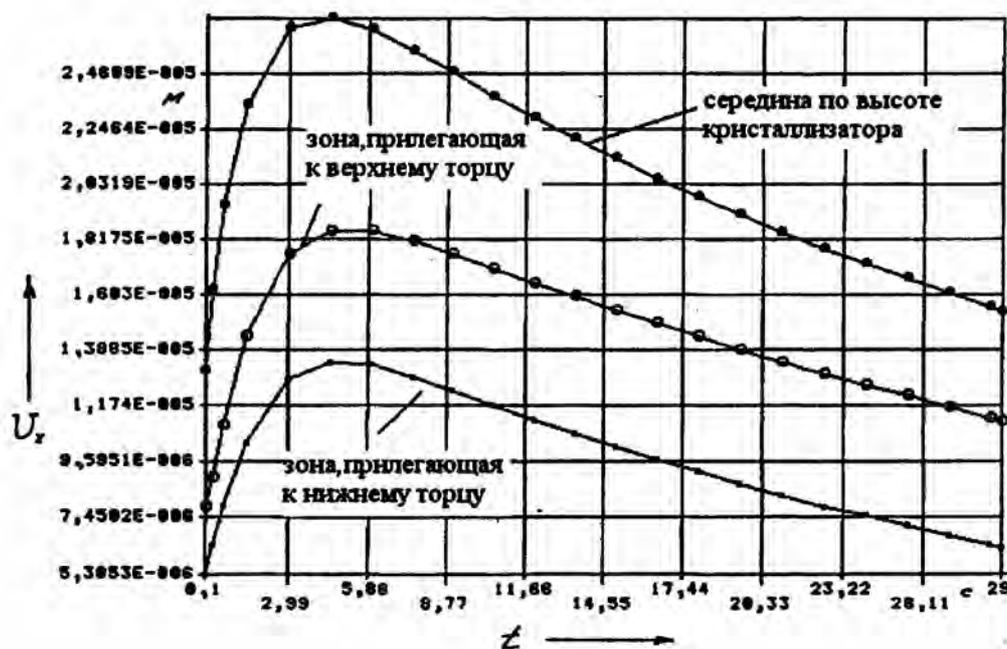


Рис. 5. Изменение деформации кристаллизатора в течение цикла в различных зонах по его высоте

При этом наибольшие изменения размера рабочей поверхности наблюдаются в средней по высоте зоне кристаллизатора, что определяет образование ее бочкообразности. Это объясняется специфической конструкцией рабочей втулки, которая в зоне верхнего и нижнего торцов имеет элементы, препятствующие ее свободной деформации при тепловых воздействиях на внутреннюю поверхность. Также изменение профиля может приводить к обрыву затравочной части отливки при ее извлечении из кристаллизатора и прекращению процесса литья. Полученные результаты позволили

разработать рекомендации по оптимизации профиля внутренней поверхности рабочей втулки [6], что повысило стабильность процесса непрерывно-циклического литья и качество заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бевза, В. Ф. Параметры и условия работы кристаллизатора при непрерывно-циклическом литье / В. Ф. Бевза, А. М. Бодяко // *Металлургия машиностроения*. - 2002. - №4 (7). - С. 46-48.
2. Боли, Б. Теория температурных напряжений : пер. с англ. / Б. Боли, Дж. Уэйнер. - М. : Мир. - 1964. - 206 с.
3. Ильюшин, А. А. Пластичность. - М.-Л., 1948. - 98 с.
4. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. - М. : Мир, 1975. - 541 с.
5. Биргер, И. А. Термопрочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. М. Шорр. - М. : Машиностроение. - 1975. - 675 с.
6. Пат. 2343 ВУ, МКИ В 22 D 11/4. Кристаллизатор для непрерывно-циклического литья заготовок из чугуна / В. Ф. Бевза [и др.] ; заявитель и патентообладатель Гос. науч. учреждение «Институт технологии металлов НАН Беларуси». - № 20050290 ; заявл. 23.05.05 ; опубл. 30.12.05, Бюл. № 4. - 27 с.

Институт технологии металлов НАН Беларуси
Материал поступил 20.11.2005

**V.A. Popkovskii, E.I. Marukovitch,
V.F. Bevza, V.P. Hrusha**

**The study is the process of deformation of a crystallizer
in terms of thermo cycling**

Institute of Technology of Metals NAS of Belarus

The analysis of strained-deformed state of a crystallizer at heat cycling influence is given. It is shown that deformations of a crystallizer during the cycle go by on a curve with maximum.