



*The dynamics of the temperature changing in allocated points of industrial chill molds is experimentally investigated. It is shown that one of the reasons of the chill mold fastness decrease may be prolonged being in nonstationary regime of "working", what is connected with its three-dimensional configuration and different-walled.*

А. Н. ЧИЧКО, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, БНТУ,  
Л. В. МАРКОВ, ОАО «ММЗ»,  
В. Ф. СОБОЛЕВ, БНТУ

УДК 669.27:519

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА ПРОМЫШЛЕННЫХ КОКИЛЕЙ И ПУТИ ОЦЕНКИ ИХ СТОЙКОСТИ

Одна из важнейших проблем при проектировании кокилей — расчет температурного поля кокиля. Характер изменения температурного поля является определяющим фактором в формировании термических напряжений кокиля. Различные знаки термических напряжений могут формироваться за счет неоднородности температурного поля, возникающего вследствие неравномерного характера заполнения полости формы, а также из-за разностенности кокильной оснастки. В работах [1, 3] предложены различные варианты оценки технологической оснастки кокилей по полям температур и напряжений, формирующихся в процессе заполнения формы. В работах [4–6] развиваются алгоритмические схемы, позволяющие на этапе проектирования кокилей оптимизировать пространственную конфигурацию внутренней полости формы и минимизировать материальные и временные издержки, связанные с получением отливок методом литья в кокиль. Однако экспериментальная «привязка» моделей и математических методов к реальному производству является также важной задачей, от которой зависит эффективность разрабатываемых алгоритмических схем для литейного производства.

Известно, что сложная пространственная конфигурация отливки и контур оснастки могут создавать температурные поля, приводящие к напряжениям, которые могут стать причиной развития трещин в процессе циклической заливки кокиля. Как следствие, снижается стойкость кокильной оснастки. В теории термических напряжений важнейшей характеристикой является градиент температур, который рассматривают как по времени, так и пространству. Градиент температур может быть определен из значений температурного поля во времени, которое может быть вычис-

лено как расчетным, так и экспериментальным путем. В связи с этим представляет интерес экспериментальное измерение температур кокиля, заливаемого расплавом и нагреваемого под действием движущегося температурного поля. Анализ промышленных кокилей, используемых ОАО «ММЗ», показал, что их стойкость может существенно различаться и зависит от степени разностенности спроектированной кокильной оснастки. В связи с этим представляло интерес экспериментально изучить характер изменения температурного поля для кокилей с различной стойкостью.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование градиента температур в выделенных точках кокилей различной стойкости на основе термовременных зависимостей, полученных в условиях заполнения кокиля расплавом, и разработка новых подходов для повышения стойкости кокильной оснастки.

В качестве объектов для исследования были выбраны два кокиля, используемых на ОАО «ММЗ» для производства чугуновых отливок — крышки тяжелого люка ТМ Д400 и крышки легкого люка Л(А15) (рис. 1, 2). Эти кокили были выбраны по данным их стойкости. Кокиль крышки тяжелого люка обладает наименьшей стойкостью из всей номенклатуры предприятия, а кокиль крышки легкого люка — наивысшей стойкостью. Оба кокиля изготовлены из серого чугуна марки СЧ20. Перед заливкой полость формы окрашивали противопопригарной краской. Состав краски на 15 л: графит и углерод в соотношении 2:3, 150 г патоки плюс вода. Краску наносили равномерным слоем на формообразующие поверхности кокилей.

В соответствии со схемами расположения точек замера температур (рис. 1, 2) в обоих кокилях

были выполнены технологические отверстия для установки термопар. Эти точки для снятия температурного поля были выбраны по следующим причинам: первая (A1) точка характеризует первые порции жидкого металла и через нее проходит весь металл, заполняющий форму; вторая (A2) точка располагается под внутренними кольцами полости форм, так как в этих точках максимальная толщина стенки отливки и минимальная толщина кокиля; третья (A3) точка выбрана как одно из наиболее удаленных мест полости формы, куда металл приходит в последнюю очередь; четвертая (A4) точка — как одна из наиболее удаленных точек кокиля.

Температуру в выбранных точках измеряли хромель-алюмелевыми термопарами и фиксировали потенциометром КСП-4 погрешность измерения, которая составляла 5%.

В процессе исследования были проведены по пять испытаний для кокиля крышки тяжелого и легкого люка. Экспериментальные измерения для обоих кокилей люков по температурам приведены на рис. 3–7.

Кокиля заливали серым чугуном марки СЧ20 при температуре заливки, равной 1360 °С.

При проведении экспериментов в условиях предприятия не удалось добиться равномерного подогрева кокилей до необходимой температуры, поэтому для обоих кокилей крышек люков первая заливка начиналась при средней температуре кокиля 42 °С, что значительно ниже рекомендуемых температур. В связи с этим кокиля получали значительный термический удар и, несмотря на выдержку отливок в кокилях (порядка 1,5–2,0 мин), не успевали прогреться к моменту следующей заливки.

На рис. 3 показаны измерения температур в выделенных точках кокиля для тяжелого люка ТМ Д400, соответствующие первому и второму циклам его заливки. Как видно из рисунка, температура в выделенных точках кокиля растет с увеличением времени заполнения. При этом наибольшие изменения температур наблюдаются

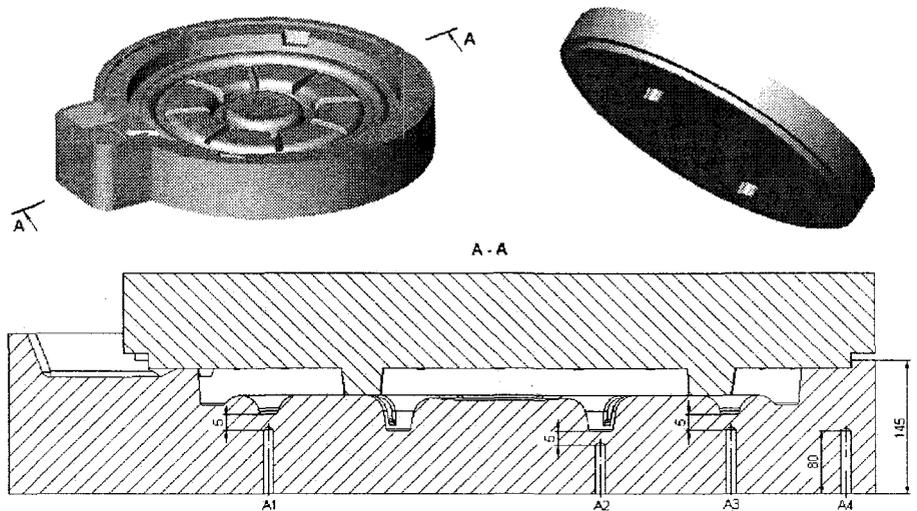


Рис. 1. Расположение термопар для исследования температур на кокиле крышки тяжелого люка ТМ Д400

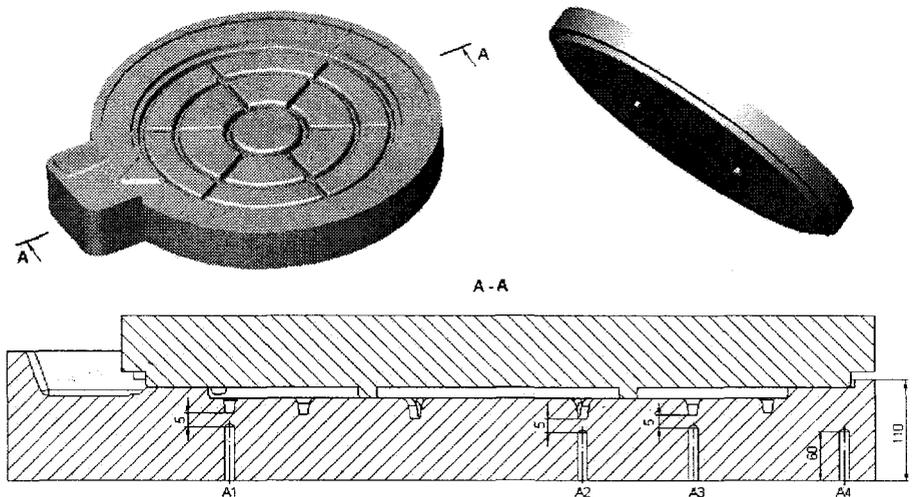


Рис. 2. Расположение термопар для исследования температур на кокиле крышки легкого люка Л(А15)

для точки A2. Наименьшие изменения температур, а следовательно, и градиенты во времени наблюдаются для точек A1 и A4. Следует отметить, что первый цикл соответствует холодному кокилю и для него при определенных временах наблюдается изменение динамики нагрева, которое характеризуется пересечением зависимостей температур от времени (рис. 3, а). Такое пересечение отсутствует при реализации второго цикла заливки кокиля (рис. 3, б). При проведении испытаний было установлено, что при реализации первого цикла заливки наблюдался рост температуры, начиная с момента заливки и до момента выбивки, далее следовал некоторый спад температуры и дальнейший рост. Это объясняется переносом тепла от расплава внутрь кокиля, а также неоднократной кантовкой кокилей.

На рис. 4 приведены измерения температур в выделенных точках кокиля для тяжелого люка ТМ Д400, соответствующие третьему и четвертому

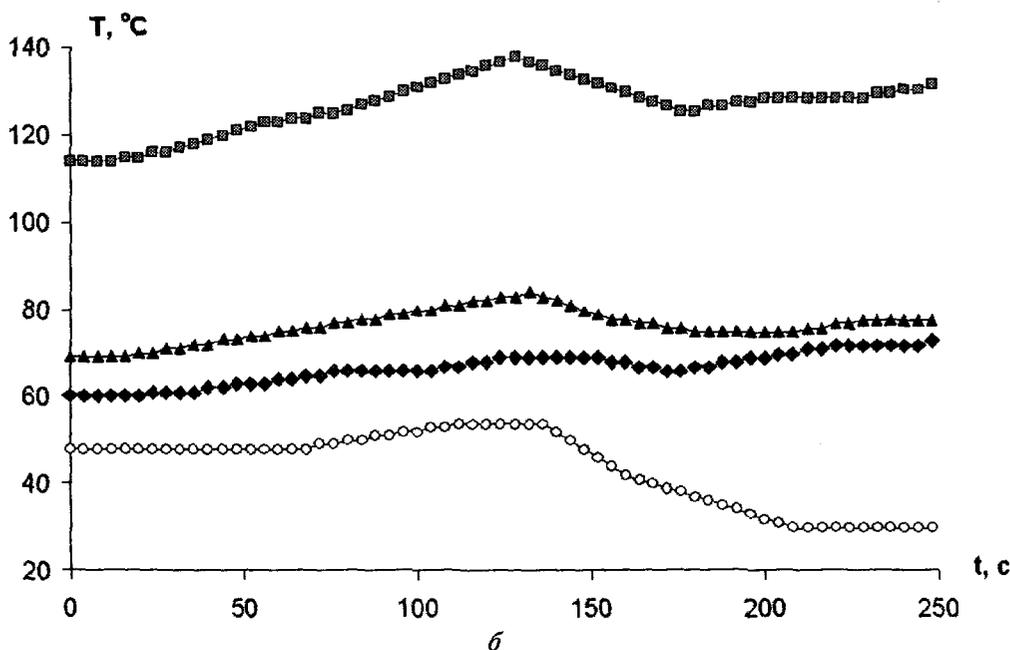
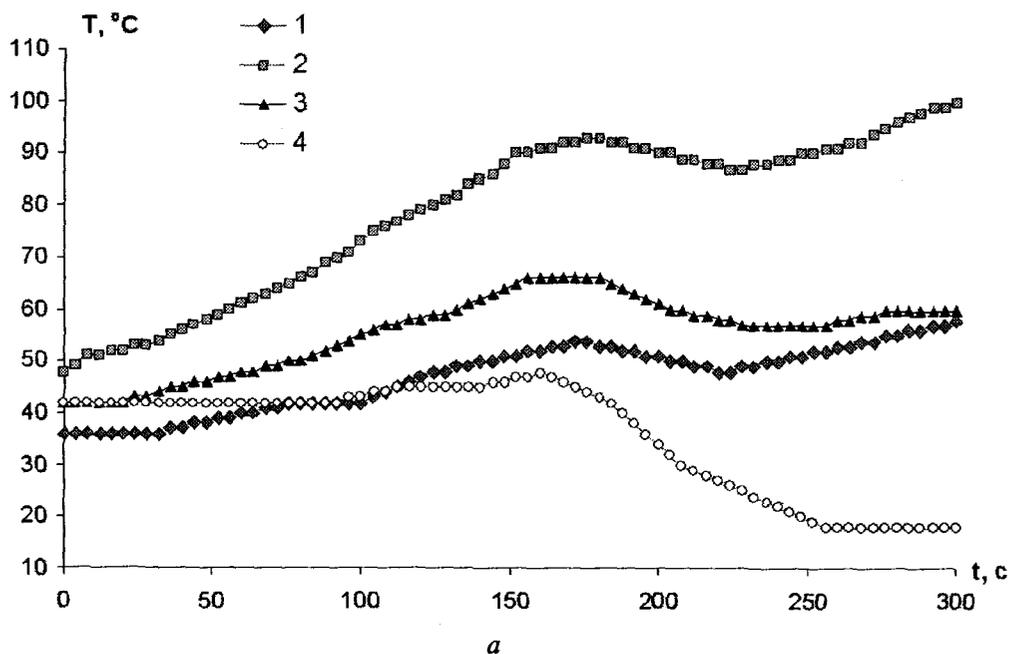


Рис. 3. Экспериментально полученное изменение температуры кокиля в зависимости от времени для выделенных точек первого (а) и второго (б) циклов заливки кокиля крышки тяжелого люка ТМ Д400:  $t$  – время охлаждения;  $T$  – температура в выделенных точках (1 – А1; 2 – А2; 3 – А3; 4 – А4)

циклам его заливки. Как видно из рисунка, для третьего цикла заливки кривые нагрева температур пересекаются для точек А1 и А3, т.е. третий цикл заливки кокиля характеризуется нестационарностью нагрева кокиля. Для четвертого цикла заливки температуры в выделенных точках кокиля не пересекаются, что может свидетельствовать о минимизации градиентной составляющей нагрева кокиля при его заполнении.

На рис. 5 представлены измерения температур в выделенных точках кокиля для легкого люка Л(А15), соответствующие первому и второму цик-

лам его заливки. Как видно из рисунка, зависимости температуры от времени в точках А1 и А2 кокиля пересекаются. Аналогично на начальном этапе заливки наблюдается подобная закономерность для точек А3 и А4 (рис. 5, а). Эта тенденция исчезает на второй заливке кокиля (рис. 5, б), т.е. кокиль легкого люка на втором цикле начинает входить в стационарный режим нагрева.

На рис. 6 можно видеть подтверждение этой закономерности, т.е. пересечения температурных зависимостей для выделенных точек кокиля не

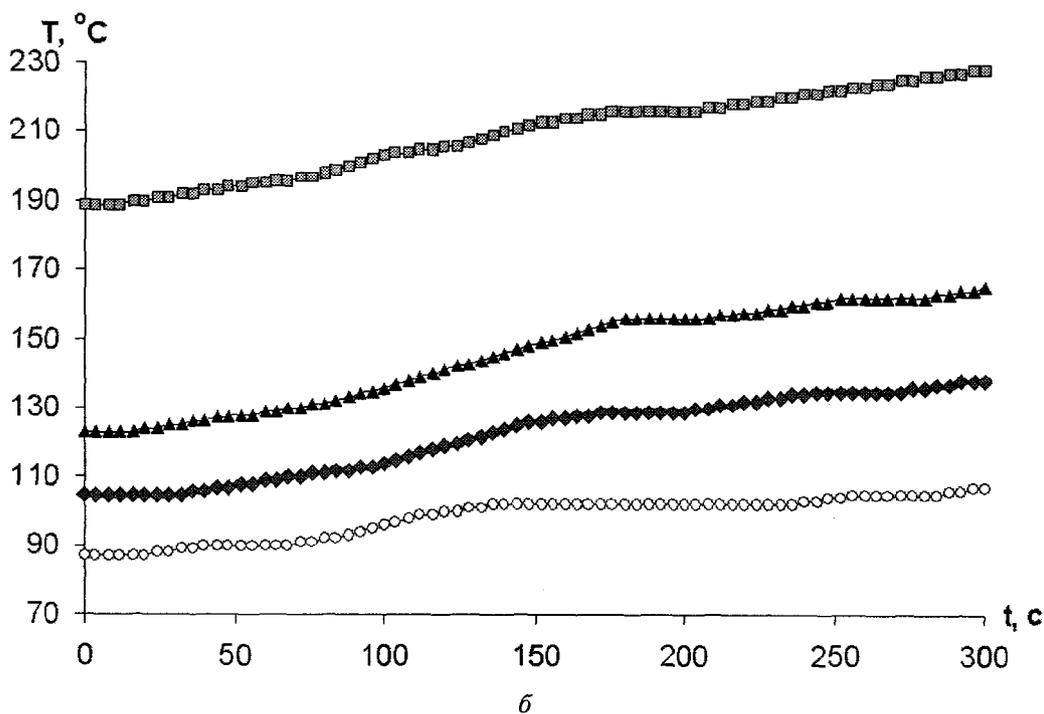
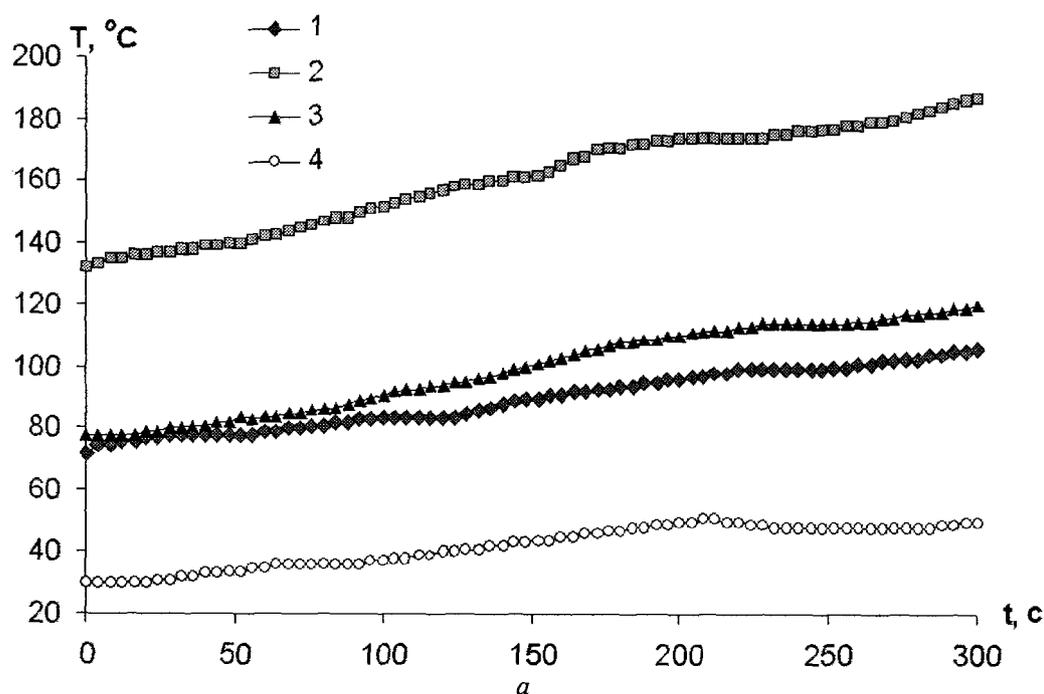


Рис. 4. Экспериментально полученное изменение температуры кокиля в зависимости от времени для выделенных точек третьего (а) и четвертого (б) циклов заливки кокиля крышки тяжелого люка ТМ Д400:  $t$  – время охлаждения;  $T$  – температура в выделенных точках (1 – А1; 2 – А2; 3 – А3; 4 – А4)

наблюдается ни для третьего, ни для четвертого цикла заливки кокиля легкого люка.

На рис. 7 показаны измерения температур в выделенных точках кокиля для легкого Л(А15) и тяжелого люков ТМ Д400 на пятом цикле заливки. Из рисунка видно, что для пятого цикла заливки кокиль тяжелого люка перешел в нестационарный режим работы. В то же время кокиль легкого люка продолжает «рабо-

тать» в стационарном режиме, что и отличает эти кокили. По-видимому, это является причиной того, что в кокиле тяжелого люка развиваются температурные градиенты и, как следствие, увеличивается доля критических напряжений, приводящих в конечном счете к образованию трещин. В кокиле легкого люка это происходит гораздо позже, после многочисленных заливок.

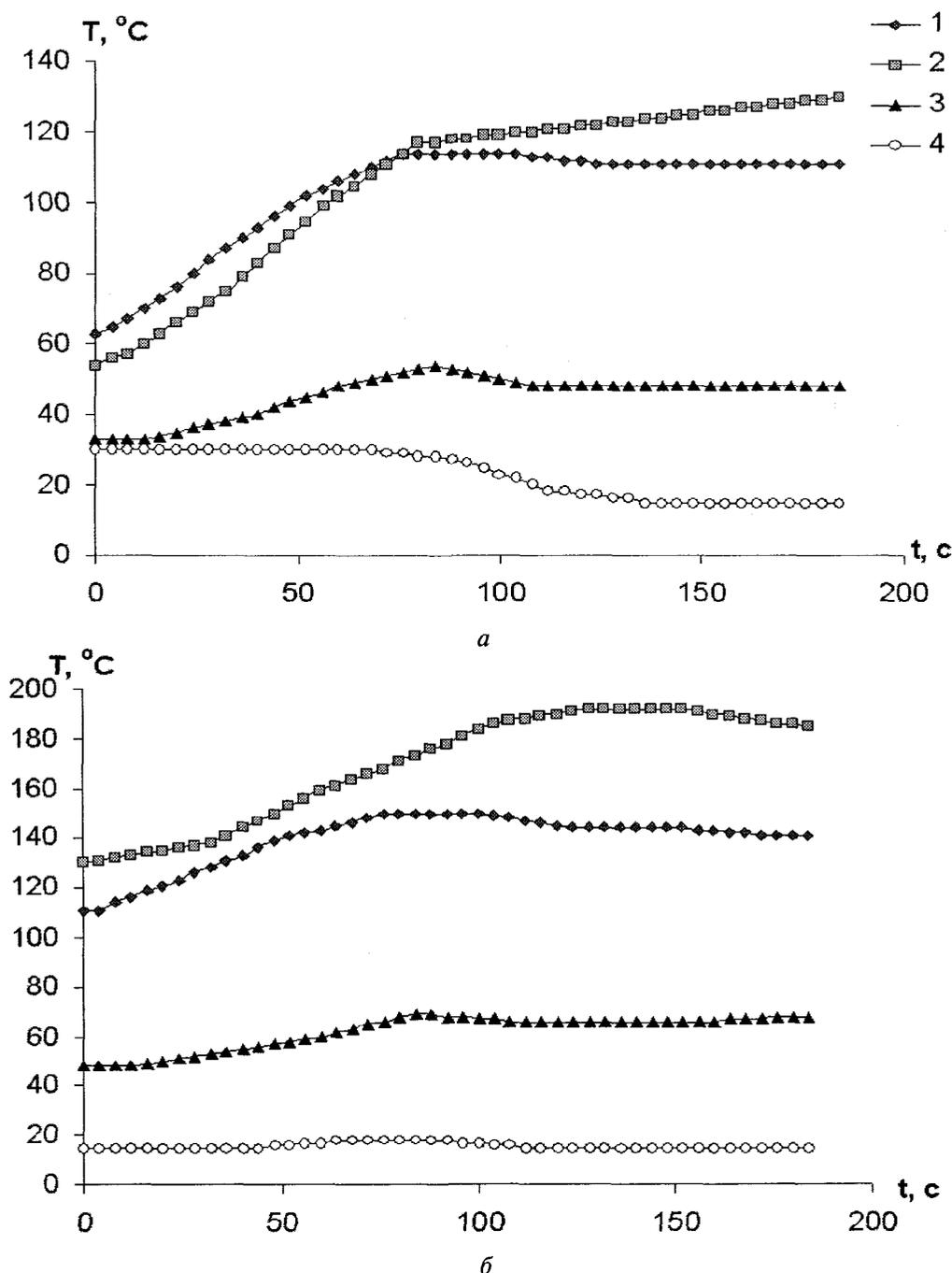


Рис. 5. Экспериментально полученное изменение температуры кокиля в зависимости от времени для выделенных точек первого (а) и второго (б) циклов заливки кокиля крышки легкого люка Л(А15):  $t$  – время охлаждения;  $T$  – температура в выделенных точках (1 – А1; 2 – А2; 3 – А3; 4 – А4)

Таким образом, режим заполнения тяжелого люка характеризуется многочисленными изменениями динамики температур в выделенных точках, что отражается в пересечениях температурных кривых. Для легкого люка такие пересечения температур практически отсутствуют, что может свидетельствовать о стационарном режиме его заполнения. Каждый кокиль имеет свою динамику вхождения в стационарный режим. Чем дольше в процессе эксплуатации кокиль находится в нестационарном режиме, тем большим тепловым

нагрузкам он подвергается. Частая смена знаков напряжений, а также временных и пространственных градиентов по температуре приводит к развитию остаточных напряжений и, как следствие, к зарождению трещин в кокиле. При этом стойкость кокиля зависит от его напряженного состояния и цикличности тепловых нагрузок. На основе проведенного исследования температур кокиля можно предложить метод оценки стойкости, основанный на математической обработке экспериментально измеряемых температур. В основу этого

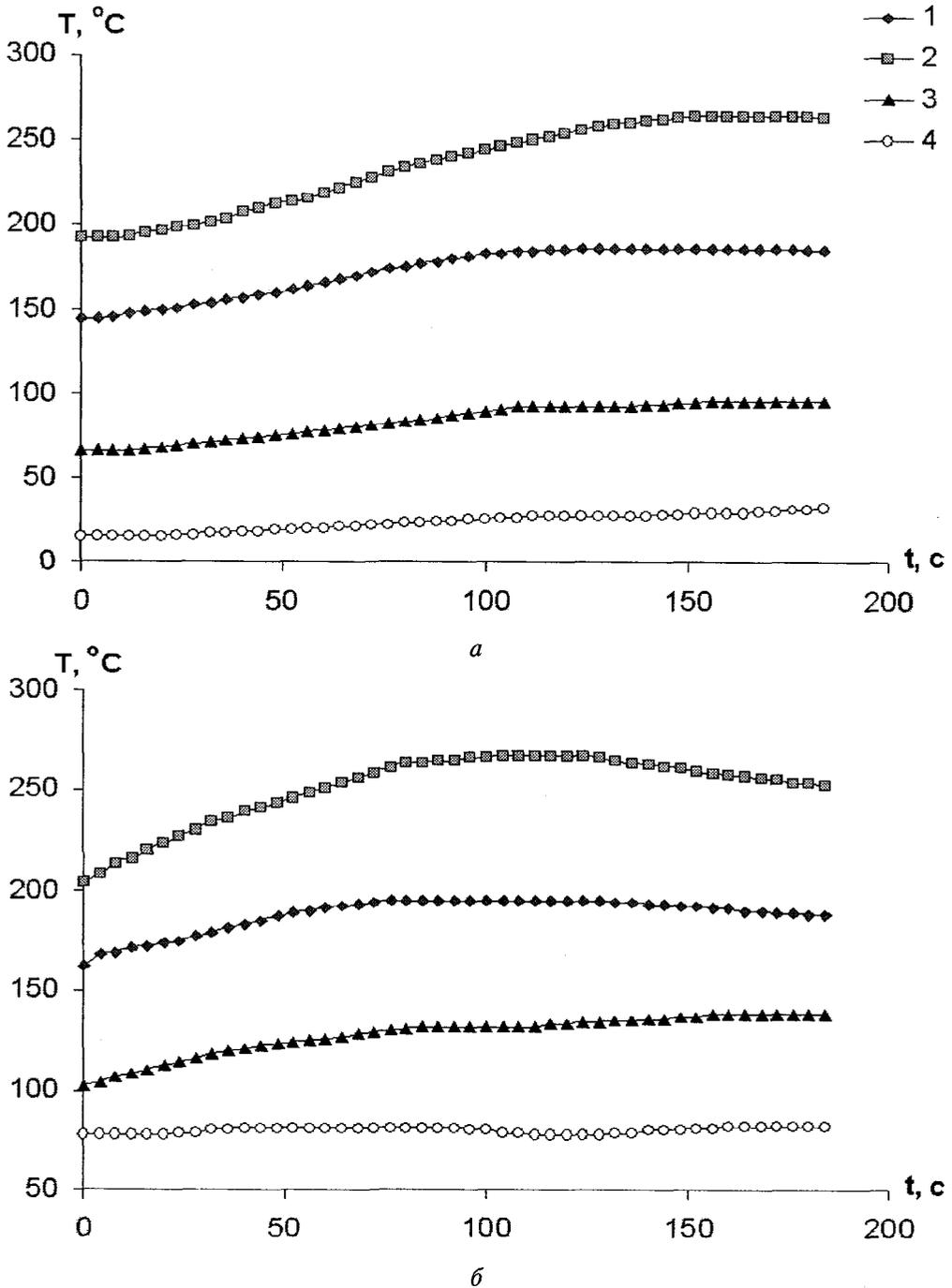


Рис. 6. Экспериментально полученное изменение температуры кокиля в зависимости от времени для выделенных точек третьего (а) и четвертого (б) циклов заливки кокиля крышки легкого люка Л(А15):  $t$  – время охлаждения;  $T$  – температура в выделенных точках (1 – А1; 2 – А2; 3 – А3; 4 – А4)

метода положен дифференциальный анализ термовременных зависимостей в выделенных точках кокиля. Критериями стойкости будут дифференциальные кривые для температур в выделенных точках.

Для количественной оценки степени нестационарности «работы» кокиля можно использовать формулу, отражающую градиентный характер изменения температур в пространстве:

$$\Delta T_r = |T(x_i, y_i, z_i, \tau) - T(x_j, y_j, z_j, \tau)|,$$

где  $T(x_i, y_i, z_i, \tau)$ ,  $T(x_j, y_j, z_j, \tau)$  – температуры для  $i$  и  $j$  выделенных точек кокиля;  $\Delta T_r$  – градиент температуры для двух точек по пространству.

Данный критерий можно использовать следующим образом. Если с течением времени динамика изменения температур развивается с постоянной или квазипостоянной скоростью, то стойкость такого кокиля будет выше, так как он быстрее входит в стационарный режим нагрева. Если

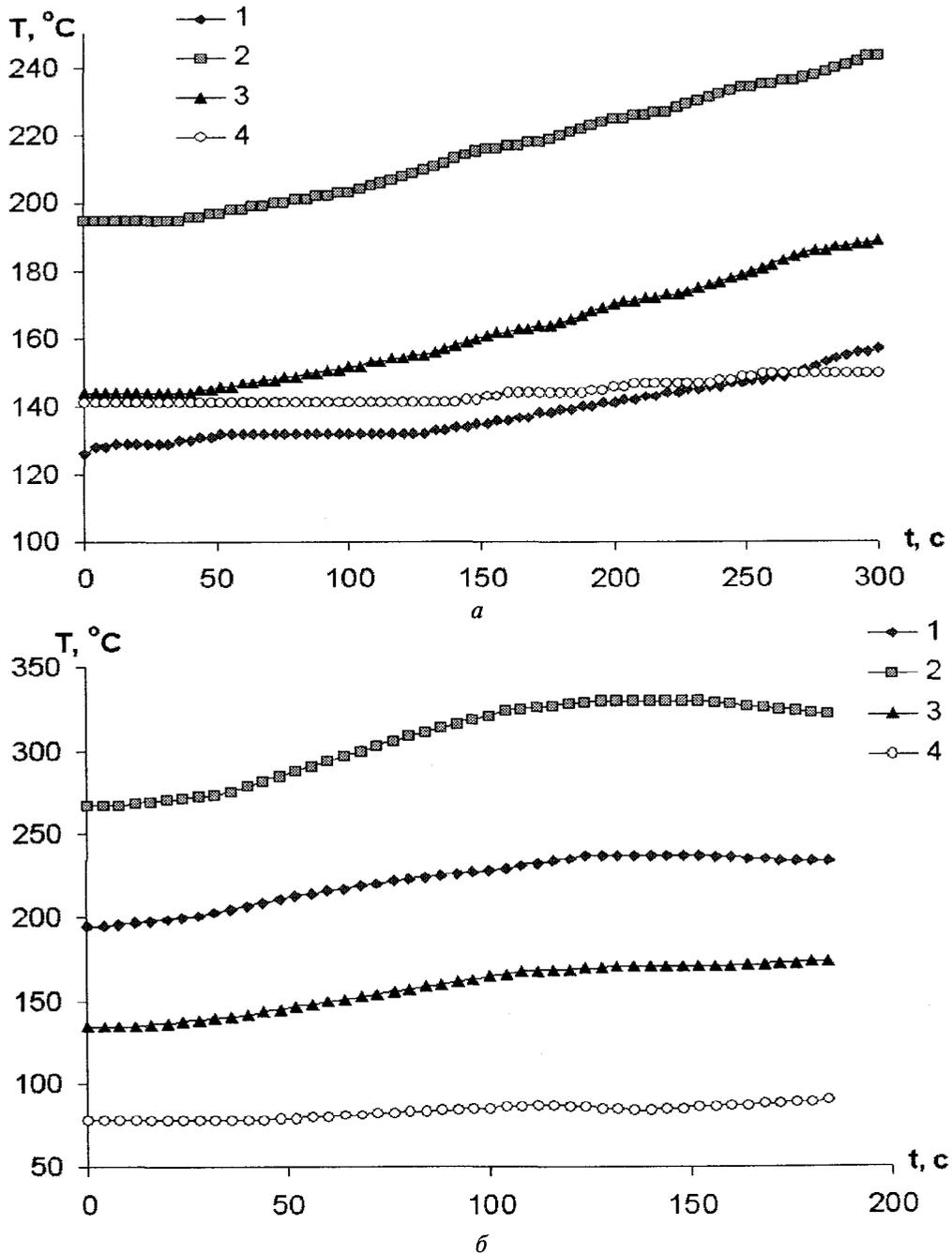


Рис. 7. Экспериментально полученное изменение температуры кокиля в зависимости от времени для выделенных точек пятого цикла заливки кокиля для крышек тяжелого ТМ Д400 (а) и легкого Л(А15) (б) люков:  $t$  – время охлаждения;  $T$  – температура в выделенных точках (1 – А1; 2 – А2; 3 – А3; 4 – А4)

динамика изменения скорости температур изменяется значительно, то такой кокиль работает в нестационарном режиме и склонен к образованию трещин в процессе заполнения полости формы. На рис. 8 представлены критерийные характеристики динамики изменения температур кокиля для пятого цикла заливки. Многочисленные пересечения дифференциальных кривых для тяжелого люка ТМ Д400 в сравнении с его аналогом Л(А15) свидетель-

ствуют о нестационарности «работы» кокиля тяжелого люка.

Предлагаемый подход, основанный на экспериментальном измерении температуры в выделенных точках, может быть использован в промышленных условиях для выявления причин низкой стойкости кокилей и дальнейшего совершенствования его пространственной конфигурации с целью повышения стойкости и эффективности процессов литья в кокиль.

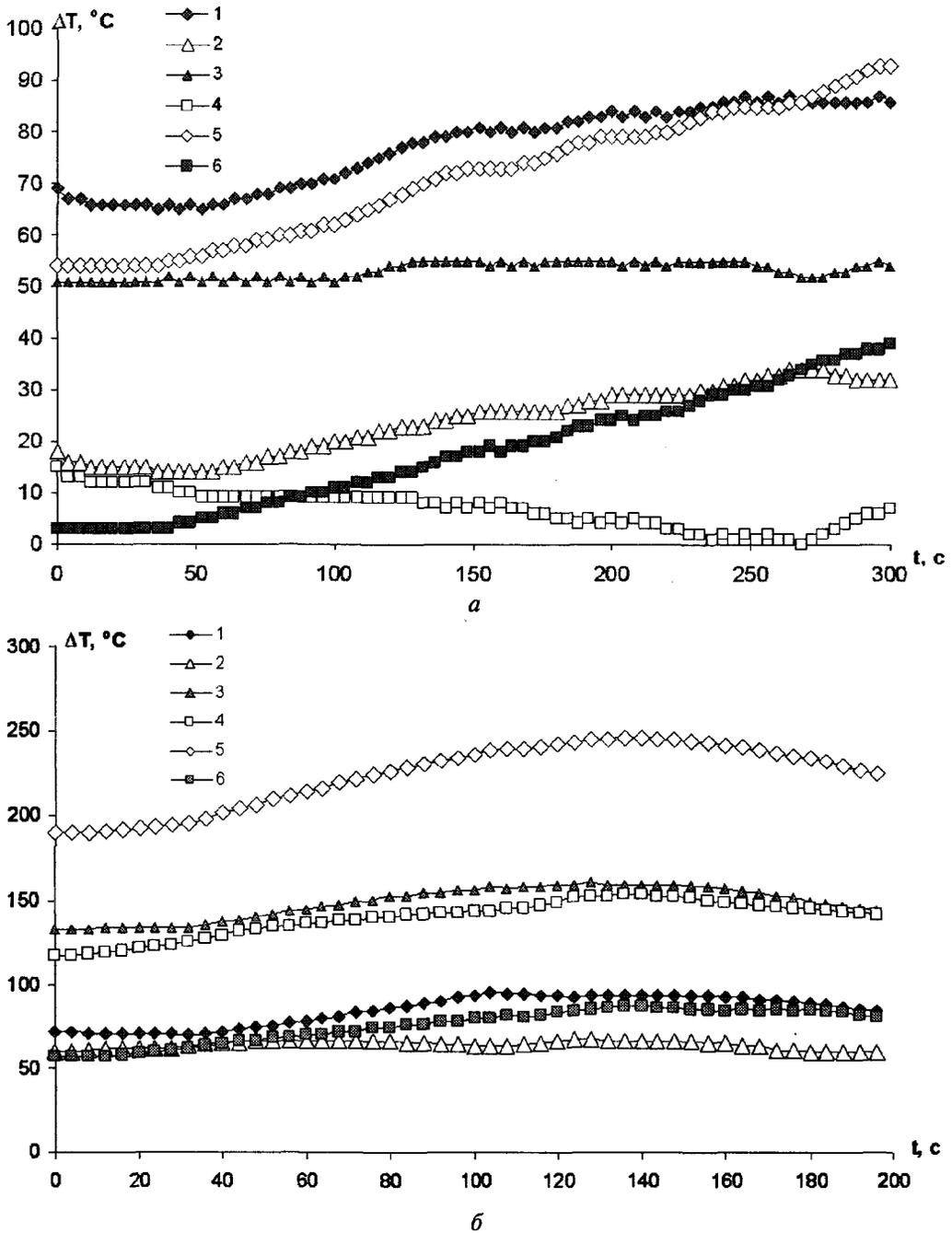


Рис. 8. Экспериментально полученное распределение динамики пространственных градиентов в кокилях тяжелого (а) и легкого (б) люков: 1 –  $\Delta T_{A_2-A_1}$ ; 2 –  $\Delta T_{A_3-A_1}$ ; 3 –  $\Delta T_{A_3-A_2}$ ; 4 –  $\Delta T_{A_4-A_1}$ ; 5 –  $\Delta T_{A_4-A_2}$ ; 6 –  $\Delta T_{A_4-A_3}$

### Литература

1. Чичко А.Н., Марков Л.В. Расчет динамики изменения температур при заполнении металлической формы // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. Ч.1. С. 57–63.
2. Чичко А.Н., Марков Л.В. Математическое моделирование термонапряженного состояния кокиля с целью повышения его стойкости // *Литье и металлургия*. 2005. № 1. С. 70–75.
3. Чичко А.Н., Марков Л.В. Моделирование динамики изменения температур в отливке и форме при варьировании различных теплофизических характеристик кокиль-

- ных покрытий // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. Ч.1. С. 52–56.
4. Чичко А.Н., Матюшинец Т.В., Марков Л.В. Общая алгоритмическая схема процесса проектирования кокильной оснастки // *Литье и металлургия*. 2006. №1. С. 34–37.
5. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // *Докл. НАН Беларуси*. 2001. Т.45. №4. С. 110–114.
6. Чичко А.Н., Матюшинец Т.В., Марков Л.В. Алгоритмизация компьютерного проектирования литейных деталей с помощью CAD-систем // *Литье и металлургия*. 2005. №4. С. 35–37.