

где  $I$  — момент инерции системы относительно оси поворота;

$$L = 2I_1 + I_2;$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + L \cos\varphi = M_0. \quad (10)$$

Для небольших углов  $\varphi$  уравнение (10) принимает вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + L\varphi = M_0. \quad (11)$$

Используя уравнение (11), удобно характеризовать устойчивую работу бестраншейных агрегатов.

---

В. Е. РОТЕНБЕРГ, И. А. ТАНАНКО, А. И. ХРАМЧЕНКОВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

С началом заливки металла в форме протекают сложные взаимосвязанные процессы. Неравномерный нагрев формы приводит к возникновению в ней температурных упругих и упруго-пластических напряжений и деформаций. Нагрев является также причиной превращений в материале формы. Образование новых фаз не только изменяет механические свойства материала, но и является источником так называемых фазовых напряжений, которые накладываются на температурные напряжения и могут существенно изменить картину напряженного состояния в кокилях, рисуемую обычно без учета фазовых превращений. Можно сказать, что из всех факторов, влияющих на работу металлической литейной формы, наименее изучены фазовые превращения. Цель настоящей работы — попытка восполнить этот пробел при исследовании работы стальных и чугунных кокилей.

Под фазовыми превращениями понимаются процессы, связанные с возникновением новой фазы. Т. е., сюда входят и аллотропные (полиморфные) превращения типа  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$  в железе, и аустенитно-перлитные в сталях, и магнитные, и мартенситные, и графитизация. С точки зрения работы кокилей представляют прежде всего интерес все превращения диффузионного типа (из-за сравнительно медленного падения температуры в стенке формы), связанные с изменением удельного объема.

Таким образом, следует остановиться на аустенитно-перлитном превращении и графитизации.

Прежде всего необходимо было исследовать температурное поле кокиля. Запись температуры производилась хромель-алюмелевыми термодарами толщиной 0,5 мм электронным потенциометром ЭПП-09 и осциллографом Н-700.

Кроме анализа температурного поля, было предпринято непосредственное исследование превращений в материалах, из которых были изготовлены кокили — на моделях и при натуральных испытаниях — при однократных и многократных нагревах.

Исследование на моделях проводилось следующим образом: цилиндрические образцы, диаметр которых был выбран из условия полной прокаливаемости [1] различной длины  $l=5, 10, 20$  и  $30$  мм, вкладывались в цилиндрическую обойму, боковая поверхность которой была теплоизолирована асбестом, и окуналась в чугун  $t^{\circ}=1350^{\circ}\text{C}$ . Те части образцов и обоймы, которые соприкасались с металлом (т. е. торцы), были покрыты маршаллитовой краской, составленной по тому же рецепту, что и краска кокиля [2]. Образцы вместе с обоймой нагревались чугуном определенное время и затем выбрасывались в воду с температурой  $20\pm 30^{\circ}\text{C}$ .

Одновременно нагревались и закалялись по три образца одного химсостава и термообработки. Это дало возможность получить стабильные результаты при сравнении структур.

Кроме однократных нагревов по той же методике проводились многократные нагревы с охлаждением образцов в воде после каждого нагревания и многократные нагревы с промежуточным охлаждением на воздухе и закалкой в воде после последнего нагрева.

Следовательно, изменения, которые происходят в структуре материала под воздействием контакта с жидким металлом, фиксировались последующей закалкой.

На образцах, полученных по описанной выше методике, были сделаны продольные шлифы, на которых исследовалась микро- и макроструктура. Травление образцов было проведено в пикрале. Так как при контакте с жидким металлом происходил разогрев образцов, то после последующей закалки можно было обнаружить зоны с различной структурой, зависящей от той температуры, до которой происходил разогрев металла. Разные структуры по-разному выявляются в одинаковых условиях травления, а поэтому сравнительно легко разные зоны могли быть выявлены при макроструктурном исследовании. Характер образовавшейся после закалки структуры давал довольно четкое представление о температуре нагрева металла и о происходящих в нем фазовых превращениях.

Перейдем к исследованию фазовых превращений в материале кокилей при натуральных испытаниях. Исследование проводилось как на стальных, так и на чугунных кокилях. Для кокилей был взят серый перлитный чугун и сталь 45, предварительно обработанная по режиму: нормализация отливки, а затем отжиг при температуре  $900^{\circ}$  в течение  $1+1,5$  часов и последующее медленное охлаждение (эти материалы исследовались и на моделях). Образцы вырезались из кокиля и на них изготавливался шлиф по всей толщине кокиля. Структура изучалась вдоль всего шлифа.

Проведенное исследование показывает, что в материале чугунного и стального кокиля при литье чугуна, и тем более стали, происходят фазовые превращения. Ввиду температурного перепада как по толщине, так и вдоль стенки, фазовые превращения происходят не во всем объеме стенки, а только в некоторых, наиболее разогретых зонах. Эти зоны испытывают обычно большие термические напряжения, как временные, так и остаточные. Именно в этих зонах появляются трещины, приводящие к потере кокилем работоспособности. Трещины эти являются результатом термической усталости, т. е. в конечном итоге связаны с определенным числом циклов нагружения. До сих пор предполагалось, что число циклов равно числу заливок металла в кокиль, т. е. числу температурных нагружений. В частности, если рассматривать кокиль как свободную пластину, то период нагружения заканчивается через несколько секунд после заливки, когда начинает уменьшаться кривизна кривой, показывающей распределение температуры по толщине кокиля [3]. Все остальное время длится период разгрузки. Так как период нагружения во времени очень мал и температура поверхностного слоя невелика, то фазовые превращения не успевают произойти за время нагружения, а произойдут позже, когда происходит разгрузка. При разгрузке (при дальнейшем разогреве кокиля) возникнут фазовые напряжения, связанные с уменьшением объема, а при остывании кокиля — связанные с увеличением объема. Так как изменение удельного объема при фазовых превращениях весьма значительно, то это может привести к появлению обратного пластического течения материала при первом превращении и прямого пластического течения при втором превращении. Таким образом, вместо одного цикла нагружения, поверхностный слой будет испытывать два-три цикла нагружения за время одной заливки, а это существенно отразится на долговечности кокиля.

Аналогичную картину можно нарисовать и при других видах опорного закрепления плоских кокилей, при работе цилиндрических кокилей, изложниц и т. д.

Весьма существенное влияние на долговечность чугунных литейных форм оказывает и графитизация. При графитизации резко увеличивается рост чугунов, который приводит к выходу кокиля из строя.

Следовательно, фазовые превращения, которые происходят в поверхностном слое металлической литейной формы, не могут не сказаться на работоспособности форм и должны учитываться при конструировании форм.

#### Литература

1. Гуляев А. П. *Металловедение*. М., издательство «Металлургия», 1966.
2. Вейник А. И. *Испытание кокильных красок на теплопроводность*. М., Машгиз, 1956.
3. Ротенберг В. Е., Храмченков А. И. *Упруго-пластические деформации плоского кокиля с учетом температурного изменения свойств металлов*. В сборнике: *Теплообмен между отливкой и формой*. Минск, издательство «Высшая школа», 1967.

#### В. И. УРОДОВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИКЛОИДАЛЬНОГО ЖЕЛОБА

Вертикальные циклоидальные желоба применяются при укладке гончарного дренажа бестраншейными дреноукладчиками и дренажными машинами экскаваторного типа [1, 3, 4, 5]. Известно, что при неправильном проектировании циклоидальных желобов происходит заклинивание трубок на выходе из желоба, а скорость их движения не соответствует скорости движения дренажной машины. Равномерное движение трубок на выходе из желоба характеризуется углом спада и скоростью перехода трубок в ложе дренажной щели или траншеи. Настоящая статья посвящается определению этих параметров.

Координаты движущейся дренажной трубки по вертикальному циклоидальному желобу изменяются в пределах [1]:  $0 \leq x \leq \pi a$ ,  $-2a \leq y \leq 2a$ ,  $-2a \leq z \leq 2a$ . Этому изменению координат соответствует уравнение поверхности циклоидального желоба

$$f(x, y, z) = x + \sqrt{2a \sqrt{y^2 + z^2} - (y^2 + z^2)} - \\ - a \arccos \frac{a - \sqrt{y^2 + z^2}}{a} \quad (1)$$