

УДК 621.74.043:  
621.74.08

V.D. Ilyukhin,  
A.V. Monastyrsky

Аннотация

Summary

## Компьютерное моделирование рассредоточения деформаций в методе борьбы с горячими трещинами

## Computer simulation of deformation dispersion in the hot crack control method

**В.Д. Илюхин, А.В. Монастырский**

В статье представлена конструкция литейной формы, марка литейного сплава на основе алюминия и другие технологические параметры. Эксперимент демонстрирует эффективность метода рассредоточения деформации для Al-сплавов при литье в кокиль. Моделирование описанного эксперимента проведено в системе компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт». Дано общее описание применяемой математической модели напряжено-деформированного состояния отливки, показаны результаты моделирования и сравнение их с результатами эксперимента.

### Ключевые слова

Горячие трещины, компьютерное моделирование, напряжения, деформации, литье в кокиль, алюминиевые сплавы, пластические деформации.

The article presents the design of the casting mold, the grade of the casting alloy based on aluminum and other technological parameters. The experiment shows a deformation distribution method of aluminum alloys during die-casting. A general description of the applied mathematical model of the stress-strain state of the casting is given, the simulation results are shown and their comparison with the experimental results.

### Key words

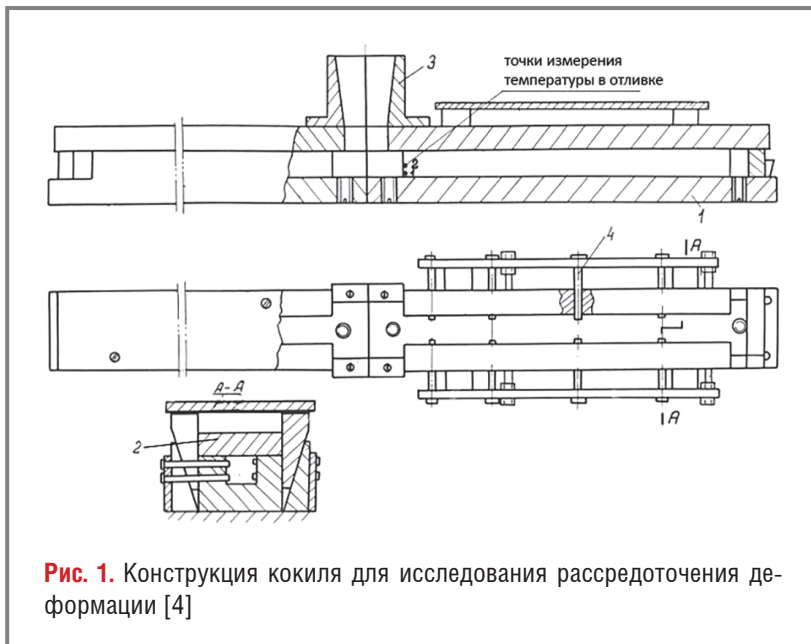
Hot tearing, computer simulation, stresses, strains, die casting, aluminum alloys, plastic strains.

### Введение

Проблема горячих трещин приобретает особенно большую остроту в связи с развитием производства новых высокопрочных и жаропрочных сплавов, так как области составов на диаграммах состояния, соответствующие максимальной прочности и жаропрочности, часто совпадают с областью составов наиболее горячеломких сплавов.

По данным И.И. Новикова [1] все промышленные высокопрочные Al- и Mg-сплавы имеют

наибольший показатель горячеломкости. Причем брак по горячим трещинам чаще возникает в наиболее прогрессивных видах литья: непрерывном литье слитков, отливке деталей в постоянные формы, литье выжиманием. Резко выраженная горячеломкость сплавов при литье сильно осложняет, а часто делает и практически невозможным внедрение в серийное производство новых сплавов с ценными эксплуатационными свойствами. В связи с этим необходим научно-обоснованный



**Рис. 1.** Конструкция кокиля для исследования рассредоточения деформации [4]

и компьютерно-моделируемый подход к разработке технологии полученияливок из таких сплавов.

Из теорий и практики литейной технологии известно [2, 3], что одна из основных причин образования горячих трещин – концентрация деформации в наиболее слабой (горячей) части отливки. Одним из эффективных технологических приемов устранения трещин является принудительное распределение деформации, путем создания

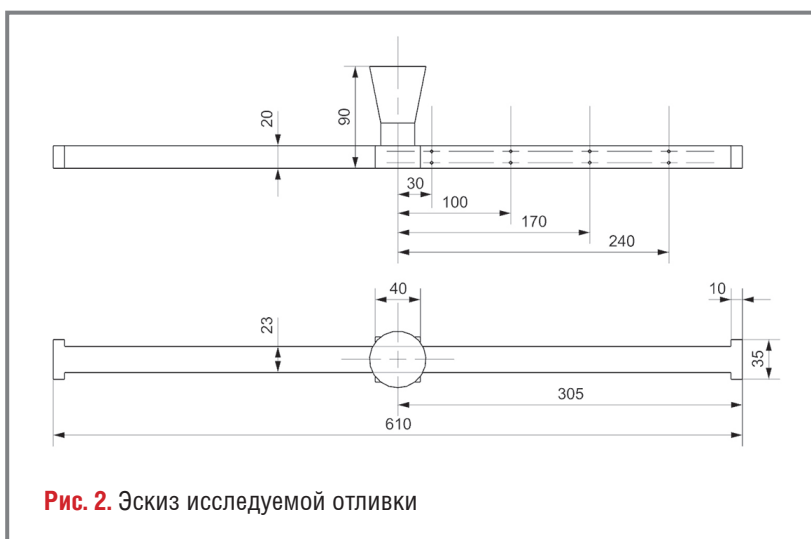
сил сцепления отливки с формой. Для неподатливой формы это можно организовать путем создания выступов, впадин или дополнительных ребер в теле отливки. В работах [3, 4] были сделаны попытки рассчитать минимально допустимое расстояние между затрудняющими усадку элементами отливки или формы. Эти расчеты показывали только качественную картину, так как неравномерность температурного поля по длине отливки, которое является

основной физической причиной концентрации деформации, в них оценивалось приближенно. Системы компьютерного моделирования литейных процессов позволяют достаточно точно рассчитать температуру отливки в любой ее точке и в любой момент времени процесса. Зная динамику изменения температуры и имея достоверные данные о реологических свойствах металла, в зависимости от температуры, можно определить действительные напряжения и деформации в отливке с элементами рассредоточения, определить их оптимальную геометрию и расстояние между ними. Базируясь на ранее выполненных экспериментальных данных [5], которые показывают 100% эффективность распределения деформации на отливке-пробе, были выполнены расчеты деформации отливки-пробы в зоне образования горячей трещины и в зонах рассредоточения в программном комплексе для моделирования литейных процессов «ПолигонСофт» (разработчик CSOFT Development, Россия).

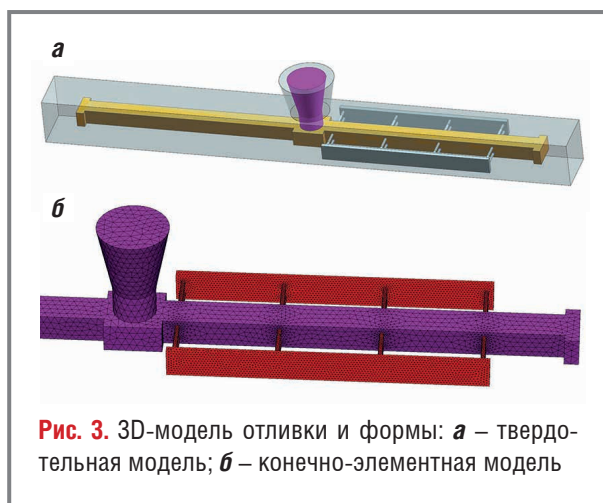
### Описание эксперимента

На рис. 1 представлен эскиз экспериментального кокиля [4]. Он состоит из двух одинаковых частей. Каждая часть кокиля имеет нижнюю плиту 1 с фрезерованным пазом, съемные части и верхнюю плиту 2. Кокиль имеет общий стояк 3 с вертикальным разъемом.

Отливка, полученная в этом кокиле, представляет собой два прямоугольных стрежня с приливами на концах и общей массивной частью в центре (рис. 2). Большая длина отливки по отношению к сечению, сопряжение тонких длинных



**Рис. 2.** Эскиз исследуемой отливки



**Рис. 3.** 3D-модель отливки и формы: **а** – твердотельная модель; **б** – конечно-элементная модель

частей с массивным стояком и наличие приливов на концах создают условия, затрудняющие усадку и благоприятные для образования горячих трещин. Левая часть отливки является эталонной, в ней образуется горячая трещина, а на правой части реализовывался метод распределения деформации стальными штифтами 4 диаметром 3 мм и выступающими в тело отливки на 2 мм. Схема расположения штифтов показана на **рис. 2**.

Эксперимент проводили следующим образом. В предварительно нагретый до температуры 250°C неокрашенный кокиль заливали Al-сплав АЛ7 (Al-4,5%Cu) при температуре 700°C. Контроль температуры расплава перед заливкой формы осуществлялся в ковше ХА-термопарой погружения. Для нагрева формы использовали печь сопротивления, температуру формы контролировали шестью ХА-термопарами, расположенными в нижних плитах 1 кокиля. Форма считалась нагретой равномерно, если разница температур в измеряемых точках составляла не более 3...5°C. Температуру расплава в кокиле замеряли в месте возможного образования трещины в точках 1 и 2 (см. **рис. 1**).

## Моделирование

Описанный выше эксперимент можно воспроизвести в системе компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт», которая использует метод конечных элементов для расчета температур, деформаций и прогноза дефектов. Для этого требуется трехмерная модель отливки и кокиля (**рис. 3**), теплофизические, механические свойства литейного сплава и начальные температуры отливки и формы.

Математическая модель тепловых процессов описана в работе [6], применяемая модель расчета

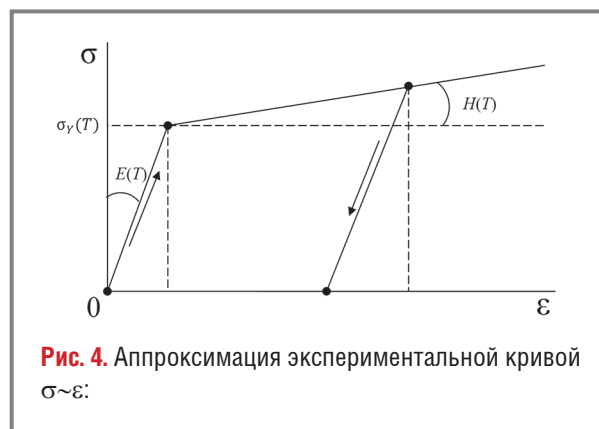
напряжено-деформированного состояния – в [7]. Для расчета напряжений используются уравнения трансляционно изотропно упрочняющегося тела с учетом температурного поля, базирующиеся на теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина [8].

Экспериментальная кривая  $\sigma \sim \varepsilon$  аппроксимируется двухзвенной ломаной кривой (**рис. 4**). Функции  $E(T)$ ,  $\nu(T)$ ,  $\alpha(T)$ ,  $H(T)$  и  $\sigma_y(T)$  характеризуют зависимость механических свойств от температуры и считаются известными.

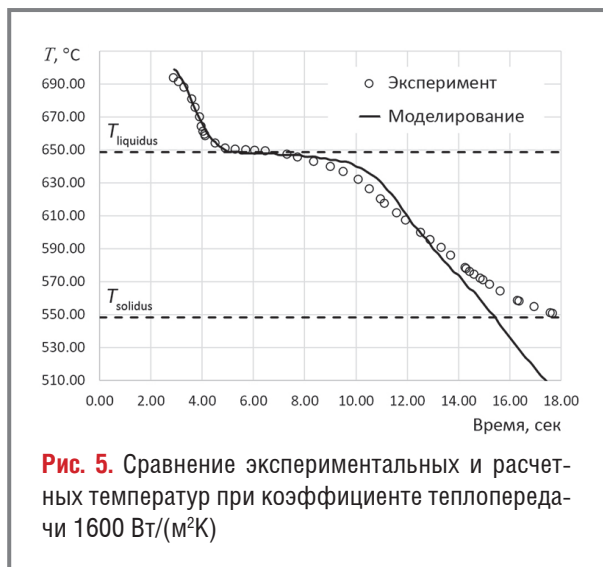
Для проведения корректного сравнения эксперимента и результатов моделирования необходимо добиться хорошего совпадения температурных кривых, записанных по показаниям термопар и температурной истории, записанной в заданных точках геометрии при проведении численных экспериментов. На ход затвердевания отливки наибольшее влияние оказывают характеристики материала отливки и формы, а также коэффициент теплопередачи, который задает интенсивность теплообмена между расплавом и кокилем, включая качество контакта двух материалов, образование зазора при затвердевании и т.д. Свойства реальных материалов могут меняться от эксперимента к эксперименту, поэтому наиболее удобный способ настройки модели теплопередачи для получения результатов, соответствующих экспериментальным данным – это настройка коэффициента теплопередачи на границе отливки с формой.

## Результаты моделирования и их анализ

Качественное и количественное совпадение результатов моделирования с экспериментом напрямую зависит от применяемых математических моделей, точности повторения условий расчета с реальностью и исходных данных, в первую очередь – теплофизических и механических свойств



**Рис. 4.** Аппроксимация экспериментальной кривой  $\sigma \sim \varepsilon$ :



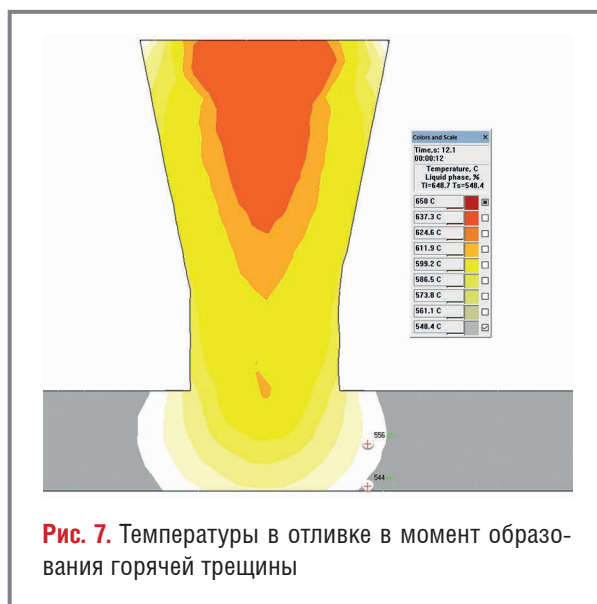
применяемых материалов. Экспериментальное исследование характеристик материала – трудоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому большинство производителей отливок доверяют специальному программному обеспечению – термодинамическим базам данных, позволяющим рассчитать необходимый для моделирования набор характеристик по химсоставу сплава. Качество этих расчетов – предмет отдельного исследования, однако часто удается использовать расчетные теплофизические и механические характеристики для качественной оценки работы литниковой системы, в том числе и для прогноза образования холодных и горячих трещин. В настоящей работе использованы подобные термодинамические расчеты.

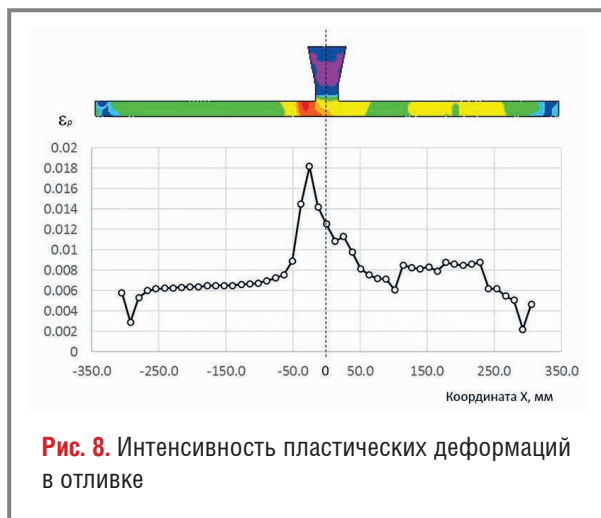
Поскольку основа расчета напряжений и деформаций в отливке – это температурные поля, т.е. история затвердевания и остывания отливки, параметры тепловой модели были настроены для максимального совпадения расчетных полей с замерами температур, выполненными при проведении эксперимента. Точки замера температур в отливке показаны на рис. 1. Для регистрации температуры использовали хромель-копелевые термопары с диаметром термоэлектродов 0,2 мм

и светолучевой многоканальный осциллограф. Погрешность измерительной системы составляла не более 2°C.

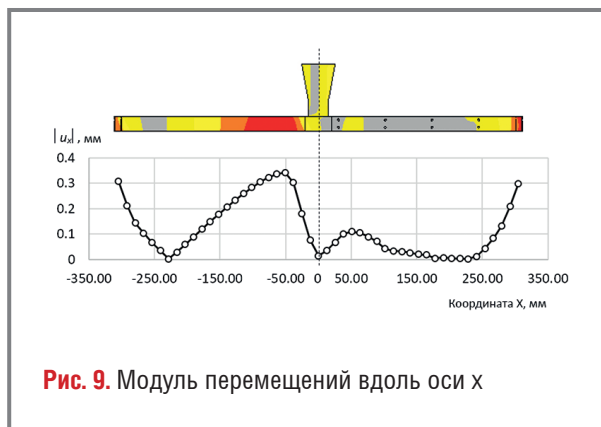
На рис. 5 показано сравнение экспериментальных замеров температур в т. 2, т.е. по центру сечения отливки с температурами, рассчитанными примерно в том же месте при моделировании затвердевания. Для наилучшего совпадения данных подбирали коэффициент теплопередачи между отливкой и кокилем. На рис. 5 показана температурная кривая, полученная при коэффициенте теплопередачи 1600 Вт/(м²К).

Экспериментально установлено, что трещина в левой эталонной части отливки образуется, когда температура в исследуемой зоне была равна ~ 550...560°C, что соответствует содержанию твердой фазы 95...97%. (рис. 6). Экспериментальные данные, приведенные в работах [9, 10, 11], доказывают, что горячие трещины – это явление, которое происходит в двухфазной зоне с высоким содержанием твердой фазы и в присутствии деформаций. Например, авторы публикации [9] использовали радиографию для наблюдения за возникновением и развитием горячих трещин в своей экспериментальной установке. Они пришли к заключению, что горячие трещины зарождаются при содержании в расплаве 93% твердой фазы (исследование проведено для Al-сплава). В последнее время для изучения горячих трещин часто используют томографию, позволяющую получить 3D-визуализацию дефекта с помощью серии рентгеновских снимков вращающегося образца [10]. Например, в работе [11] проведено исследование





**Рис. 8.** Интенсивность пластических деформаций в отливке



**Рис. 9.** Модуль перемещений вдоль оси x

накопления повреждений в образце при растяжении при высокой доле твердой фазы ( $\geq 98\%$ ). На основании этих и других исследований можно утверждать, что в левой части образца (см. **рис. 6**) формируется горячая трещина.

Анализ результатов моделирования показывает, что при достижении в точках установки термпар температур, благоприятных для образования горячей трещины, более дальние участки отливки уже твердые (**рис. 7**). Это означает, что зона образования горячей трещины действительно является зоной риска, в которой будут возникать максимальные пластические деформации (**рис. 8**).

Зона максимальных пластических деформаций на **рис. 8** соответствует зоне образования горячей трещины в левой части отливки при проведении эксперимента. При этом уровень пластических деформаций в эталонной части отливки, кроме зоны трещины, относительно невелик. Это можно объяснить тем, что при изменении размеров (**рис. 9**) эталонной части все деформации происходили в наиболее горячей зоне, где предел текучести

сопротивлению деформации меньше, чем в твердой части отливки. В правой экспериментальной части наиболее горячая зона также находилась около воронки (см. **рис. 7**) и уровень механических свойств в этой зоне был таким же низким, как и в эталонной части, но благодаря штифтам перемещения в зоне риска были меньше. Штифты заблокировали возможность перемещаться для правой части отливки за исключением ее конца, где нет штифтов и где находится зона максимальных перемещений. В эталонной части отливки максимум перемещений находится около зоны образования трещины – в зоне повышенных пластических деформаций.

## Выводы

- Проведенная работа показала, что применение компьютерного моделирования позволяет более эффективно и глубоко изучить процессы, протекающие в отливке, в частности, выявить зоны риска, в которых могут формироваться горячие трещины. Как критерий для выявления этих зон можно использовать величину концентрации пластических деформации.

- Эксперимент и математическое моделирование в «ПолигонСофт» подтверждают многочисленные исследования, показывающие связь между напряженным состоянием отливки и малым количеством жидкой фазы в зонах формирования горячих трещин.

- Использование принудительного распределения деформации, путем создания в форме дополнительных элементов, сдерживающих перемещение более холодной части отливки, дало положительный эффект в рамках эксперимента и находит применение в литейной практике [4].

- Математическая модель расчета напряжений и деформаций, применяемая в СКМ ЛП «ПолигонСофт», может быть использована для выявления зон риска образования горячих трещин, а также для разработки технологических мер по их предотвращению, и в частности, методом рассредоточения деформации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**1. Новиков И.И.** Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – М.: Наука, 1966. – 298 с.

**2. Баландин Г.Ф.** Основы теории формирования отливки. Часть II. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.

Машиностроение, 1979. – 335 с.

**3. Степанов Ю.А., Гини Э.Ч., Соколов Е.А., Матвейко Ю.П.** Литье тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1966. – 255 с.

**4. Константинов Л.С., Трухов А.П.** Напряжения деформации и трещины в отливках. – М. Машиностроение, 1981. – 199 с.

**5. Илюхин В.Д.** Исследования силового взаимодействия затвердевающей отливки с формой и образование горячих трещин: дисс...к-та техн. наук. – М.: МАМИ, 1975. – 192 с.

**6. Тихомиров М.Д.** Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача // Литейное производство. – 1998. – №4. – С. 30–34.

**7. Александрович А.И.** Моделирование термоупругопластического прочностного состояния трехмерных изделий / Александрович А.И., Монастырский А.В., Соловьев М.Б. // Сообщения по прикладной математике / Вычислительный центр им. А.А. Дородницына. – М.: РАН. – 2006. – 30 с.

**8. Ильюшин А.А.** Механика сплошной среды. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 286 с.

**9. Davidson C., Viano D., Lu L. and StJohn D.H.** Observation of crack initiation during hot tearing. Int. J. Cast Metal Res., 19, 2006, pp. 59–65.

**10. Ludwig O., Dimichiel M., Salvo L., Suéry M. and Falus P.** In-situ three-dimensional microstructural investigation of solidification of an Al-Cu alloy by ultrafast X-ray microtomography // Metall. Mater. Trans. A, 36A, pp. 1515–1523, 2005.

**11. Phillion, S. Cockcroft, and P. Lee.** X-ray microtomographic observations of hot tear damage in an Al-Mg commercial alloy // Scripta Mater., 55, 2006, pp. 489–492.

### Сведения об авторах

**Илюхин Виктор Дмитриевич** – канд. техн. наук, доц., Мосполитех. E-mail: iluhvd.l@yandex.ru

**Монастырский Алексей Валерьевич** – канд. техн. наук, зам. руководителя отдела, АО «СиСофт». E-mail: avmonastyrsky@gmail.com

ВНИМАНИЕ!

## Наши журналы Вы найдете в каталогах:

	«Литейное производство»	«Металлургия машиностроения»
Объединенный каталог «Пресса России», индекс	42306	42207
Каталог «Урал-пресс», индекс	70491	80468

Подписку также можно оформить в редакции.

Адрес: 111396, Москва, Союзный пр-т, 14/9, 232  
Тел./факс: +7 (495) 303-85-81; e-mail: lp@niit.ru

## ВНИМАНИЕ!

Журналы «Металлургия машиностроения», «Литейное производство» можно приобрести в редакции. Цена печатной (электронной) версии журнала:

«Металлургия машиностроения» – 750 (600) руб.,

«Литейное производство» – 650 (550) руб.