

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный
технический университет»**

Л. С. Печенкина

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ
ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ
МЕТАЛЛУРГИИ**

Практикум

Воронеж 2019

УДК 621.74:669.00189.57(075.8)

ББК 34.61:34.32.30В6я7

П317

Рецензенты:

ООО «Литейщик» (г. Воронеж)

(директор канд. техн. наук А. В. Щетинин);

канд. физ.-мат. наук, доцент Воронежского филиала РГУПС

А. А. Лукин

Печенкина, Л. С.

П317 Моделирование литейных процессов и объектов металлургии: практикум [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (780 Кб) / Л. С. Печенкина. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-0771-2

В пособии изложены основные положения автоматизированного проектирования, возможности и принципы работы программ трехмерного твердотельного проектирования и системы автоматизированного моделирования литейных процессов «Полигон».

Издание соответствует требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 22.03.02 «Металлургия» (профиль «Технология литейных процессов»), дисциплине «Моделирование литейных процессов и объектов металлургии».

Ил. 13. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.74:669.00189.57(075.8)

ББК 34.61:34.32.30 В6 я7

*Издается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-0771-2

© Печенкина Л. С., 2019

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2019

ВВЕДЕНИЕ

Современное литейное производство является сложным взаимосвязанным комплексом технологических процессов, имеющих дело с многочисленными и разнообразными материалами, с их использованием и переработкой. Результатом их реализации является получение отливок, к качеству которых предъявляются постоянно возрастающие требования по точности размеров и конфигурации, структуре, механическим свойствам, герметичности, износостойкости и другим служебным характеристикам, обеспечивающим работоспособность и эксплуатационную надежность литых деталей.

Анализ современных тенденций и оценка перспектив развития литейного производства показывают, что системы автоматизированного проектирования (САПР) в ближайшей перспективе займут важное место в комплексе средств автоматизации инженерной деятельности. Поэтому САПР должна быть открытой к развитию в наиболее важных звеньях, а пользователь САПР должен быть подготовлен к этой деятельности с учетом принципов, заложенных разработчиками.

При организации подготовки инженера-литейщика применению САПР необходимо обеспечить включение новых важных разделов, отвечающих требованиям литейной кафедры. Исходя из этого, возникла потребность в небольшом по объему пособии, в котором подробно рассмотрены основные методы моделирования и новые компьютерные технологии при производстве отливок.

Предлагаемые меры направлены на то, чтобы молодой специалист мог легко ориентироваться при выборе стандартных средств автоматизации инженерного труда технолога-литейщика и принимать участие в разработке и освоении прикладных программ для решения производственных задач.

Цель данного учебного пособия – научить методам моделирования и умению использовать их для решения различных задач литейного производства.

ПЕРЕЧЕНЬ ЗАДАЧ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ, РЕШАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

1. Расчет поля температур в отливках.
2. Расчет затвердевания отливок (движение фронта кристаллизации).
3. Анализ термических напряжений в отливках.
4. Расчетный анализ химической неоднородности слитка.
5. Анализ зарождения и роста кристаллов.
6. Тепловые расчеты кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок.
7. Расчет узлов вторичного охлаждения слитков в машинах непрерывного литья заготовок.
8. Расчет процессов затвердевания непрерывных слитков в машинах непрерывного литья заготовок.
9. Расчет тепловых параметров процесса литья в облицованный кокиль.
10. Расчет напряженно-деформированного состояния облицованного кокиля.
11. Расчет технологии литья в кокиль по заданной структуре чугуна.
12. Выбор технологии литья в кокиль по заданной структуре чугуна.
13. Выбор технологии литья с учетом стойкости кокиля.
14. Расчет усилия запираения кокиля и концентрирование запирающего механизма.
15. Расчет усилия извлечения металлических стержней из отливок и концентрирование извлекающих механизмов.

16. Расчет временных и остаточных напряжений в отливках.

17. Расчет коробления отливок.

18. Расчет и технологические принципы конструирования прессово-подпрессовочных механизмов в машинах ЛПД.

19. Расчет усилий прессования и подпрессовки в машинах ЛПД и конструирование соответствующих механизмов.

20. Расчет усилия запирающего пресс-формы в машинах ЛПД и конструирование соответствующих механизмов.

21. Расчет усилий выталкивания и извлечения стержней из отливок в машинах ЛПД и конструирование соответствующих механизмов.

22. Расчет ленточных, пластинчатых, скребковых, подвесных и прочих конвейеров.

23. Расчет пневматических транспортных установок.

24. Расчет производительности и показателей надежности автоматических литейных линий в зависимости от вида транспортных связей.

25. Математическое моделирование процессов уплотнения песчано-глинистых форм при различных способах уплотнения.

26. Конструирование отливок.

27. Моделирование потока расплава с помощью ЭВМ при конструировании литниковых систем.

28. Проектирование литниковых систем.

29. Моделирование процессов теплопередачи и миграции влаги в сырой песчаной форме.

30. Моделирование процесса затвердевания при литье:

а) в песчаные формы;

б) в кокиль;

в) в оболочковые формы;

г) под давлением;

д) центробежном и др.

31. Оптимизация состава шихты для выплавки:
 - а) различных составов сталей;
 - б) различных составов чугунов;
 - в) алюминиевых, магниевых, медных, никелевых, титановых, цинковых, и др. сплавов.
32. Разработка технологических процессов.
33. Применение ЭВМ для экспресс-информационного и справочного назначения.
34. Моделирование процесса охлаждения отливок.
35. Определение параметров прибылей и холодильников.
36. Моделирование процесса импульсного уплотнения форм (уплотнения вообще).
37. Оптимизация процесса ЛПД.
38. Анализ трещиностойкости отливок.
39. Применение ЭВМ для управления литейными процессами.
40. Моделирование условий формирования отливок.
41. Выбор поверхности разъема формы.
42. Определение состава различных смесей.
43. Корректировка химического состава стали и сплавов при расчете добавок на ЭВМ.
44. Расчет границ области усадочной раковины.
45. Решение задачи выбора типа литниковой системы.
46. Расчет холодильников.
47. Оптимизация параметров непрерывного горизонтального литья.
48. Использование данных термического анализа для прогнозирования первичной структуры чугуна с помощью ЭВМ.
49. Экономико-математическое моделирование эффективности использования чугуна с шаровидным графитом.
50. Оптимизация химического состава чугуна для центробежно-литых труб по критерию качества.
51. Прогноз качества изделий из сплава АЛ9.

52. Диагностика размерной точности отливок массового производства.

53. Изучение влияния избыточного давления на теплообмен расплава и металлической формой.

54. Оценка технологичности отливок.

55. Выбор оптимальных параметров заливки форм.

56. Реализация матриц планирования экспериментов.

57. Расчет времени охлаждения отливки в песчано-глинистой форме методом интегрального теплового баланса.

58. Расчет границ области усадочной раковины для сплавов, кристаллизующихся в интервале температур.

59. Выбор способа формообразования с целью повышения коэффициента использования металла отливок с помощью ЭВМ.

60. Оценка технологичности конструкции отливки с помощью ЭВМ.

61. Моделирование температурно-временных полей на границах раздела металл-форма.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Порядок выполнения работы

1. Составить план эксперимента 2^3 для определения влияния состава смеси на её качество. Получив у преподавателя основные уровни значения факторов (содержание глины, воды, свежего песка) и интервалы их варьирования, определить верхний и нижний уровни варьирования факторов по формулам

$$X_{vi} = X_{oi} - \Delta X_i ; \quad (1)$$

$$X_{ni} = X_{oi} + \Delta X_i , \quad (2)$$

где X_{oi} – основной уровень значения факторов;

ΔX_i – интервал варьирования факторов.

2. Составить план эксперимента 2^3 в натуральных и кодированных значениях факторов (табл. 1).

Таблица 1

План эксперимента

Но- мер опы- та	Значения факторов					
	X ₁ (содержание влаги)		X ₂ (содержание глины)		X ₃ (содержание свежего песка)	
	коди- рован- ное	нату- раль- ное, %	коди- рован- ное	нату- раль- ное, %	коди- рован- ное	нату- раль- ное, %
1	+1	X _в	+1	X _в	+1	X _в
2	+1	X _в	+1	X _в	-1	X _н
3	+1	X _в	-1	X _н	+1	X _в
4	+1	X _в	-1	X _н	-1	X _н
5	-1	X _н	+1	X _в	+1	X _в
6	-1	X _н	+1	X _в	-1	X _н
7	-1	X _н	-1	X _н	+1	X _в
8	-1	X _н	-1	X _н	-1	X _н

3. Приготовить формовочные смеси в соответствии с табл. 1 и выполнить контроль их технологических свойств (предел прочности при сжатии, газопроницаемость). Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Кодированное значение факторов и результаты контроля технологических свойств.

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₂ X ₃	X ₁ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Результаты измерений	
									σ _i , МП а	K _i , усл. ед.
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y ₁	K ₁
2	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y ₂	K ₂
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	y ₃	K ₃
4	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	y ₄	K ₄
5	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	y ₅	K ₅
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	y ₆	K ₆
7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y ₇	K ₇
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y ₈	K ₈

Примечание: В таблицу заносят средние значения результатов трех измерений, если одно из них не отличается от другого более чем на 10 %.

Определить по критерию Кохрена однородность дисперсий опытов при определении каждого технологического свойства

$$G = \frac{\max S^2(y)}{\sum S^2(y)}; \quad (3)$$

$$S^2(y) = \frac{(y_i - \bar{y})^2}{c}, \quad (4)$$

учитывая $\nu_1 = c - 1$; $\nu_2 = N(c - 1)$ – степень свободы

При $G < G_{\text{табл}}$ дисперсия однородна

Таблица 3

План эксперимента (усеченного) с четырьмя факторами

№ опыта	Значения факторов							
	В кодированном виде				В натуральном виде			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄				
1	-1	-1	-1	+1				
2	+1	-1	-1	+1				
3	-1	+1	-1	-1				
4	+1	+1	-1	-1				
5	-1	-1	+1	-1				
6	+1	-1	+1	-1				
7	-1	+1	+1	+1				
8	+1	+1	+1	+1				

4. Рассчитать уравнение регрессии

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{23}X_2X_3 + a_{13}X_1X_3 + a_{123}X_1X_2X_3. \quad (5)$$

Для расчета коэффициента регрессии использовать формулы:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{y}_i}{8}; \quad (6)$$

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{y}_i X_i}{8}; \quad (7)$$

$$a_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{y}_i X_i X_j}{8}; \quad (8)$$

$$a_{ijk} = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{y}_i X_i X_j X_k}{8}, \quad (9)$$

где \bar{y}_i – результаты измерений функции отклика;
 X_i – кодированное значение фактора в i -том опыте.

5. Оценить значимость коэффициентов математической модели.

Значимыми являются те коэффициенты, величина которых превышает значение $b_{кр}$. Величину $b_{кр}$ определяют по формуле

$$b_{\epsilon\delta} = t_{v\alpha} S(b). \quad (10)$$

Дисперсия ошибки определения коэффициентов модели можно определить по двум формулам:

$$S^2(b) = \frac{S_i^2}{N} \quad \text{или} \quad S^2(b) = \frac{\sum S^2}{N}, \quad (11)$$

где $t_{v\alpha}$ – коэффициент Стьюдента, при $\alpha = 0,95$ и

$$v = N \times (c - 1);$$

c – число параллельных измерений;

N – количество опытов по плану эксперимента

(для модели $2^3 N=8$);

S^2 – дисперсия измерений в каждой точке плана эксперимента.

Если $b_{кр} > b_i$, то коэффициент незначим с $\alpha = 0,95$.

6. Уточнить математическую модель, отбросив незначимые члены регрессии.

7. Преобразовать уравнение регрессии, перейдя от кодированных значений переменных к их натуральным значениям

Формула кодирования:

$$Z = \frac{X_i - \frac{X_i \max + X_i \min}{2}}{\frac{X_i \max - X_i \min}{2}}. \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Подставляется } X_i &= X_{\max} = +1; \\ X_i &= X_{\min} = -1. \end{aligned}$$

Определяем адекватность модели, т. е. рассчитываем дисперсию неадекватности (отклонения расчетных значений от эксперимента):

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - d}, \quad (13)$$

где \hat{y}_i – расчетное значение;

y_i – экспериментальное;

d – число отброшенных членов.

Находим критерий Фишера при $\nu_1 = N - d$ и $\nu_2 = N(c - 1)$:

$$F = \frac{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}{S^2(y_0)} \quad \text{или} \quad F = \frac{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}{\sum S^2}. \quad (14)$$

При $F < F_{\text{табл}}$ полученная модель адекватна.

Преобразование уравнений производится заменой переменных по следующей формуле:

$$X'_i = \frac{X_i - X_{oi}}{\Delta X_i}. \quad (15)$$

Подставляя из (15) значения X_i и упрощая выражение, получим уравнение регрессии в натуральных значениях факторов.

8. Зафиксировать одну из трех переменных и перевести модели из трехфакторных в двухфакторные.

Целесообразно фиксировать количества свежего песка, вводимого в смесь, так как при изготовлении отливок в сырых песчано-глинистых формах степень освежения смеси составляет 20-25 %. Подставляя $X_3 = 20$ в математические модели, привести их к двухфакторным.

9. Решить уравнение регрессии, полученные после фиксирования переменных относительно одного из факторов.

10. Построить номограммы для выбора оптимального состава смеси.

По литературным данным определить максимальные и минимальные значения свойств смеси. Подставляя эти значения и значения фактора X_2 (в пределах интервала варьирования), вычислить соответствующие значения X_1 для каждого из исследуемых свойств. По расчетным значениям X_1 и X_2 построить номограммы для определения оптимального значения качества формовочной смеси.

11. Анализируя номограмму, определить состав смеси, обеспечивающий оптимальные технологические свойства.

12. В выводах необходимо объяснить характер смеси и степень влияния компонентов смеси на ее качество

Значение критерия Стьюдента при $\alpha = 0,95$

$\nu = N(c - 1)$	8	16	24	32	40	60	120
$t_{0,95\nu}$	2,31	2,12	2,06	2,04	2,02	2,00	1,98

В процентах

Факторы	X ₁ (содержание глины)	X ₂ (содержание песка)	X ₃ (содержание воды)
Основной уровень	15	85	6
Интервал варьирования	5	5	2
Верхний уровень	20	90	8
Нижний уровень	10	80	4

Значение критерия Кохрена при $P = 0,95$

ν_1	Число степеней свободы ν_2						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,999	0,975	0,939	0,906	0,858	0,853	0,833

Значение критерия Фишера при $P = 0,95$

v_1	v_2	
	8	16
1	239	246
2	19,37	19,43
3	8,84	8,69
4	6,04	5,84
5	4,82	4,60
6	4,15	3,92
7	3,73	3,49
8	3,44	3,20

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТОЙ
ОТЛИВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ
ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Цель работы:

1. Ознакомиться с программами трехмерного твердотельного проектирования.
2. Создать модель отливки «Плита» с различными вариантами прибылей.

Оборудование: персональный компьютер на базе процессора (минимальные требования) IntelPentiumII, 128 Мб оперативной памяти; программы трехмерного твердотельного моделирования.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Автоматизированное проектирование обеспечивает поддержку процессу проектирования. Следовательно, прежде чем изучать автоматизированное проектирование, мы должны изучить сам процесс проектирования, т. е. мы должны создать хотя бы упрощенную модель процесса проектирования. Одна-

ко трудность состоит в том, что процессы проектирования сильно отличаются друг от друга и зависят от конкретного изделия, от вида проекта (проектирование на базе типовых решений или полностью оригинальный проект нового изделия). Целью введения понятий моделирования процесса проектирования является обеспечение специалиста в области системного анализа средствами описания глобальной системы, которой должна соответствовать разрабатываемая система автоматизированного проектирования (САПР). Как разработчик САПР, так и ее потенциальный пользователь должны иметь возможность согласовывать описание интерфейсов автоматизированных этапов процесса проектирования с остальными этапами этого процесса. Такие интерфейсы легко описывать, если процесс проектирования может быть адекватно представлен последовательностью или цепочкой действий так, что результаты каждого действия передаются для выполнения следующего.

Опишем самую общую модель «типичного» процесса проектирования. На рис. 1 показан первый вариант такой модели.

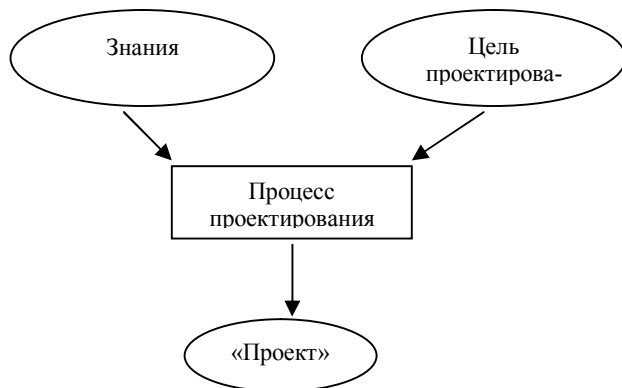


Рис. 1. Простейшая модель процесса проектирования

Мы можем говорить о воспринимаемой реальности, давая имена объектам и атрибутам объектов. Один из этих объ-

ектов и является изделием, о котором у нас сформировалось представление. Однако в общем случае нас не интересуют все аспекты воспринимаемой реальности, мы выбираем лишь те аспекты, которые существенны для некоторого практически осуществимого образа действий.

В инженерных разработках вопрос об экономии – главный. Таким образом, в автоматизированном проектировании (АПР) мы должны среди других аспектов выделить экономический как наиболее важный.

Как следствие, только в исключительных случаях проекты будут выполняться целиком ЭВМ.

При автоматизированном проектировании наибольшего успеха можно добиться при хорошо организованном взаимодействии между проектировщиком и ЭВМ.

Другое существенное отличие АПР от обычного проектирования состоит в том, что, кроме формального представления данных, необходимо создать среду, в которой процесс проектирования может выполняться. Ограничения возможностей компьютера (память, диски, графические дисплеи, так же как и широко используемые языки программирования) являются частью среды. Даже если бы мы могли придумать «идеальную» с функциональной точки зрения САПР для определенного процесса проектирования, мы не могли бы реализовать ее из-за необходимости учитывать ограничения, налагаемые средой. Следующие ограничения ЭВМ представляются наиболее существенными: неспособность ЭВМ «распознавать ситуацию»; неспособность работать с правилами (вместо этого программы для ЭВМ требуют правил, представленных в алгоритмической форме, которая в большинстве случаев еще должна быть найдена); неудовлетворительная эффективность при работе с изменениями модели в задачах синтеза.

Влияние этих недостатков может уменьшиться при более широком применении в САПР методов искусственного интеллекта. Однако в наши дни методы АПР большей частью при-

меняются в двух главных областях проектирования: синтез, преимущественно во взаимосвязи с проектировщиком; анализ, преимущественно в автоматическом режиме.

При проектировании изделия необходимо учитывать множество различных его характеристик, а именно: функцию, общий вид, технологичность, эксплуатационные параметры, экономические показатели.

Основным моментом проектирования является определение общего вида, поскольку все остальные параметры существенно на него влияют.

Для автоматизированного проектирования трехмерных объектов решающее значение имеет описание геометрических параметров деталей и узлов. Общепринятая методика черчения предполагает, что описание геометрических параметров представляет собой процесс, состоящий из двух или из трех этапов. Сначала задается условный или идеальный трехмерный объект – «общий вид» (обычно в виде чертежа без указания допусков). На втором этапе вводятся допуски, при этом чертеж соответствует не одному объекту, а некоторому классу трехмерных объектов, которые функционально эквивалентны и могут представляться в процессе сборки. Параметры, которые могут быть указаны на инженерных чертежах, задают на заключительном этапе или вместе с допусками.

Инженерные чертежи – несовершенный способ описания деталей. Поскольку инженеры и техники располагают дополнительными знаниями (назначение устройства, общие принципы механики и т. д.), они, как правило, могут извлекать из чертежей информацию, необходимую для правильного изготовления и сборки деталей. ЭВМ (или программы интерпретации чертежей) обычно делать этого «не умеют». Поэтому для сложных задач нужны новые способы точного описания того, что требуется сделать (например, для систем автоматизированного производства).

Разработать специальные алгоритмы для осуществления геометрических преобразований при помощи ЭВМ нетрудно, но в них не будут учтены некоторые важные свойства, которые существенны для полностью автоматизированного производства. Например, достоверная схема представления должна быть полной и непротиворечивой, каждая деталь из данного класса должна иметь представление, а каждое представление должно соответствовать только одной детали. Ни одна из известных в настоящее время систем машинной графики указанными свойствами не обладает.

Однако помимо описания общего вида для задания геометрических параметров существуют и другие методы. Любой приемлемый для промышленности метод описания должен располагать в полном объеме средствами корректного задания допусков, точности обработки поверхностей и подобных параметров. Кроме того, жизнеспособная система должна быть удобной в эксплуатации и достаточно эффективной.

Основной целью подготовки специалистов в высших учебных заведениях, в том числе и в университетах, является обеспечение квалифицированными кадрами промышленности и других отраслей экономики. С этой точки зрения проблему внедрения новых информационных технологий в образовании можно рассматривать с двух точек зрения: как соответствие информационным технологиям производства и общества, во-первых, и как развитие технологического процесса образования, во-вторых.

AutodeskInventorSeries – комплекс программного обеспечения для выполнения проектов крупных машиностроительных сборок. Включает пакеты двумерного и трехмерного параметрического проектирования: AutodeskInventor 5.3, AutodeskMechanicalDesktop 6 PowerPack и AutoCAD 2002.

AutodeskInventorSeries предоставляет пользователю возможность самостоятельно выбирать решение для своих задач:

- работать в двумерном пространстве с помощью AutoCAD или AutoCADMechanical и применять средства твердотельного, поверхностного и каркасного моделирования – AutodeskMechanicalDesktop;

- использовать AutodeskInventor как систему, позволяющую работать с крупными сборками.

- создавать эскизы при проектировании новых деталей в контексте сборки, можно напрямую обращаться к геометрии других деталей.

- создавать сечения и детальные виды, причем при перемещении линии сечения автоматически обновляется и само сечение. Изменение размеров модели автоматически приводит к ее перерисовке.

- поддерживать размерные и текстовые стили, а также их импорт из AutoCAD с помощью AutodeskInventor Инструменты образмеривания и дооформления рабочей документации обеспечивают быстрый выпуск чертежей.

Изготовления отливки в массовом производстве с применением ЭВМ состоит из следующих этапов: конструирование детали, разработка технологии изготовления отливки, проектирование модельно-стержневой оснастки, изготовление (выращивание) моделей стереолитографией, производство опытной партии отливок и ее обследование, корректировка чертежей модельной оснастки, изготовление оснастки и собственно производство отливок. Каждый из названных этапов уже применяется в реальном производстве, кроме этапа разработки технологии изготовления отливки. Анализ справочной литературы показал, что некоторые рекомендации по проектированию этого этапа неоднозначны, противоречивы и мало пригодны для использования на ЭВМ. Поэтому попытались обобщить технологические знания с целью последующего создания САПР технологии литья в сырые песчано-глинистые формы (ПГФ). Следует отметить, что некоторые вопросы проектирования не поддаются строгой формализации. К ним можно от-

нести: выбор плоскости разъема и места подвода металла, размещение моделей на модельной плите и т.п. Для работы на ЭВМ в этих случаях созданы алгоритмы, позволяющие технологу-литейщику в диалоговом режиме выбрать необходимое решение. При этом приобретенный на практике опыт используют для проверки

правильности принятого решения. По другим вопросам проектирования может быть осуществлена формализация, но с некоторой доработкой при создании алгоритмов и программ для ЭВМ. Это относится к расчету литниковых систем, прибылей, определению параметров знаков стержней и зазоров, радиусов сопряжений стенок отливки, минимальных литейных отверстий.

Для обеспечения питания каждого термического узла отливки необходимо предусмотреть прибыль. При этом отливку разбивают на питаемые узлы, к каждому из которых относится соответствующий термический узел и примыкающие к нему участки отливки.

Применяемые на практике прибыли различают по следующим классификационным признакам:

- по направлению движения расплава при питании отливки из прибыли;
- конфигурации прибыли;
- тепловым условиям затвердевания сплава в прибыли;
- величине давления на сплав в прибыли в процессе питания отливки.

Прибыль, верхняя поверхность которой сообщается с атмосферой и выходит на верхнюю поверхность формы, называется открытой.

В закрытой прибыли вся ее поверхность, кроме участка контакта с питаемым узлом, выполняется формой.

По конфигурации прибыли подразделяются на шаровые, полушаровые, конические круглого сечения, конические овального сечения, с формой сечения, приближающейся к го-

ризональному сечению узла питания, и призматические прямоугольного сечения.

По направлению движения расплава при питании отливки из прибыли различают прямые, местные и боковые прибыли.

При питании из прибыли прямого действия сплав, компенсирующий усадку, подается в отливку по кратчайшему пути, что повышает эффективность работы прибыли. Недостатком прямых прибылей, если они устанавливаются, например, по всему периметру кольцевой отливки, является большой расход металла из прибыли. С целью экономии металла можно устанавливать вместо одной сплошной прибыли несколько местных прибылей. При применении местных прибылей прямое питание получают только части отливки, находящиеся непосредственно под прибылями. Части, находящиеся между прибылями, получают уже боковое питание. При этом различного рода включения не могут всплыть в прибыль. Поэтому на верхней поверхности отливки необходимо предусматривать повышенные припуски на механическую обработку. Местные прибыли обеспечивают питание примыкающих к ним участков отливки на определенную длину, называемую зоной действия прибыли.

Для протяженных отливок с большим отношением длины к толщине или ширине целесообразно применять боковые прибыли. Такие прибыли применяют также при изготовлении отливок из сплавов, плохо обрабатываемых резанием (сталь 110Г13Л, ковкий чугун и т.п.).

Для уменьшения охлаждения расплава в прибыли и повышения ее экономичности применяют прибыли с теплоизоляцией и подогревом сплава в прибыли с помощью экзотермических вставок (экзотермические прибыли), электрической дуги и т.п.

Для повышения эффективности работы прибыли с точки зрения обеспечения фильтрационного и суспензионного питания, что особенно важно для устранения пористости отливок, применяют повышенное газовое давление в прибылях. Следует отметить, что открытие прибыли в указанном смысле более эффективно, так как расплав в них находится под атмосферным давлением.

Прибыли эффективно питают только примыкающие к ним части отливки. Поэтому при применении местных прибылей нужно установить протяженность зоны, эффективно питаемой прибылью. Такая зона называется зоной действия отливки. Она зависит от толщины стенки отливки. Около торцов отливки из-за охлаждающего торцевого эффекта зона действия прибыли увеличивается. Очевидно, что расстояние между соседними установленными на отливке прибылями должно быть не более суммы протяженностей зон действия прибылей. Если между прибылями установить холодильник, то из-за его охлаждающего действия зона каждой прибыли увеличится.

Определив протяженность зон действия всех прибылей, установленных по периметру отливки, можно уточнить, правильно ли выбрано их количество. Расстояние между прибылями не должно превышать сумму их зон действия.

2. Основные понятия программ трехмерного моделирования.



создать



линия



эскиз



прямоуголь-
ник



окруж-
ность



вытя-
нутая бо-
бышка



размер



условия
сопряжения



повер-
нутая бо-
бышка



редактировать
деталь

Для начала проектирования необходимо запустить программу и, чтобы приступить непосредственно к проектированию, необходимо создать файл Деталь.

Теперь, для начала проектирования, необходимо выбрать плоскость, в которой будет происходить начальное построение эскизов. Нарисуем прямоугольник, как показано на рис. 2.

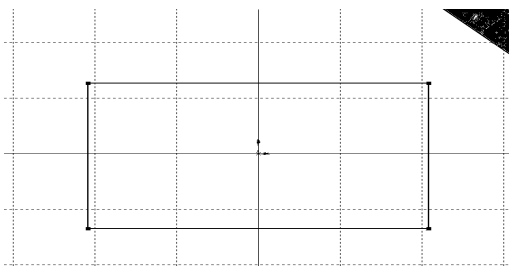


Рис. 2. Получение прямоугольника

Проставляем размеры, как показано на рис. 3.

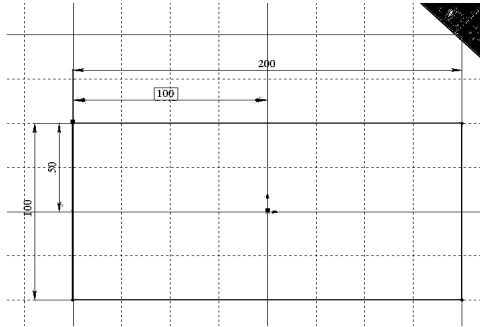


Рис. 3. Подготовка эскиза для создания объемного тела

Для перехода к объемному виду нажмем кнопку «Вращать вид», затем с использованием режима «Вытянутая бобышка» зададим толщину плиты.

Для создания прибылей выберем плоскость «Сверху» (рис. 4).

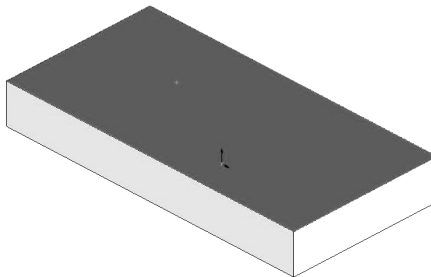


Рис. 4. Выбор плоскости для создания литниковой системы

Нарисуем окружность на выбранной плоскости и зададим ее размеры.

Построение необходимого количества прибылей аналогично (рис. 5).

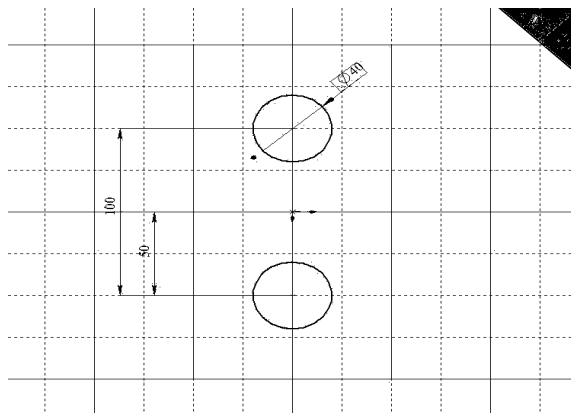


Рис. 5. Подготовка эскиза для создания прибылей

Объемный вид прибыли строится аналогично построению объемного вида плиты.

Высота цилиндра задается также как толщина плиты (для усеченного конуса размеры задаются с учетом уклона; для сферы – вытягиваем на величину радиуса и используем режим «Скругление»).

Чтобы получить объемную модель прибыли и отливки (рис. 6), необходимо использовать режим «Повернутая бо-бышка».

Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретический материал и ознакомьтесь с основными понятиями программы. Согласуйте с преподавателем номер вашего варианта. Создайте модель отливки «Плита» с тремя формами прибылей как описано в теоретической части.

2. Сформулируйте выводы по результатам проведенного эксперимента.

Полученную модель сохраним с именем «Фамилия. Модель».

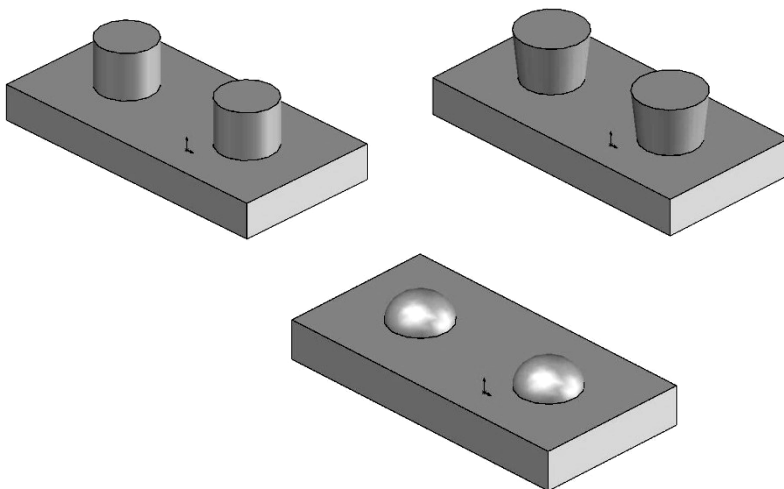


Рис. 6. Модели отливки с прибылями

Требования к отчету и контрольные вопросы

Отчет по лабораторной работе должен быть представлен в письменном виде, который должен содержать:

- название и цель работы;
- основные положения автоматизированного проектирования;
- возможности AutodeskInventorSeries.
- классификацию прибылей и способы определения протяженности зон действия прибылей;
- выводы по результатам проведенного эксперимента.

На диске следует сохранить файлы, содержащие результаты, полученные в ходе выполнения работы и подтверждающие сделанные в отчете выводы.

Варианты заданий

Вариант	Размеры плит (длина×ширина×высота), мм	Количество и размеры прибылей, мм		
		Цилиндр (диаметр×высота)	Полусфера (радиус)	Нус (диаметр нижнего основания×высота)
1	200×100×50	30×30 2шт.	25 1шт.	60×50 1шт.
2	500×400×200	100×80 1шт.	50 1шт.	25×30 2шт.
3	380×220×150	80×60 1шт.	20 2шт.	90×70 1шт.
4	400×180×100	50×50 2шт.	55 1шт.	100×90 1шт.
5	450×250×150	100×80 1шт.	25 2шт.	110×75 1шт.
6	500×350×180	150×100 1шт.	80 1шт.	70×50 2шт.
7	300×200×100	40×40 2шт.	45 1шт.	80×70 1шт.
8	350×250×160	100×100 1шт.	52 1шт.	50×50 2шт.
9	500×450×300	50×70 2шт.	48 1шт.	110×90 1шт.
10	260×120×100	60×60 1шт.	18 2шт.	65×70 1шт.
11	460×340×140	120×100 1шт.	30 2шт.	100×100 1шт.
12	420×300×150	110×110 1шт.	55 1шт.	50×48 2шт.
13	280×220×120	70×60 1шт.	30 1шт.	35×30 2шт.
14	400×360×250	110×90 1шт.	28 2шт.	100×95 1шт.
15	300×260×180	40×50 2шт.	36 1шт.	80×80 1шт.
16	480×400×200	120×80 1шт.	60 1шт.	55×50 2шт.
17	250×200×150	60×50 1шт.	15 2шт.	55×60 1шт.
18	420×300×200	120×100 1шт.	30 2шт.	110×90 1шт.
19	350×320×200	90×90 1шт.	45 1шт.	40×40 2шт.
20	500×460×250	70×70 2шт.	75 1шт.	160×150 1шт.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой общая модель процесса проектирования?
2. В чем отличие АПР от обычного проектирования?
3. Какие ограничения ЭВМ препятствуют созданию АПР?
4. Из скольких этапов состоит описание геометрических параметров? Какие это этапы?
5. В чем трудность при создании АПР?
6. Что позволяет пакет программ двумерного и трехмерного проектирования?
7. Какие этапы включает в себя изготовление отливки с применением ЭВМ?
8. Какие этапы проектирования не поддаются формализации, а какие поддаются формализации с доработкой?
9. Какие функции программы трехмерного моделирования используются при проектировании прямоугольной отливки?
10. Что необходимо сделать для начала проектирования?
11. С помощью какой функции создается объемная модель?
12. Какая функция позволяет вращать объемную модель?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы:

1. Изучить методы построения объемной литейной формы.
2. Освоить процесс проектирования формы для изготовления отливки в ПГФ с помощью программы трехмерного твердотельного моделирования.

Оборудование: персональный компьютер, на базе процессора (минимальные требования) IntelPentiumII, 128 Мб оперативной памяти; программа трехмерного твердотельного моделирования.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Скелетные модели давно применяются в моделировании трехмерных объектов. Механический расчет ферм и балок был первым примером широкого использования вычислительной техники в проектировании. Геометрические модели, используемые для подобных расчетов, пригодны и для графического представления. Элементы (обычно задаваемые отрезками прямых) конструкции могут быть начерчены непосредственно после построения перспективной проекции соответствующих узлов. Для этого можно воспользоваться элементарными средствами геометрического анализа. Криволинейные элементы также не вызывают каких-либо серьезных дополнительных проблем.

Метод представления трехмерных объектов должен удовлетворять следующим критериям:

- корректность (необходимо, чтобы существовал реальный трехмерный объект, соответствующий любому заданному изо-

бражению; иллюстраций понятия некорректности может быть линия, «висящая» в пространстве);

- полнота (необходимо, чтобы все операции, выполняемые системой, были приложимы ко всем представлениям объектов в рамках используемого метода, например, если удаление невидимых линий могло бы осуществляться для выпуклых тел, но не могло – для невыпуклых, то считалось бы, метод не полон);

- единственность (необходимо, чтобы существовал только один трехмерный объект, соответствующий любому заданному изображению; скелетное представление может быть двусмысленным, и, следовательно, критерий единственности здесь не выполняется);

- краткость (схема для представления объектов не должна содержать избыточной информации);

- простота задания и модификации информации (для снижения трудоемкости работы с трехмерными объектами внутреннее представление должно быть максимально приближено к мысленному представлению оператора во время формирования или модификации объекта или группы объектов);

- эффективность (эффективность алгоритмов обработки внутренних представлений объектов во многом зависит от структуры этих представлений; для разных алгоритмов могут лучше подходить разные представления; поэтому может оказаться выгодным ради увеличения эффективности пожертвовать краткостью и ввести в данные описания модели некоторую избыточность).

В системах моделирования трехмерных объектов, как правило, используются два метода представления: граничное представление; конструктивное объемное геометрическое (КОГ) моделирование.

Метод граничного представления более знаком пользователю, имеющему опыт работы со скелетными моделями. Каждый объект задается его границами. Каждая

граница представляет собой поверхность (плоскую или рельефную), ограниченную ребрами соседних границ. В вершинах соединяются три ребра или более. Лучше всего граничное представление подходит для генерации проекций, поскольку основные элементы в этом случае (ребра и грани) можно легко получить из объемного изображения. Геометрические и механические параметры могут быть получены численным интегрированием.

Метод конструктивного объемного геометрического представления – двухуровневый. На нижнем уровне граничные объемные примитивы задаются полупространствами (одно полупространство для сферы, три – для цилиндра, шесть – для квадратного блока). В простых случаях, когда используются только прямоугольные блоки, полупространства могут описываться параметрами (например, местоположением, ориентацией и габаритными размерами), связанными с объемным примитивом, а не задаваться явно. На втором уровне эти примитивы объединяются с помощью логических операторов (объединение, пересечение, разность), точнее, необходимо использовать нормализованную форму этих операторов. Принципиальным преимуществом КОГ-моделирования является гарантия корректности и единственности модели: граничное представление всегда может получаться единственным путем.

Другим важным способом описания объекта является операция развертки. В наиболее общем случае граничный элемент поверхности перемещается в пространстве по произвольной траектории. На практике же операция развертки соответствует сдвигу вдоль прямой линии или вращению. Эти операции развертки полезны, в частности, при моделировании производственных процессов.

В зависимости от типа поверхности можно классифицировать следующим образом:

плоские;

рельефные, аппроксимируемые плоскими поверхностями;

рельефные, описываемые при помощи «кусков» или линиями uv-сетки;

аналитические;

комбинации поверхностей указанных типов.

Системы моделирования трехмерных объектов обычно предназначены для поверхностей одного из следующих типов:

1) плоскости (хотя большинство промышленных изделий имеет криволинейную поверхность, моделирование трехмерных объектов, основанное на плоских поверхностях, имеет широкую область возможных применений; в методе конечных элементов, используемом для анализа трехмерных объектов, обычно рассматривается модель, в которой трехмерные объекты представлены небольшим числом маленьких блоков (например, пирамид);

2) поверхности второго порядка (описываются полиномами второго порядка в трех пространственных координатах; поверхности второго порядка очень широко применяются в системах моделирования трехмерных объектов, однако большинство систем не имеет средств для работы с поверхностями второго порядка, заданными в общем виде; сферы, цилиндры, конусы (и, конечно, плоскости) являются типичными поверхностями второго порядка; некоторые системы обладают также средствами обработки тороидальных поверхностей; необходимость этого вызвана широким практическим использованием поверхностей такой формы);

3) рельефные поверхности, задаваемые uv-сеткой (рельефные поверхности, распространенные в системах обработки поверхностей, например, аппроксимируемые B-сплайнами, в системах моделирования трехмерных объектов находятся на вторых ролях, алгоритмы, которые выполняли бы необходимые операции для моделирования трехмерных объектов с необходимой полнотой и эффективностью, пока еще не разработаны; в частности, объединение объектов, описываемых по-

верхностями различных типов (одни – поверхностями второго порядка, другие – кусками) остается неразрешимой задачей);

4) поверхности выше второго порядка (они являются обобщением поверхностей второго порядка); для простоты проиллюстрируем это на примере двумерного пространства: если

$$x = a \cos \theta; \quad y = b \sin \theta$$

— параметрическое представление эллипса, то эллипс порядка ε :

$$x = a \cos^\varepsilon \theta; \quad y = b \sin^\varepsilon \theta$$

соответствует широкому классу двумерных фигур – от прямоугольника со скругленными углами (со сторонами a и b) до X-образных фигур (две пересекающиеся в середине под прямым углом узкие полоски длиной a и b); поверхностями выше второго порядка можно описывать или, по меньшей мере, аппроксимировать объекты относительно сложной формы, используя при этом всего несколько поверхностей; с их помощью удобнее описывать объекты со скругленными, а не с прямыми ребрами;

5) лентообразные поверхности и поверхности со снятыми фасками (ребра большинства встречающихся в технике поверхностей лишь незначительно отличаются от идеальной математической формы; лентообразные поверхности и поверхности со снятыми фасками являются типичными примерами; для них можно применить два способа – "корректное" представление, основанное на тех же методах, что и моделирование трехмерных объектов (граничное представление или конструктивная объемная геометрия) или аппроксимированное представление, связанное с ребрами граничного представления.

2. Аналогично, как и для отливки, создадим «Деталь». Создаем при помощи инструмента «Прямоугольник» эскиз, с

размерами равными размерам детали, увеличенными на $60\div 100$ мм.

Для того, чтобы удобнее в дальнейшем было совмещать форму и отливку, необходимо использовать общий центр как для одной, так и для другой модели.

С помощью инструмента «Вытянутая бобышка» создаем форму, высота которой должна быть равна величине высоты детали с прибылью, увеличенной на $30\div 50$ мм (рис. 7).

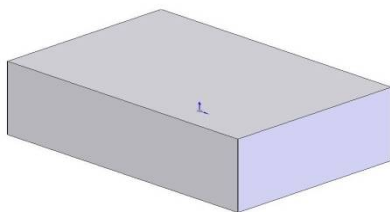


Рис. 7. Объемная модель формы

Сохраним модель под именем «Фамилия форма».

Для создания полости в форме, необходимо совместить отливку и форму (рис. 8).

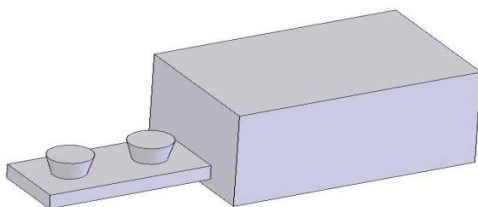


Рис. 8. Подготовка к сборке формы и отливки

Используя кнопку «Условия сопряжения» совместим форму и отливку по исходным точкам (рис. 9).

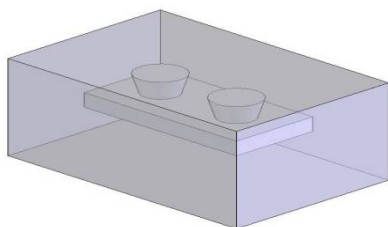


Рис. 9. Совмещенные форма и отливка

Для того чтобы получить полость в форме, необходимо вычисть из модели формы модель отливки (рис. 10).

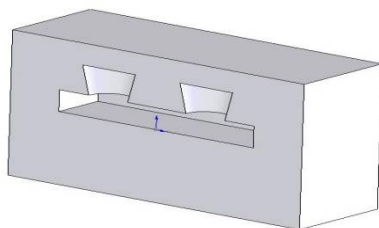


Рис. 10. Полость в форме

Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретический материал и основные понятия проектирования. Согласуйте с преподавателем детали проведения эксперимента. Спроектируйте форму для изготовления отливки в ПГФ как описано в теоретической части.

2. Сформулируйте выводы по результатам проведенного эксперимента.

Требования к отчету и контрольные вопросы

Отчет по лабораторной работе должен быть представлен в письменном виде, который должен содержать:

- название и цель работы;
- методы представления трехмерных объектов;
- классификацию поверхностей в системах моделирования;
- выводы по результатам проведенного эксперимента.

На диске следует сохранить файлы, содержащие результаты, полученные в ходе выполнения работы и подтверждающие сделанные в отчете выводы.

Контрольные вопросы

1. Каким критериям должен удовлетворять трехмерный объект?
2. Какие методы используются в системах трехмерного моделирования?
3. В чем особенность граничного представления трехмерного объекта?
4. В чем особенность объемного геометрического представления трехмерного объекта?
5. Какие поверхности используются при построении объемных моделей?
6. Какая особенность функции «Вытянутая бобышка» используется для построения формы?
7. С помощью какой функции совмещаются форма и отливка?
8. Что является «условием сопряжения» для формы и отливки?
9. Зачем производится вычитание отливки из модели формы?
10. С помощью какого геометрического элемента задается разрез?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАЛИВКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Цель работы:

1. Подготовка отливки к использованию системы компьютерного моделирования «Полигон».
2. Определение возможных дефектов отливки путем анализа температурных полей.

Оборудование: персональный компьютер, на базе процессора (минимальные требования) IntelPentiumII, 128 Мб оперативной памяти; программа трехмерного твердотельного моделирования; пакет прикладных программ «Полигон».

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Система автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП) "Полигон" предназначена для анализа литейной технологии для широкого класса сплавов и способов литья.

В настоящее время наиболее универсальным и мощным способом решения задач моделирования сложных физических процессов, протекающих в жидком и затвердевающем металле, является применение численных методов. В связи с этим, формулирование моделей для САМ ЛП должно быть ориентированно на численные методы решения.

По поводу самих численных методов можно сказать, что наиболее современным методом считается метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет более адекватно описать геометрию фасонной отливки, чем метод конечных разностей (МКР). Исходя из этого, в САМ ЛП "Полигон" для моделирования большинства процессов используется МКЭ. МКЭ относительно молодой метод, использующий вполне

современный математический аппарат, и более труден для реализации, чем МКР.

Тепловая задача. (Расчет температурно-фазовых полей.) Численные методы позволяют решить задачу охлаждения и затвердевания отливки произвольной конфигурации на основе исходного (т.е. без упрощений характерных для аналитических моделей) уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими граничными условиями. Учет тепловыделений при фазовых превращениях и теплопередачи на поверхностях раздела (например, между отливкой и формой) являются спецификой приложения этого уравнения к литейным процессам. При решении задачи затвердевания, наиболее важное значение имеет то, насколько адекватно организован учет выделения скрытой теплоты и теплопередачи через границу соприкосновения отливки и формы.

Для большего числа сплавов значение скрытой теплоты можно считать константой. Это справедливо в случае, когда существует устойчивая однозначная зависимость тепловыделения от относительного значения твердой фазы в широком интервале скоростей охлаждения, что характерно для алюминиевых сплавов, некоторых видов сталей и др. В этом случае наиболее важен адекватный учет неравномерности тепловыделения в интервале температур затвердевания. Применение для этого различных функциональных зависимостей, связывающих количество твердой фазы с диаграммами состояния сплавов чаще всего малоэффективно и крайне неадекватно отражает действительный характер тепловыделения. В связи с этим, рациональным методом учета зависимости количества твердой фазы (и относительной теплоты) от температуры является применение кусочно-непрерывных зависимостей на нескольких неравномерных подинтервалах. Это позволяет задавать самые разнообразные характеры тепловыделения, в том числе с резкими перегибами, площадками и т.п. Конкретное выражение вида такой кусочно-непрерывной зависимости удобно де-

лать в виде спектра выделения твердой фазы. Этот спектр регламентирует относительную величину тепловыделения на каждом этапе затвердевания. Абсолютные значения тепловыделения на различных этапах рассчитываются в зависимости от значения скрытой теплоты кристаллизации, считающейся неизменной.

Скрытая теплота сплава и спектр ее выделения определяются экспериментально на образцах простейшей конфигурации, что обеспечивает хорошую адекватность моделирования. Применение описанного способа учета тепловыделения при затвердевании позволило в САМ ЛП "Полигон" обеспечить достоверность результатов расчетов при достаточной универсальности системы. Хотя следует отметить, что для серых чугунов физику процесса лучше будет отражать модель с переменным значением скрытой теплоты в зависимости от скорости затвердевания.

Чаще всего для учета скрытой теплоты используют метод эффективной теплоемкости. К наиболее легко реализуемым, устойчивым и скоростным модификациям этого метода можно отнести метод эффективного подъема температур в соответствии с энтальпией. Именно этот способ применен в САМ "Полигон". Расчет температурных полей происходит в два этапа. На первом этапе решается уравнение нестационарной теплопроводности без учета тепловыделения. При этом определяется изменение энтальпии за текущий временной шаг. На втором этапе по приращению энтальпии вычисляются энтальпийные поля, а по ним с учетом спектра затвердевания вычисляются фазовые поля и новые значения температур. При такой схеме можно легко учитывать как широкоинтервальные тепловыделения, так и тепловыделения при постоянных температурах. Применение описанной расчетной схемы позволяет адекватно использовать расчетные модули САМ ЛП "Полигон" для широкого класса сплавов и способов литья.

С точки зрения учета теплообмена между отливкой и формой, важным фактором является расчет температурных полей формы. Учет формы с помощью тепловой активности может быть оправдан только для малотеплопроводной толсто-стенной однородной формы не успевающей прогреться за время затвердевания. Это соответствует случаю литья в песчаные формы. Для подавляющего большинства способов литья адекватность моделирования предполагает полный расчет температурных полей формы на каждом временном шаге. Поэтому в САМ ЛП "Полигон" решается сопряженная задача расчета температурно-фазовых полей отливки и температурных полей формы. Однако, расчетные алгоритмы "Полигона" позволяют также применять учет формы с помощью тепловой активности, а также комбинированный учет – часть формы учитывается нормальным образом, а часть с помощью тепловой активности. Такая гибкая схема позволяет экономить время и трудоемкость моделирования, что для условий реального производства может быть очень важным. Учет условий граничной теплопередачи существенно влияет на результаты теплового моделирования. В зависимости от особенностей того или иного способа учета граничных условий. При численном моделировании литейных процессов обычно традиционно используют одну из двух крайних моделей граничной теплопередачи, одна из которых предполагает наличие абсолютно плотного контакта между отливкой и формой, а другая предполагает постоянное наличие газового зазора одинаковой толщины. Обе эти модели в общем случае не соответствуют реальности и могут применяться только для каких-то конкретных условий. Модель с плотным контактом хорошо подходит для малотеплопроводной массивной формы, что соответствует случаю литья в песчаные формы. В случае использования металлических форм или наружных металлических холодильников правильнее работает модель теплопередачи, предполагающая наличие зазора (теплового сопротивления). Эта модель позволяет описать ши-

рокий спектр видов литья, но значение теплового сопротивления будет соответствовать реальным значениям толщины зазора только для случаев затвердевания крупногабаритных отливок простой конфигурации из сплавов с существенной термической усадкой.

При формулировании модели граничной передачи для САМ ЛП "Полигон" были использованы физические представления, объединяющие два описанных выше случая. В рамках этих представлений предполагается одновременное существование распределенных пятен плотного контакта и теплопередачи через зазор. Это соответствует общему случаю контактного теплообмена, в том числе литью фасонных отливок сложной конфигурации с использованием форм любой теплопроводности (песчаных, металлических, графитных и т.д.) различными способами. Как показали численные расчеты и экспериментальные данные по определению относительной площади контакта и толщины зазора по неконтактной поверхности, такой подход позволяет оперировать значениями приближающимся к значениям реальных физических величин. Это особенно важно для способов литья, предполагающих непосредственное влияние технологических факторов (давление, вакуумирование и т.п.) на граничную теплопередачу.

К таким способам литья относятся литье в вакуумно-пленочную форму, литье под давлением, литье под низким давлением, литье с кристаллизацией под давлением (жидкая штамповка) и др. Механизм контактной теплопередачи в общем случае включает в себя теплопередачу теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием.

В реальном случае для границ "отливка-форма", "отливка-среда" и "форма-среда" могут параллельно протекать все три вида теплопередачи. При этом, на одном и том же макроучастке границы эти тепловые потоки могут протекать на разных относительных площадях при наличии пятен плотного контакта. Кроме того, параметры теплопередачи (коэффици-

ент черноты, коэффициент теплопередачи, толщина зазора, относительные площади и др.) могут зависеть от изменяющихся температур отливки, формы и среды. К этому надо добавить, что на поверхностях контакта отливки и формы чаще всего присутствуют окисные пленки и специальные литейные краски.

Задача питания отливки. (Расчет микро- и макропористости). В данном случае под задачей питания подразумевается расчет усадочных процессов и образования усадочных дефектов после заполнения полости формы расплавом. Механизм образования пористости в различных сплавах может принципиально различаться. Для сплавов с ярко выраженными процессами объемного расширения при затвердевании, образование пористости чаще всего связано с совместным протеканием процессов кристаллизации и деформационных процессов. К таким сплавам относятся в основном серые чугуны. Это достаточно специфические процессы и их следует рассматривать отдельно.

Образование усадочных дефектов при затвердевании в сплавах с существенным значением объемной фазовой усадки (1.5-6.5%) можно рассматривать как совместное протекание процессов формирования макропористости (а также раковин) и микропористости. К таким сплавам относится подавляющее большинство литейных сплавов: стали, алюминиевые и магниевые сплавы, бронзы, латуни и т.д.

При формулировании моделей и алгоритмов расчета этих процессов в САМ ЛП "Полигон" были использованы следующие представления о физике этих процессов. Образование микро-пористости связано с недостатком давления в некоторой области двухфазной зоны, находящейся ниже уровня расплава. При этом образуется возможность выделения растворенного газа за счет «освободившегося» при усадке объема. Ясно, что в этом случае микропористость принципиально не мо-

жет быть больше значения объемной усадки. Падение давления в объеме двухфазной зоны по сравнению с давлением на поверхности расплава обусловлено фильтрационным характером течения жидкой фазы сквозь дендритный каркас твердой фазы при наличии внутренних стоков за счет усадки. Образование в некоторой части объема отливки макропористости и раковин обусловлено падением уровня расплава ниже этой области. Если эта область соответствует двухфазной зоне или зоне жидкого расплава, то в таких условиях может формироваться пористость, значительно превышающая объемную усадку (10-50%). Величина пористости в этом случае определяется степенью "структурированности" твердо-жидкого материала в данной точке в тот момент, когда она оказывается выше зеркала. В пределе макропористость имеет значение 100% , что соответствует концентрированной усадочной раковине.

Численное моделирование процессов образования макропористости в "Полигоне" основано на решении дифференциального уравнения фильтрационного течения. Спецификой приложения этого уравнения к литейным процессам является переменная высота зеркала расплава на каждом расчетном временном шаге и зависимость коэффициента проницаемости от доли жидкой фазы. При этом внутренние стоки определяются величиной объемной усадки в каждой локальной области на каждом временном шаге расчета. Критерием возникновения пористости является падение давления ниже некоторой критической величины.

В системе "Полигон" описанные выше модели тепловых процессов реализованы для 2.5-мерных и 3-мерных геометрических моделей (ГМ) с использованием МКЭ.

2. Перед началом расчета необходимо указать начальные температуры отливки и формы и условия конца расчета (рис. 11, 12).

Исходные Данные для расчета

ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

отливка	форма	шаг/конец расчета
<input checked="" type="checkbox"/> Запись файла	<input checked="" type="checkbox"/> Запись файла	<input checked="" type="radio"/> Конец: по Tсол
Нач. Т верх,С: 700	Нач. Т верх,С: 20	<input type="radio"/> Конец: по Времени
Нач. Т низ,С: 700	Нач. Т низ,С: 20	<input type="radio"/> Конец: по Tконца
Т среды,С: 20	Т среды,С: 20	Шаг расчета,с: 1
		Нач. Время,с: 0
		Время конца,с:
		Tконца,С: Tсол

Файл результатов: D:\Program Files\Polygon\RESULT
 Файл геометрии: Н Е Т И М Е Н И Ф А Й Л А
 Файл свойств сплава: Н Е Т И М Е Н И Ф А Й Л А
 Файл свойств формы: Н Е Т И М Е Н И Ф А Й Л А
 Файл теплопередачи: Н Е Т И М Е Н И Ф А Й Л А

ФАКУЛЬТАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

Файл начальных Tо:
 Файл начальных Tф:
 Сдвиг,мм: X: 0 Y: 0 Z: 0 Кэф.Расширения: 1
 Файл задаваемых T:
 Файл тепловых потоков:
 Файл динамич. среды:
 Файл электро-свойств:
 Список всех данных: Ввод Закреть

Рис. 11

Затем необходимо произвести загрузку данных по пористости и загрузить файл свойств сплава.

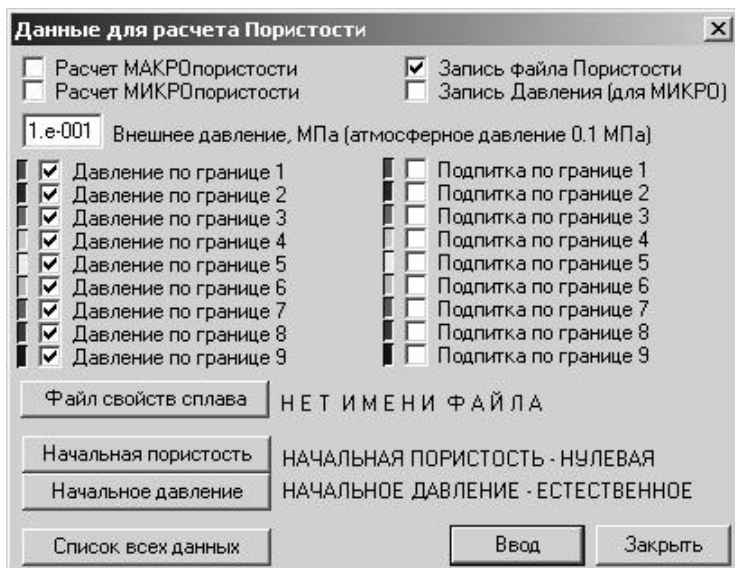


Рис. 12

Можно начинать расчет. После завершения расчета следует задать необходимые виды, используя Панель «отливка/форма».



Результаты расчета можно просмотреть, используя Панель «контроля времени».



Результат расчета:

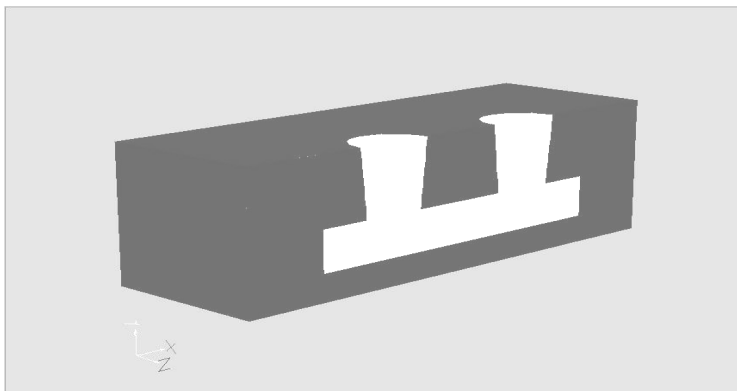


Рис. 13

Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретический материал и ознакомьтесь с основными понятиями программы. Выберите сплав на основе Al, задайте начальные температуры отливки (Нач.Тверх=660°C, Нач.Тниз=650°C, Тсреды=20°C) и формы (Нач.Тверх=Нач.Тниз.=Тсреды=20°C), просмотрите файл свойств сплава и файл свойств формы (литье в землю).

2. Сформулируйте выводы по результатам проведенного расчета.

Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен быть представлен в письменном виде, который должен содержать:

- название и цель работы;
- принципы работы программы;
- принцип расчета температурно-фазовых полей;
- вывод по результатам проведенного расчета.

На диске следует сохранить файлы, содержащие результаты, полученные в ходе выполнения работы и подтверждающие сделанные в отчете выводы.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена САМ ЛП «Полигон»?
2. Какой численный метод используется при моделировании литейных процессов?
3. Во сколько этапов происходит расчет температурных полей? Что решается на этих этапах?
4. Какие модели граничной теплопередачи используются при численном моделировании литейных процессов? Для каких случаев?
5. Какие механизмы контактной теплопередачи используются в САМ ЛП «Полигон»?
6. Что содержит файл геометрии для САМ ЛП «Полигон»?
7. В чем отличие геометрической модели от математической?
8. Как с помощью исходных данных задается градиент температур в отливке?

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Расчет математической модели целесообразно выполнять в следующей последовательности:

— расчет групповых и общего назначения x и y , дисперсий и ошибок опытов и эксперимента, определение однородности дисперсий;

— расчет масштабов и нанесение экспериментальных данных на график;

— расчет коэффициентов математической модели и оценка их значимости;

— проверка адекватности и анализ модели, построения графика $Y = F(X)$ по полученной модели.

Вариант 1

Содержание углерода в железоуглеродистом сплаве, %	0	1	2	3	4
Динамическая вязкость железоуглеродистого сплава при 1600 °С	0,064	0,058	0,065	0,055	0,040
	0,061	0,063	0,060	0,057	0,039
	0,061	0,062	0,063	0,059	0,041

Вариант 2

Содержание углерода в железоуглеродистом сплаве, %	1	2	3	4	5
Динамическая вязкость железоуглеродистого сплава при 1500 °С	0,070	0,069	0,065	0,055	0,040
	0,068	0,063	0,060	0,057	0,039
	0,066	0,062	0,063	0,059	0,041

Вариант 3

Содержание углерода в чугунае, %	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3
Максимальный размер графитовых включений при t перегрева 1480 °С, мкм	38	73	86	93	95
	40	71	83	90	93
	42	69	83	93	92

Вариант 4

Содержание углерода в чугунае, %	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3
Размер эвтектического зерна при перегреве до 1480 °С, мкм	1,4	1,1	1,0	0,9	0,9
	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7

Вариант 5

Содержание углерода в чугунае, %	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3
Количество междендритного графита при перегреве до 1480 °С, %	100	94	82	82	81
	100	90	80	80	78
	100	92	78	78	81

Вариант 6

Содержание стали в шихте для плавки чугуна, %	0	5	10	15	20
Предел прочности чугуна при растяжении, Н/мм ² (плавка в вагранке)	158	174	207	294	221
	150	170	200	220	228
	151	166	202	216	220

Вариант 7

Содержание стали в шихте для плавки чугуна, %	0	5	10	15	20
Предел прочности при растяжении, Н/мм ² (плавка в дуговой электропечи)	243	280	283	284	284
	240	275	280	280	280
	237	270	277	282	285

Вариант 8

Содержание молибдена в чугуне, %	0	0,2	0,4	0,6	0,8
Предел прочности при растяжении, Н/мм ²	207	226	247	257	291
	200	231	242	254	287
	202	222	243	251	283

Вариант 9

Температура испытания, °С	200	300	400	500	600	700	800
Относительное удлинение чугуна, %	0,20	0,47	0,87	1,37	2,04	2,90	4,07
	0,20	0,43	0,91	1,30	2,00	2,87	4,03
	0,29	0,42	0,81	1,32	2,05	2,92	4,02

Вариант 10

Толщина стенки отливки из чугуна, мм	20	60	100	150	200
Предел прочности чугуна с вермикулярным графитом, Н/мм ²	439	377	352	339	317
	430	372	357	331	312
	439	370	353	332	310

Вариант 11

Температура испытания, °С	50	100	150	200	250
Предел прочности ковкого чугуна при растяжении, Н/мм ²	567	580	586	420	280
	500	583	581	423	287
	562	586	582	426	282

Вариант 12

Температура испытания, °С	50	100	150	200	250
Относительное удлинение ковкого чугуна, %	12,3	10,4	13,6	17,5	18,4
	12,0	10,0	13,1	17,0	18,0
	12,9	10,5	13,2	17,4	17,6

Вариант 13

Содержание углерода в ковком чугуне, %	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70
Объемная усадка, %	7,0	6,0	6,2	5,9	5,1	5,2
	6,8	6,3	5,8	5,8	5,3	5,4
	6,6	6,6	5,8	5,4	5,6	5,3

Вариант 14

Степень эвтектичности синтетического чугуна	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Предел прочности при растяжении, Н/мм ²	307	247	147	116	97
	300	243	152	113	100
	333	242	145	110	103

Вариант 15

Температура испытания, °С	0	100	300	500	600
Относительное удлинение синтетического чугуна с шаровидным графитом, %	8,3	6,7	4,7	6,2	18,6
	8,0	6,2	4,5	6,4	18,0
	8,6	6,9	4,0	6,0	18,6

Вариант 16

Температура чугуна, °С	1380	1420	1460	1500	1540
Содержание FeO в ваграночном шлаке, %	9,0	3,2	1,7	1,6	1,0
	9,4	3,0	1,6	1,4	1,3
	9,8	3,7	1,9	1,2	1,6

Вариант 17

Расход кислорода при продувке, м ³ /кг	1	3	5	7	10
Угар кремния при продувке, %	0,07	0,20	0,43	0,56	0,81
	0,08	0,24	0,39	0,55	0,78
	0,08	0,28	0,35	0,53	0,75

Вариант 18

Емкость ковша, т	0,3	0,8	3	7	15
Расход магния при модифицировании в автоклаве, %	0,13	0,21	0,25	0,27	0,29
	0,15	0,18	0,20	0,24	0,26
	0,11	0,15	0,21	0,21	0,23

Вариант 19

Емкость ковша, т	0,3	0,8	3	7	15
Длительность модифицирования чугуна в автоклаве, с	234	302	610	900	1220
	235	310	600	910	1230
	236	318	500	890	1210

Вариант 20

Производительность печи электрошлаковой обработки чугуна, т/ч	3	4	5	7	10
Сопротивление слоя шлака, Ом · 10 ⁻³	4,14	3,53	3,10	2,75	2,23
	4,17	3,57	3,13	2,78	2,27
	4,20	3,61	3,16	2,81	2,31

Вариант 21

Скорость подъема металла в форме, см/с	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Степень газификации полистера	0,98	0,65	0,54	0,52	0,44
	1,00	0,70	0,58	0,49	0,41
	0,91	0,75	0,62	0,46	0,39

Вариант 22

Емкость ковша, кг	8	40	150	600	3000
Скорость заливки при медленном повороте, кг/с	1,1	2,2	2,9	3,9	8,1
	1,2	2,1	2,6	3,7	7,8
	1,3	2,9	2,8	3,5	7,5

Вариант 23

Емкость ковша, кг	200	250	300	400	500
Предел прочности при растяжении, Н/мм ²	366	435	396	321	266
	372	430	390	325	270
	378	425	384	329	274

Вариант 24

Содержание углерода в стали, %	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Свободная линейная усадка стали, %	2,30	2,25	2,27	2,31	2,23	2,13
	2,35	2,21	2,25	2,29	2,21	2,10
	2,40	2,23	2,23	2,27	2,19	2,07

Вариант 25

Температура испытания, °С	100	200	300	400	500	600
Предел прочности при растяжении стали 35Л, Н/мм ²	57,9	57,9	60,0	59,0	37,5	24,8
	58,3	58,1	60,3	58,0	37,1	25,2
	58,7	58,7	60,6	58,6	36,7	25,6

Вариант 26

Температура испытания, °С	0	200	300	400	500	600
Предел прочности при растяжении стали 40Г2Л, Н/мм ²	756	772	814	755	644	451
	750	782	811	751	641	485
	753	777	808	747	738	489

Вариант 27

Температура испытания, °С	0	200	300	400	500	600
Предел прочности при растяжении стали 35ХМЛ, Н/мм ²	736	708	741	705	572	425
	732	705	738	701	568	421
	728	702	735	697	564	417

Вариант 28

Температура нагрева смеси, °С	20	200	400	600	800	1000
Предел прочности смеси при сжатии после охлаждения, Н/мм ²	0,5	5,1	3,4	0,9	5,4	3,4
	0,8	5,5	3,1	0,6	5,1	3,0
	1,1	5,9	2,8	0,3	4,8	2,6

Вариант 29

Продолжительность выдержки в ПГФ, мин	10	50	100	150	250	300	330
Скорость продвижения фронта кристаллизации, мм/мин	2,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,9	4,0
	2,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,7	4,3
	1,8	0,2	0,4	0,1	0,1	0,5	3,7

Вариант 30

Продолжительность выдержки в металлической форме, мин	10	50	70	100	130
Скорость продвижения фронта кристаллизации, мм/мин	2,5	0,5	0,6	0,7	7,9
	2,2	0,2	0,2	0,5	7,6
	1,9	0,2	0,1	0,3	7,3

Вариант 31

Температура нагрева смеси, °С	60	100	140	180	220
Газопроницаемость жидкостекольной смеси после охлаждения, усл. ед.	128	515	567	576	586
	121	510	563	572	581
	120	505	559	568	576

Вариант 32

Температура испытания смеси, °С	20	200	400	600	800
Предел прочности смеси при сжатии жидкостекольной смеси, Н/мм ²	0,5	1,8	3,1	3,1	0,2
	0,8	1,5	3,5	2,7	0,1
	1,1	1,2	3,9	2,3	0,6

Вариант 33

Температура испытания смеси, °С	20	200	300	400	500	600	800
Относительное удлинение стали 35ХМЛ, %	8,6	5,7	4,4	6,7	8,7	6,5	37,9
	8,2	5,4	4,0	6,4	8,4	6,1	37,5
	7,8	5,1	3,6	6,1	8,1	5,7	37,1

Вариант 34

Температура нагрева смеси, °С	200	400	600	800	1000	1200
Выбиваемость жидкостекольной смеси после охлаждения	42,8	29,6	21,3	85,1	79,9	32,9
	42,5	30,0	20,8	85,6	80,3	32,5
	42,2	30,4	20,3	86,?	86,?	32,1

Вариант 35

Продолжительность твердения жидкостекольной смеси, ч	0,2	1	2	3	4
Предел прочности смеси при сжатии, Н/мм ²	0,05	0,17	0,25	0,33	0,39
	0,03	0,15	0,21	0,30	0,35
	0,01	0,13	0,17	0,27	0,31

Вариант 36

Концентрация Н ₃ Р ₀ ₄ в смеси, %	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Продолжительность твердения смеси со связующим МФ-1, мин	35,3	28,5	20,4	15,7	10,6
	35,0	28,2	20,0	15,3	10,3
	34,7	27,1	19,6	16,9	10,0

Вариант 37

Концентрация H_3PO_4 в смеси, %	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Предел прочности смеси со связующим МФ-1 через 3 часа после введения H_3PO_4 , Н/мм^2	0,85	1,07	1,11	1,16	1,11
	0,82	1,03	1,14	1,13	1,07
	0,79	0,99	1,17	1,10	1,03

Вариант 38

Содержание жидкого стекла в смеси, %	3	4	5	6	7
Предел прочности смеси со связующим МФ-1 через 3 часа после введения H_3PO_4 , Н/мм^2	0,24	0,64	0,71	0,78	0,86
	0,21	0,60	0,67	0,75	0,82
	0,18	0,56	0,63	0,72	0,78

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цымбал В. П. Математическое моделирование металлургических процессов / В. П. Цымбал. – М.: Металлургия, 1986. – 240 с.
2. Бречко А. А. Литейные системы и их моделирование / А. А. Бречко. – М.: Машиностроение, 1975. – 230 с.
3. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. К. Лецкий, В. Шефер; под ред. Э. К. Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
4. Семесенко М. П. ЭВМ в управлении литейными процессами / М. П. Семесенко, С. Г. Пелых. – Донецк: Донбасс, 1975. – 95 с.
5. Десницкий В. В. Автоматизированное проектирование технологии изготовления отливок / В. В. Десницкий. – Л.: ЛГУ, 1987. – 164 с.
6. Косников Г. А. Основы литейного производства: учеб. пособие / Г. А. Косников. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. – 204 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Перечень задач в литейном производстве, решаемых с помощью ЭВМ.....	4
Практическое занятие. Построение математической модели.....	8
Лабораторная работа № 1. Проектирование простой отливки с использованием программы трехмерного моделирования.....	16
Лабораторная работа № 2. Проектирование литейной формы с использованием программы трехмерного моделирования.....	31
Лабораторная работа № 3. Влияние температуры заливки на распределение температурных полей.....	39
Контрольная работа. Разработка математической модели.....	50
Библиографический список.....	60

Учебное издание

Печенкина Лариса Степановна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
И ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИИ**

Практикум

В авторской редакции

Компьютерная верстка Л. С. Печенкиной

Подписано к изданию 29.05.2019.

Объем данных 780 Кб.

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»**

394026 Воронеж, Московский просп., 14