

На правах рукописи



Иванкова Евгения Павловна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ  
ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ  
К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ  
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ В НЕЙ ОТЛИВКИ**

Специальность 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») на кафедре «Авиастроение».

**Научный руководитель:** **Дмитриев Эдуард Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

**Научный консультант:** **Одинок Валерий Иванович**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

**Официальные оппоненты:** **Господариков Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург.

**Козлов Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительная механика», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

**Ведущая организация:** **ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»**, г. Владивосток.

Защита диссертации состоится 10 февраля 2022 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.03 при Комсомольском-на-Амуре государственном университете (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корп. 3, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Комсомольского-на-Амуре государственного университета: <https://sovet.knastu.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета Григорьевой Анне Леонидовне и по электронной почте [diss@knastu.ru](mailto:diss@knastu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент



А.Л. Григорьева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В литейном производстве известен метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) в монослойные и многослойные оболочковые формы (ОФ). Данный метод литья применяется при получении высокоточных геометрически сложных деталей в различных отраслях промышленности. Главным недостатком данного способа является повышенный брак отливок из-за частичного или полного разрушения ОФ, главным образом, при заливке их расплавом металла и на начальной стадии затвердевания отливки.

Образование микро и макротрещин в ОФ связано с их неравномерностью нагрева при заливке и возникающего при этом неравномерного термоупругого напряженно-деформированного состояния (НДС).

Среди отечественных исследователей вопросами напряженного состояния литейных многослойных оболочковых форм (ЛМОФ) занимались и занимаются многие известные отечественные ученые: Васин Ю.П., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Кулаков Б.А., Леушин И.О., Неуструев А.А., Одинокое В.И., Озеров В.А., Петров В.В., Рыбкин В.А., Рыжков И.В., Сапченко И.Г., Севастьянов Г.М., Степанов Ю.А., Тимофеев Г.И., Черномас В.В., Чернышов Е.А., Шкленник Я.И. и др.

Среди современных зарубежных специалистов, изучающих эту проблему следует выделить R.S.L. Andrews (США); A.D. Kington (Великобритания); Ballewski Heinrich, Grossman Wolfgang (Германия); Huang Dehai, Zhang Xianjie, Hu Xinming (КНР).

Для реальных задач термоупругости получили широкое применение и развитие численные методы, основанные на разностном представлении исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных (метод конечных разностей), на дискретизации расчетной области и отыскания решения в виде некоторой аппроксимирующей функции на каждом из подобластей (метод конечных элементов) и на представлении решения в виде некоторого функционального ряда (метод Ритца, метод Галеркина и др.)

Среди известных численных методов расчета реальных задач по НДС ОФ автором диссертационной работы использован численный метод, предложенный профессором Одиноким В.И., согласно которому определяющая система уравнений, включающая в себя теплофизические характеристики материалов, записывается в общем разностном виде по элементу в любой системе криволинейных ортогональных координат.

Однако, несмотря на имеющийся задел, стоит отметить, что проблема оптимизации важнейших исходных свойств материалов и макроструктур многослойных ОФ, а также температуры опорного наполнителя (ОН) и моделирование при этом процессов снижения НДС изучено недостаточно широко, что подчеркивает актуальность и своевременность решаемых в диссертационной работе задач.

**Целью работы** является разработка математической модели по оптимизации влияния физических свойств материалов ОФ, её макроструктуры и внешних факторов на стойкость ОФ к трещинообразованию и разрушению при заливке её металлом.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1) провести анализ существующих подходов и методов определения НДС ЛМОФ, обосновать выбор своего метода исследования;

2) разработать более адекватные математические модели исследуемых процессов и объектов;

3) разработать алгоритмы и программные комплексы расчёта поставленных математических задач по НДС ЛМОФ.

4) провести анализ и обобщение по оптимизации архитектуры внутреннего строения ОФ, обеспечивающей максимальное снижение термических напряжений.

**Объект исследования** – ЛМОФ по выплавляемым моделям (ВМ) при внешнем нестационарном тепловом и силовом воздействии.

**Предмет исследования** – условия и факторы формирования НДС в системе "отливка-форма-наполнитель", а так же методы и способы снижения критического уровня напряженного состояния при образовании трещин в ОФ вследствие внешнего нестационарного теплового воздействия.

**Методология и методы исследования.** Методологической и теоретической основой работы являются методы вычислительной математики, статистической обработки результатов, приемы математического моделирования.

В качестве программного обеспечения использовался зарегистрированный авторский программный комплекс [13].

**Научная новизна работы:**

1) С использованием фундаментальных уравнений линейной теории упругости, уравнений математической физики, численных методов и элементов математического программирования разработаны математические модели стойкости многослойных ОФ с особыми макроструктурами, позволяющими определить главные физические свойства материалов оболочки и технологически обоснованные морфологические строения, оказывающие решающее влияние на снижение термических напряжений в рассматриваемых процессах [6, 10].

2) Установлен оптимальный температурный режим подогрева опорного наполнителя при заливке стали в холодную литейную оболочковую форму [2, 3].

3) Разработаны с учетом полученных результатов новые структуры ОФ, обеспечивающие снижение термомеханических напряжений в оболочках, технологическая новизна которых подтверждена полученным патентом на изобретение [11] и положительным решением на выдачу патента [12].

**Практическая значимость работы.** Результаты численных решений поставленных задач и полученные оценки НДС ЛМОФ по ВМ могут быть использованы при разработке, отработке и внедрении новых технологий изготовления таких форм с целью снижения брака оболочек по разрушению.

Математические модели, численные алгоритмы и программа расчета могут быть использованы при разработке новых опытных структур ЛМОФ по ВМ для моделирования протекающих в них тепловых и деформационных процессов.

Разработаны новые опытные структуры ОФ, технологическая новизна которых подтверждена полученными патентами на изобретение.

Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ по математическому моделированию оптимизации выбора температуры опорного наполнителя, физических свойств материала и структуры ОФ по ВМ для повышения её трещиностойкости при охлаждении в ней отливки.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс при выполнении практических и лабораторных работ в дисциплинах «Математическое моделирование» при подготовке магистров по направлению 09.04.03 «Прикладная информатика» и «Численные методы» при подготовке бакалавров по направлению 01.03.04 «Прикладная математика», а также в магистерских и аспирантских исследованиях на кафедре «Прикладная математика».

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и получили одобрение на следующих конференциях и семинарах:

– на международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологии обработки и оборудования в машиностроении 2020» (ICMTMTE 2020), (г. Севастополь, 2020 г.) [4];

– на Дальневосточной школе-семинаре «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (г. Комсомольск-на-Амуре, 28 сентября- 1 октября 2020 г.);

– на VI научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении». – Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина. (г. Комсомольск-на-Амуре, 8 - 12 февраля 2021 г.) [9];

– на международной научно-технической конференции "Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021" (ICMTMTE 2021), (г. Севастополь, 6 - 10 сентября 2021 г.) [10];

– на IV Дальневосточной школе-семинаре «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций» Института машиноведения и металлургии ХФИЦ ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, 18 - 19 ноября 2021 г.);

– на научных семинарах Комсомольского-на-Амуре государственного университета и Института машиноведения и металлургии ХФИЦ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, 2020 - 2021 гг.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели расчета НДС ОФ при ее заливке металлом и охлаждении в ней отливки с учетом разработанных опытных структур многослойных ОФ.

2. Алгоритм оптимизации выбора материала и структуры ЛМОФ.

3. Алгоритм определения оптимальной температуры опорного наполнителя при заливке ОФ сталью.

4. Программный комплекс для математического моделирования оптимизации выбора температуры опорного наполнителя, физических свойств материала и структуры ОФ по ВМ для повышения её трещиностойкости при охлаждении в ней отливки.

**Достоверность полученных результатов** основана на использовании фундаментальных уравнений линейной теории упругости, апробированных разностных схем и численных методов.

**Личный вклад автора.** Работы [8, 9] выполнены автором лично. В работах [1-7, 10] автором разработаны численные схемы и алгоритмы решения, проведены все необходимые расчеты и выполнен анализ полученных результатов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных статей, в том числе 6 статей, индексируемых в международных базах WoS и Scopus [1-6], 2 статьи в рецензируемом журнале из списка ВАК [7, 8], 2 статьи в материалах конференций [9, 10]. Получены патент [11] и положительное решение на выдачу патента на изобретение [12], свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [13].

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 101 наименования, двух приложений. Общий объем работы составляет 96 страниц (в том числе 2 приложения на 4 страницах), 29 рисунков.

Автор выражает искреннюю благодарность д.т.н., профессору Евстигнееву А.И. за консультации и помощь при выполнении данной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* проводится краткий анализ научной и патентной литературы по вопросу напряженного состояния ЛМОФ по ВМ, сформулированы цель, задачи исследований, научная и практическая значимость работы. Кратко представлено содержание диссертационной работы по главам.

*В первой главе* обосновывается своевременность и актуальность проводимых исследований.

Дан обзор особенностей напряженного состояния ОФ на основных этапах её изготовления и применения [1].

Проводится анализ известных математических методов, используемых при исследовании НДС ЛМОФ. Приведено описание параметров ЛМОФ и исследуемых видов структур.

*Вторая глава* посвящена решению задачи по НДС ЛМОФ при заливке и охлаждении в них отливок. Эта задача является базовой для решения трех других технологических задач, а именно задачи по оптимизации выбора свойств материалов ОФ, задачи по выбору структур ОФ по ВМ и задачи по установлению влияния нестационарного внешнего теплового воздействия на НДС ОФ.

Сначала формулируется математическая постановка задачи по НДС ОФ. Рассматривается осесимметричное тело вращения (рисунок 1,а). Деформируемый материал, литейная форма, затвердевающий металл считаются изотропными. В этом случае имеем трехкомпонентную систему (рисунок 1,б): область *I* – жидкий металл (ЖМ) (деформируемая среда); область *II* – затвердевший металл; область *III* – литейная форма.

Используя линейную теорию упругости, эйлерову систему координат и уравнение теплопроводности, можно записать для каждой из областей систему уравнений:

область *I*:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma = P_1; P_1 = \gamma h; \\ \dot{\theta} = a_1^* \Delta \theta; \end{aligned} \quad (1)$$

области II, III:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} &= 0; \\ \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij} &= 2G_p\varepsilon_{ij}^*; \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon\delta_{ij}; \varepsilon = \varepsilon_{ii}; \\ \varepsilon_{ii} &= 3k_p\sigma + 3\alpha_p(\theta_n - \theta_p^*); \varepsilon_{ij} = 0,5(U_{i,j} + U_{j,i}); \\ \dot{\theta} &= a_p^*\Delta\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $U_i$  – перемещения;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора упругих деформаций;  $\sigma$  – гидростатическое напряжение;  $G_p$  ( $p = II, III$ ) – модуль сдвига металла ( $p = II$ ) и формы ( $p = III$ );  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $k_p$  – коэффициент объемного сжатия;  $\alpha_p$  – коэффициент линейного расширения;  $a_p^*$  – коэффициенты температуропроводности ( $p = I, II, III$ );  $\gamma$  – плотность;  $h$  – текущая высота ОФ;  $\theta_n$  – текущая температура;  $\dot{\theta} = \frac{\partial\theta}{\partial\tau}$ ;  $\tau$  – время;  $\theta_p^*$  – начальные температуры в областях ( $p = I, II, III$ ).

В системе (2) используется суммирование по повторяющимся индексам.

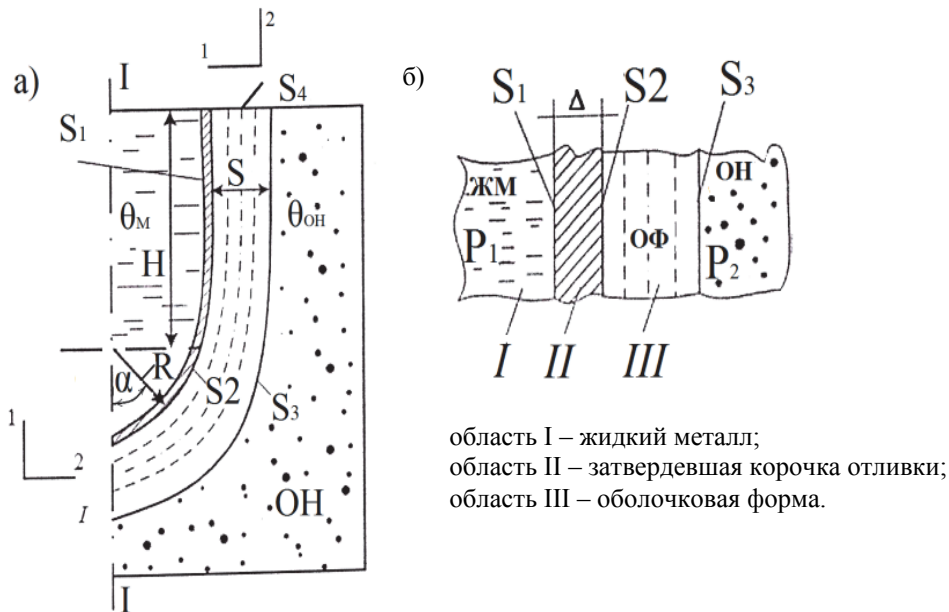


Рисунок 1 – Расчетная схема оболочковой формы, заформованной в опорный наполнитель и залитая жидким металлом: а – сечение в вертикальной плоскости; б – схема моделирования областей системы

В процессе охлаждения жидкого металла ( $\theta_M$ ) при условии, что температура металла  $\theta_M \leq \theta_K$  (где  $\theta_K$  – температура кристаллизации), определяется толщина затвердевшего слоя из решения уравнения межфазового перехода

$$\frac{d\theta_1}{dn_*}\lambda_1 - \frac{d\theta_2}{dn_*}\lambda_2 = \frac{d\Delta}{d\tau}L\rho, \quad (3)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – температура твердой и жидкой фазы;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности твердой и жидкой фазы;  $\Delta$  – толщина корочки;  $L$  – скрытая теплота плавления;  $\rho$  – плотность;  $n_*$  – нормаль к границе двух фаз.

Время процесса кристаллизации  $\tau^*$  разбивается на малые шаги  $\Delta\tau_n$  (где  $n$  – номер временного шага). На каждом временном шаге  $\Delta\tau_n$  вычисляется прирост толщины твердой фазы  $\Delta_n$ , а

$$\Delta = \sum_1^n \Delta_n.$$

При этом предполагается, что температура в твердой фазе по толщине  $\Delta_n$  изменяется по линейному закону, градиент температуры в жидкой фазе равен нулю. С учетом этого решение уравнения (3) дает следующую зависимость для определения толщины закристаллизовавшейся корочки на временном шаге  $\Delta\tau_n$ :

$$\begin{aligned} \Delta_n &= C\sqrt{\tau}; \\ C &= \sqrt{\frac{2\Delta\theta_1\lambda_1}{\rho L}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta\theta_1$  – перепад температур в твердой фазе вблизи фронта кристаллизации.

В системах (1) и (2) коэффициент температуропроводности  $a^*$  определяется зависимостью

$$a^* = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $C$  – удельная теплоемкость.

Для решения системы уравнений (1), (2) использовался апробированный численный метод, разработанный профессором Одиноким В.И для исследования различных физических процессов. Суть этого метода заключается в следующем: исследуемые области разбиваются на ортогональные элементы, для каждого элемента записывается уравнение (2) в разностном виде (6) – (10) через значение напряжений и перемещений по граням элемента.

С использованием принятого численного метода, система уравнений (1) – (2) записывается в следующем виде (обозначения величин приняты согласно рисунка 2):

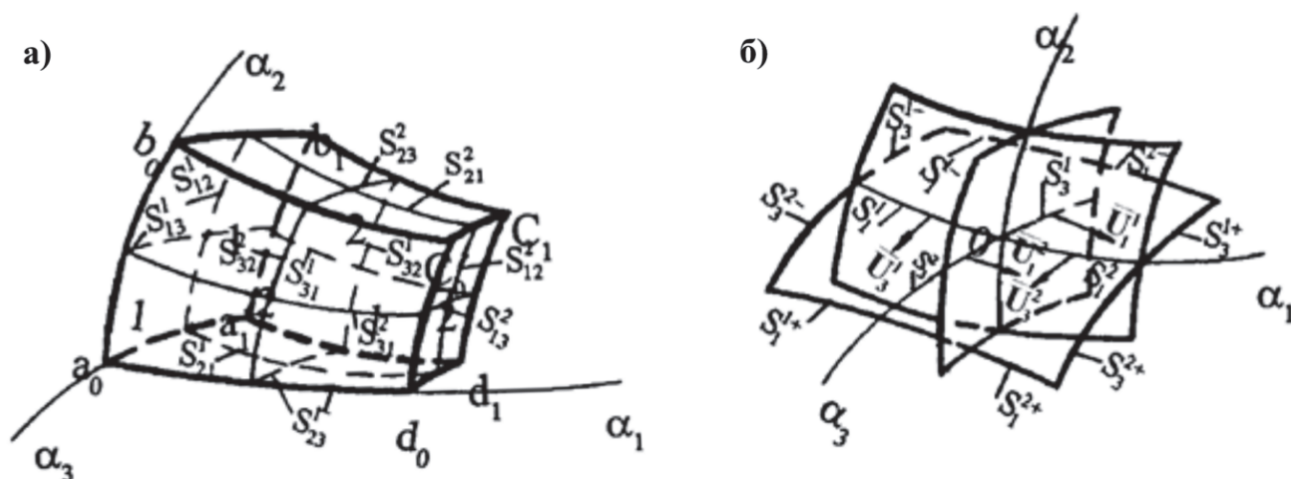


Рисунок 2 – Область деформирования: а – схема разбивки на элементы; б – распределение перемещений по граням элемента



1) Уравнения равновесия для осесимметричной задачи

$$\begin{aligned} S_{13}\Delta S_{12}(\sigma_{11} - \sigma_{22}) + S_{12}\Delta S_{13}(\sigma_{11} - \sigma_{33}) + 0,5\Delta\sigma_{11}S_{12}S_{13} + \\ + 0,5\Delta\sigma_{12}S_{21}S_{23} + (S_{21}\Delta S_{23} + 2S_{23}\Delta S_{21})\sigma_{21} = 0; \\ S_{21}\Delta S_{23}(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + S_{23}\Delta S_{21}(\sigma_{22} - \sigma_{11}) + 0,5\Delta\sigma_{22}S_{23}S_{21} + \\ + 0,5\Delta\sigma_{21}S_{12}S_{13} + (S_{12}\Delta S_{13} + 2S_{13}\Delta S_{12})\sigma_{21} = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

2) Уравнения состояния

$$\begin{aligned} \sigma_{11} - \sigma_{22} &= 2G_p(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}), \\ \sigma_{22} - \sigma_{33} &= 2G_p(\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}), \\ \sigma_{12} &= 2G_p\varepsilon_{12}; \end{aligned} \quad (7)$$

3) Уравнение сплошности

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} &= 3k_p\sigma + 3\alpha_p(\theta_n - \theta_p^*). \\ \varepsilon_{11} &= \frac{2\Delta U_1}{S_{21}} + \frac{2U_2}{S_{21}} \cdot \frac{\Delta S_{21}}{S_{12}}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{2\Delta U_2}{S_{32}} + \frac{2U_1}{S_{12}} \cdot \frac{\Delta S_{12}}{S_{21}}; \\ \varepsilon_{33} &= \frac{2U_1}{S_{13}} \cdot \frac{\Delta S_{13}}{S_{31}} + \frac{2U_2}{S_{23}} \cdot \frac{\Delta S_{23}}{S_{32}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $U_i = U_i^1 + U_i^2$ ;  $\Delta U_i = U_i^2 - U_i^1$ , ( $i = 1, 2$ ),  $S_{ij} = S_{ij}^1 + S_{ij}^2$ ;  $\Delta S_{ij} = S_{ij}^2 - S_{ij}^1$ .

Значения  $S_{ij}^k$  вычисляются как средние от значений длин дуг границы граней (рёбер) элемента.

Уравнения (6 - 9) записаны с учетом осевой симметрии

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_3} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{3i}}{\partial x_3} = 0; \quad i = 1, 2, 3;$$

Для тел вращения имеет место

$$\Delta S_{31} = 0; \Delta S_{32} = 0; \frac{\Delta \bar{U}_1}{S_3} = 0; \frac{\Delta \bar{U}_2}{S_3} = 0; U_3 = 0;$$

на поверхности  $x_1x_3: S_1^+ - S_1^- = 0$ ; на поверхности  $x_2x_3: S_2^+ - S_2^- = 0$  сдвиговые значения  $\varepsilon_{ij}$  ( $i \neq j$ ) запишутся для узла (0) в виде

$$\varepsilon_{12}^0 = \frac{2\Delta \bar{U}_2}{S_1} - 0,5\bar{U}_2 \frac{S_2^+ - S_2^-}{S_1 S_2} + \frac{2\Delta \bar{U}_1}{S_2} - 0,5\bar{U}_1 \frac{S_1^+ - S_1^-}{S_1 S_2},$$

где  $S_i = S_i^1 + S_i^2$ ;  $\Delta \bar{U}_i = \bar{U}_{i2} - \bar{U}_{i1}$ ;  $S_i^+ = S_i^{1+} + S_i^{2+}$ ;  $S_i^- = S_i^{1-} + S_i^{2-}$ ; значения  $\bar{U}_i$  вычисляются как средние от значения  $U_i$  по граням элемента.

4) Уравнение теплопроводности (запись в итерационной форме)

$$\theta_k = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^-}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21}}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{где } t_{12} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^+)}{S_{21} + S_{21}^+} F_1^2 \frac{\Delta \tau}{C_k \gamma_k V_k}; & t_{11} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^-)}{S_{21} + S_{21}^-} F_1^1 \frac{\Delta \tau}{C_k \gamma_k V_k}; \\ t_{22} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_2^+)}{S_{12} + S_{12}^+} F_2^2 \frac{\Delta \tau}{C_k \gamma_k V_k}; & t_{21} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_2^-)}{S_{12} + S_{12}^-} F_2^1 \frac{\Delta \tau}{C_k \gamma_k V_k}; \end{aligned}$$

$$F_i^j = S_{ik}^j \cdot S_{ip}^j; i \neq k \neq p; i, k, p = 1, 2, 3; j = 1, 2; V_k = \frac{S_{13}S_{12}(S_{21} + S_{31})}{16},$$

где  $\theta_k^*$  - средняя температура в « $k$ »-ом элементе в начале временного шага  $\Delta\tau$ ;  $\lambda_k, \theta_k, C_k, \gamma_k$  - соответственно средние значения коэффициента теплопроводности, температуры, теплоемкости и удельный вес в « $k$ »-ом элементе в конце временного шага  $\Delta\tau$ ;  $\lambda_i^-, \theta_i^- (i = 1, 2)$  - соответственно коэффициент теплопроводности и температуры в элементе, следующим за элементом « $k$ » по координате  $x_i$  в отрицательную сторону;  $\lambda_i^+, \theta_i^+$  - аналогичные параметры - в положительном направлении  $x_i$ .

$$S_{21}^- = S_{21}^{1-} + S_{22}^{2-}; \quad S_{21}^+ = S_{21}^{1+} + S_{22}^{2+};$$

$S_{ij}^{1+} (i \neq j; i, j = 1, 2)$  - длина дуги  $S_{ij}^1$  - элемента, следующим за элементом « $k$ » в положительном направлении по координате  $x_j$ ;  $S_{ij}^{1-}$  - то же, но в отрицательном по  $x_j$ ;  $\theta_i^+$  - температура в элементе, следующим за элементом « $k$ » в направлении  $x_i$ ;  $\theta_i^-$  - то же, но в отрицательном направлении  $x_i$ .

Сходимость «прогонки» (10) доказана в работе<sup>1</sup>.

Необходимо задать начальные (11) и граничные (12) условия задачи.

Начальные условия задачи:

$$\begin{aligned} \Delta|_{\tau=0} &= 0 - \text{отсутствие твердой фазы металла;} \\ \theta_I|_{\tau=0} &= \theta_0 - \text{температура разливаемого жидкого металла;} \\ \theta_{III}^*|_{\tau=0} &= \theta^* - \text{начальная температура формы;} \\ \theta_{II} &- \text{температура песка;} \\ \theta_{II}^* &- \text{температура кристаллизации металла.} \end{aligned} \quad (11)$$

Граничные условия задачи (рисунок 1,а):

$$\begin{aligned} &- \text{с учетом осевой симметрии} \\ &\quad \sigma_{31} = \sigma_{32} = 0, \quad \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0, \quad U_3 = 0; \\ &- \text{на оси симметрии} \\ &\quad U_2 = 0, \quad \sigma_{21} = 0; \\ &- \text{на поверхностях } S_1, S_3 \\ &\quad \sigma_{11}|_{S_1} = -P_1, \quad \sigma_{12}|_{S_1} = 0, \quad v_1|_{S_3} = 0, \quad \sigma_{21}|_{S_4} = 0, \quad \sigma_{22}|_{S_4} = 0, \\ &\quad \sigma_{12}|_{S_3} = -\Psi \frac{U_{ск}}{U^*} \cos(n_1 x_1), \quad \theta|_{S_3} = \theta_{II}, \quad \theta|_{S_1} = \theta_0, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $U_{ск}$  - скольжение материала формы относительно песка;

$U^*$  - нормирующее перемещение;

$\Psi$  - параметр, характеризующий условия трения между формой и песком.

### **Алгоритм решения задачи по расчету НДС ОФ**

1) Исследуемая область разбивается на конечное число ортогональных элементов.

2) Вычисляются длины дуг элементов.

3) Время  $\tau^*$  разбивается на конечное число шагов  $\tau^* = \sum \Delta\tau_{\bar{n}}$ .

<sup>1</sup> Одинокое В.И. Численное исследование процесса деформации материалов бескоординатным методом. Владивосток: Дальнаука, -1995 - 168 с.

4) Задаются начальные (11) и граничные (12) условия задачи по элементам, образующих рассматриваемую область.

5) Задается начальное значение  $\Delta\tau_0$ .

6) Определяется поле температур на временном шаге  $\Delta\tau_n$  численным решением уравнения теплопроводности (10).

7) Если температуры в области  $I$  (рисунок 1,а) у поверхности  $S_2$   $\theta|_{S_2} \leq \theta_k$ , то вычисляется толщина закристаллизовавшейся корочки  $\Delta n$  по формуле (4).

8) При найденном поле температур численно решается система уравнений (2) с учетом разностных аналогов (6-9).

9) Определяется поле напряжений  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) и перемещений  $U_i$  ( $i = 1, 2$ ) по области  $Q$ . Отыскивается и запоминается максимальное значение напряжений  $\sigma_{22}$  ( $\max \sigma_{22} = \sigma_{22}^*$ ).

10) Производится шаг по времени и выполняется операция 6, если  $(\sigma_{22}^*)_n > (\sigma_{22}^*)_{n-1}$  или операция 11, если  $(\sigma_{22}^*)_n \leq (\sigma_{22}^*)_{n-1}$ .

11) Окончание счета.

Проведенные расчеты НДС ОФ показали, что наибольшими нормальными напряжениями в оболочке формы являются  $\sigma_{22}$ , немного меньше по значению величины  $\sigma_{33}$ . Напряжения  $\sigma_{11}$  же на порядок меньше  $\sigma_{22}$ , как и величины касательных напряжений. Вследствие этого, оценивать трещиностойкость ОФ будем по возникающим в ней, в процессе ее разогрева, величинам растягивающих и сжимающих напряжений  $\sigma_{22}$ .

Результаты решения задачи по расчету НДС при заливке металлов в холодную ОФ ( $\theta\phi = 25^\circ\text{C}$ ) представлены на рисунке 3. Видно, что сжимающие значения напряжения  $\sigma_{22}$  превышают по абсолютной величине растягивающие и достигают 31 МПа при заливке алюминия через 0,45 с после заливки (рисунок 3) и 43 МПа при заливке стали через 18,65 с после заливки (рисунок 4). Предел прочности при растяжении керамического образца составляет  $25 \div 35$  МПа, а при сжатии порядка 40 МПа.

Для уменьшения значений  $\sigma_{22}$  в *третьей главе* решается задача по оптимизации физических свойств материалов ОФ.

Напряженное состояние ОФ при заданном температурном воздействии (температуры заливаемого ЖМ) характеризуется такими физическими параметрами, как  $G$  – модуль сдвига;  $k$  – коэффициент объемного сжатия;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $C$  – коэффициент удельной теплоемкости;  $\gamma$  – плотность. Учтем, что  $k = (1 - 2\mu)/E$ , где  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона (для керамики  $\mu = 0,25$ ).

Эти параметры являются управляющими переменными при построении целевой функции. Будем определять гипотетический материал ОФ, при котором величины напряжений  $\sigma_{22}$  в слоях формы будут наименьшими. Рассмотрим наиболее жесткий процесс – заливка стали в холодную ОФ.

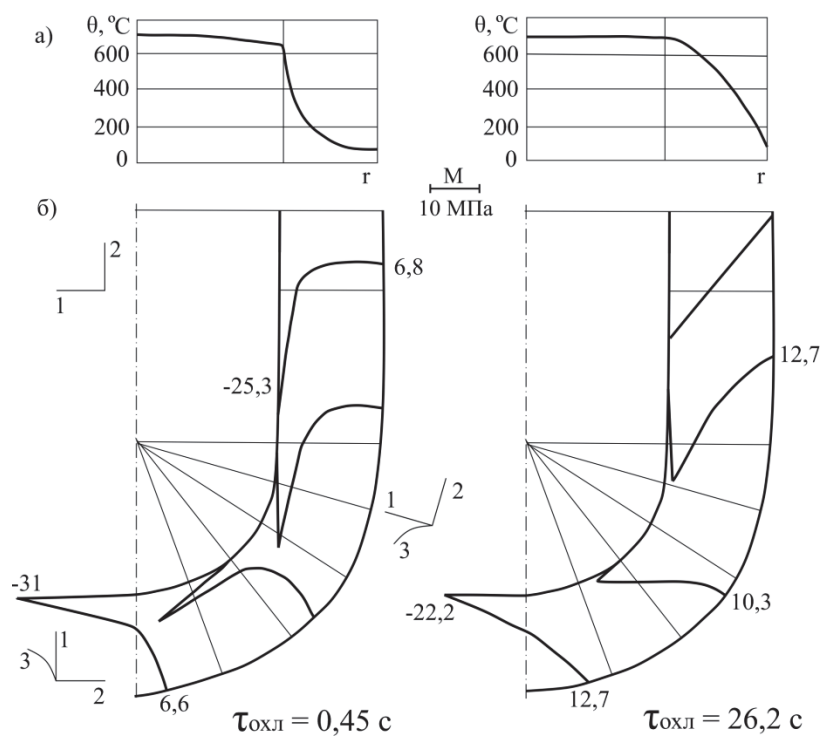


Рисунок 3 – Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) по толщине оболочковой формы в разных сечениях и в динамике ее охлаждения при заливке алюминия в холодную форму

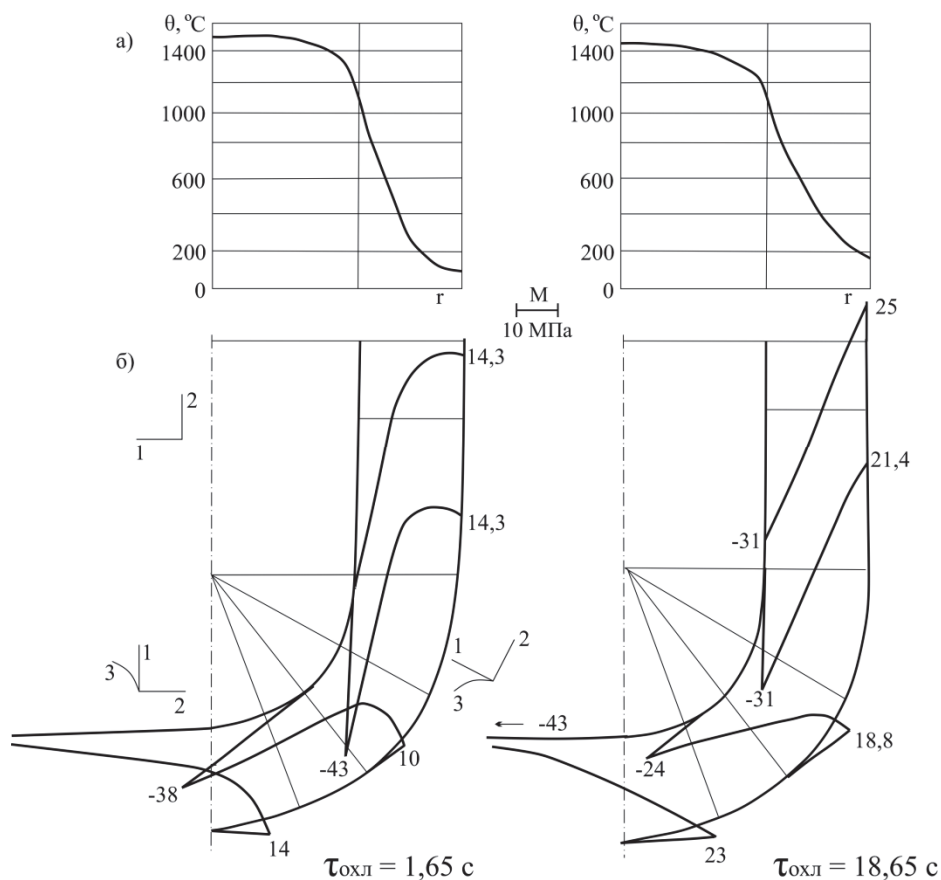


Рисунок 4 – Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) по толщине оболочковой формы в разных сечениях и в динамике ее охлаждения при заливке стали в холодную форму

Итак, будем искать

$$F = \min \sigma_{22}(G, \alpha, \lambda, C, \gamma) \max \sigma_{22}(\tau, Q) \quad (13)$$

с учетом системы уравнений (1), (2) при начальных (11) и граничных (12) условиях и наличием ограничений на управляющие переменные:

$$\begin{aligned} 2000 &\leq G \leq 8000 \text{ кг/мм}^2; \\ 0,12 \cdot 10^{-6} &\leq \alpha \leq 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \\ 0,0003 &\leq \lambda \leq 0,0010 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\ 500 &\leq C \leq 1350 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \\ 1,2 \cdot 10^{-6} &\leq \gamma \leq 4 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3, \end{aligned} \quad (14)$$

где в уравнении (13) обозначено  $Q$  – исследуемая область.

Приняты следующие физические параметры кристаллизующейся стали:

$$\begin{aligned} G &= 1000 \text{ кг/мм}^2; \alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \lambda = 0,0298 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\ L &= 270 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}; C = 444 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \gamma = 7,80 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3; \\ \theta_k &= 1450 \text{ °C}; \theta_m = 1500 \text{ °C}. \end{aligned} \quad (15)$$

За начальное приближение – опорное решение – примем керамический материал формы со следующими физическими свойствами:

$$\begin{aligned} G &= 2960 \text{ кг/мм}^2; \alpha = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \lambda = 0,000812 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\ C &= 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \gamma = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3. \end{aligned} \quad (16)$$

В формализованном виде целевую функцию (13) перепишем в виде:

$$F(t_i, i = 1 \div 5) \rightarrow \min \sigma_{22}(t_i) \max \sigma_{22}(\tau_*, Q), \quad (17)$$

где  $t_i, i = 1, \dots, 5$  – управляющие переменные, входящие в функцию (13).

Пусть  $t_i^0, i = 1, \dots, 5$  – опорное решение (14).

По величине  $\sigma_{22}$  в наружном слое оболочковой формы будем вести оценку функции (17) при варьировании управляющих переменных  $t_i, i = 1, \dots, 5$  в области  $Q$ .

#### **Алгоритм решения задачи по оптимизации физических свойств ОФ**

1-10) Пункты аналогичны пунктам алгоритма решения задачи по расчету НДС ОФ выше;

11) Из множества управляющих переменных  $A_1^5 = \{t_i^0\}$  выбирается  $t_k^0$  и ему придается приращение  $\pm \Delta t_k^0$ . Следует многократный посыл к операции 6 вплоть до границ управляющей переменной  $t_k^0$ .

12) Выбирается решение с параметром  $t_k^0$ , соответствующее наименьшему значению с параметром целевой функции (13). Стирается старое и запоминается новое опорное решение.

13) Осуществляется переход к новому управляющему параметру  $t_{k+1}$ , при  $k \leq 5$  следует операция 6; при  $k = 6$  следует операция 14.

14) Осуществляется сравнение двух опорных решений (полученного  $F^p$  и  $F^{p-1}$ )  $[\{F_i^p\} - \{F_i^{p-1}\}] \geq \varepsilon$  (где  $p$  – номер опорного решения).

Если неравенство выполняется, то процесс вычислений закончен, если нет – следует операция 6.

В результате расчета получили материал с найденными оптимальными значениям параметров:

$$\begin{aligned}
\alpha &= 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \\
G &= 2000 \text{ кг/мм}^2; \\
\lambda &= 0,001 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\
C &= 1350 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \\
\gamma &= 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3,
\end{aligned}
\tag{18}$$

а значение целевой функции  $F(t_i, i = 1, \dots, 5) = 4,1$  МПа при  $\tau = 18,65$  с.

Для сравнения на рисунке 5 приведены эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по толщине ОФ в разных сечениях при  $\tau_{\text{охл}} = 18,65$  с при заливке стали в монослойную ОФ для материала ОФ с физическими параметрами (16) (рисунок 5,б, г) и материала с найденными оптимальными параметрами (18) (рисунок 5,а, в). Видно, что растягивающие и сжимающие напряжения резко снизились по сравнению со значениями для формы с физическими параметрами (16).

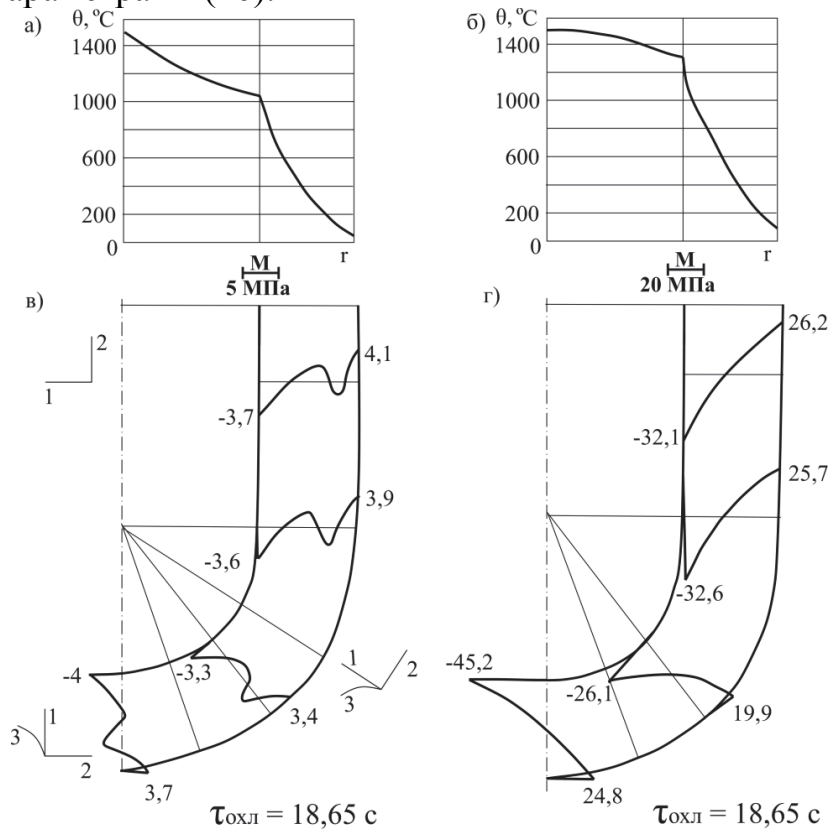


Рисунок 5 – Распределение температуры (а, б) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (в, г) по толщине оболочковой формы в разных сечениях и в динамике ее охлаждения: а, в – заливка стали в форму с найденными параметрами (18); б, г – заливка стали в форму с физическими свойствами (16)

Чтобы перейти к реальному материалу, из которого могла бы быть изготовлена ОФ, выдерживающая температурные напряжения при заливке в нее стали, определили значимость (вес) каждого из параметров (18) в изменении функции (17). В процентном выражении нашли вес –  $\alpha$  (67,5 %);  $G$  (33 %);  $\lambda$  (2,4 %);  $C$  (6,1 %);  $\gamma$  (9,2 %). Наибольшее влияние на изменения напряжения  $\sigma_{22}$  при охлаждении ОФ имеют параметры  $\alpha$  и  $G$ . Остальные параметры, учитывая, что разброс экспериментальных данных по керамическому материалу колеблется в пределах 30 – 40 %, несущественно влияют на оптимизацию целевой функции (17).

В четвертой главе решалась задача по прогнозированию трещиностойкости пятислойных ОФ с разными видами макроструктур (рисунок 6) при заливке их сталью по технологии, полученного патента [11] и положительного решения на выдачу патента [12]. Штриховкой показан слой, параметры которого отличны от параметров (16) остальных слоев, а именно этот слой выполнен из кварцевого песка с коэффициентом линейного расширения  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ .

Исходная система уравнений будет аналогична системам (1), (2) с той лишь разницей, что уравнения (2) записываются в той же форме, но с физическими параметрами по каждому слою. Решение сформулированной системы уравнений осуществляется с теми же начальными, граничными условиями и численным методом что и ранее в предыдущих главах.

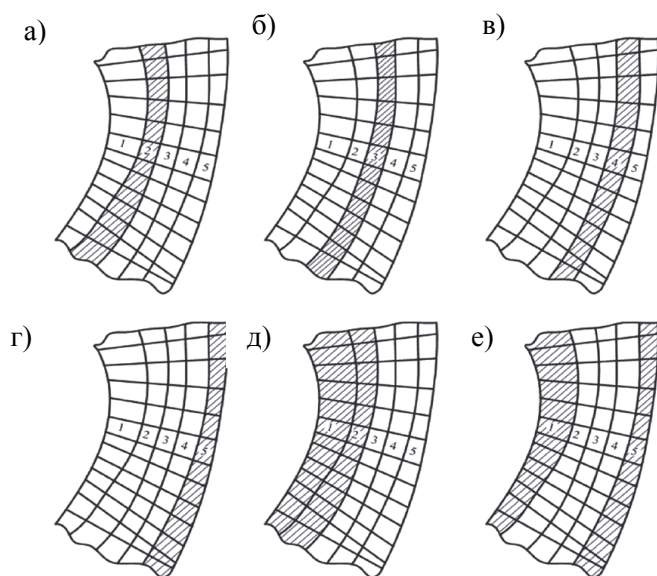


Рисунок 6 – Схемы видов исследуемых макроструктур ОФ

### Алгоритм решения задачи по оптимизации структуры многослойной ОФ

1) Исследуемая область разбивается на конечное число ортогональных элементов.

2) Вычисляются длины дуг элементов.

3) Время  $\tau^*$  разбивается на конечное число шагов  $\tau^* = \sum \Delta\tau_n$ .

4) Задаются начальные и граничные условия задачи по элементам, образующих рассматриваемую область, принимаем  $k = 1$ .

5) В слоях  $S_i$ ,  $i \neq k$  принимаются свойства:  $G = 2960 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\alpha = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ,  $\lambda = 0,000812 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}$ ,  $C = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ ,  $\gamma = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3$ ;

В слое  $S_k$  – свойства:  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ , значения остальных параметров не изменяются.

6) Определяется поле температур на временном шаге  $\Delta\tau_n$  численным решением уравнения теплопроводности (10) на данном временном шаге.

7) Если температуры в области  $I$  (рисунок 1, а) у поверхности  $S_2$   $\theta|_{S_2} \leq \theta_k$ , то вычисляется толщина закристаллизовавшейся корочки  $\Delta n$  по формуле (4).

8) При найденном поле температур численно решается система уравнений (2) с учетом разностных аналогов (6 – 9)

9) Определяется поле напряжений  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) и перемещений  $U_i$  ( $i=1, 2$ ). Отыскивается и запоминается максимальное значение напряжений  $\sigma_{22}$  ( $\max \sigma_{22} = \sigma_{22}^*$ ).

10) Производится шаг по времени и выполняется операция 6, если  $(\sigma_{22}^*)_n > (\sigma_{22}^*)_{n-1}$  или операция 11, если  $(\sigma_{22}^*)_n \leq (\sigma_{22}^*)_{n-1}$ .

11) Найденное значение  $\max \sigma_{22}^k$  заносим в матрицу  $\bar{A}$ .

12) Шаг по « $k$ »:  $k = k+1$ . Если  $k \leq \bar{t}$ , то выполняется операция 5, если  $k \geq \bar{t}$ , выполняется операция 13.

13) Из матрицы  $\bar{A}$  находится  $\min \sigma_{22}^k$ , конец счета.

Результаты решения задачи по прогнозированию трещиностойкости многослойных ОФ при заливке их сталью приведены на рисунках 7 – 9.

Так на рисунке 7 приведены графики температур ( $a$ ) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по сечениям ОФ ( $b$ ) в двух временных интервалах:  $\tau = 1,65$  с и  $\tau = 29,65$  с для структуры ОФ, представленной на рисунке 6,а. Второе значение времени  $\tau = 29,65$  с выбрано из условия, что при большем времени  $\tau$  значения  $\sigma_{22}$  по сечению ОФ будут уменьшаться. Сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$  имеют наибольшие значения в начальный момент во внутреннем слое ОФ, соприкасающемся с ЖМ. Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  достигают наибольшей величины при  $\tau = 29,65$  с в сечении стыка сферической и цилиндрической частей ОФ.

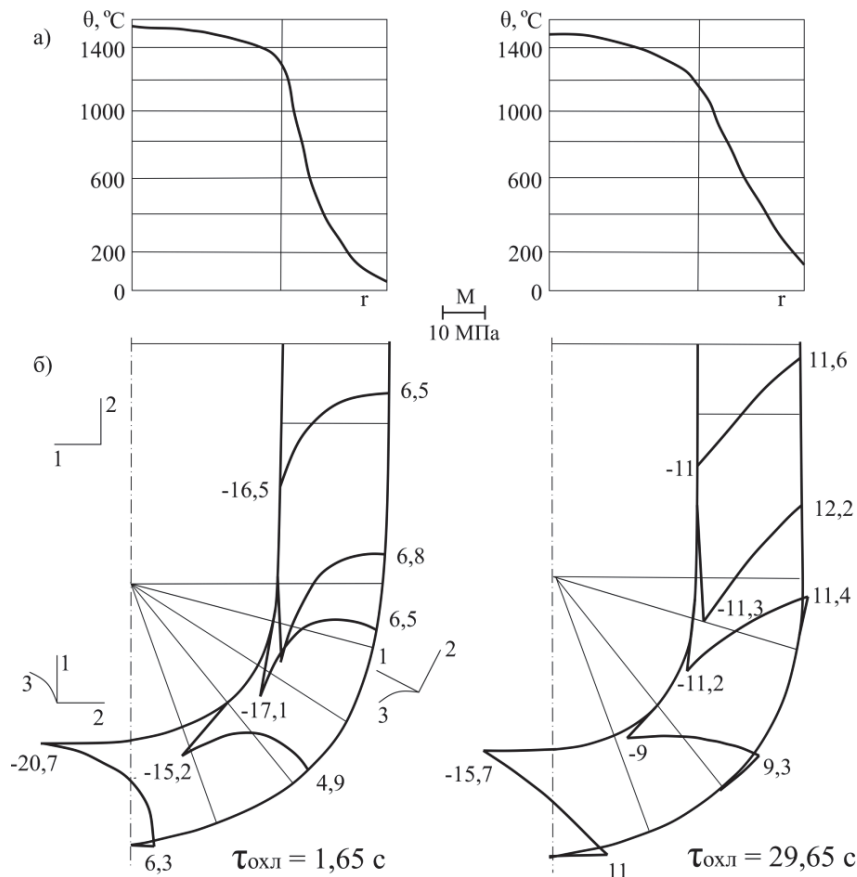


Рисунок 7 – Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) по толщине ОФ (рисунок 6,а) в разных сечениях и в динамике ее охлаждения после заливки стали в холодную форму



На рисунке 8, где показаны значения напряжений  $\sigma_{22}$  в ОФ, два слоя, близких к жидкому металлу, изготовлены из кварцевого стекла (рисунок 6,д). Для напряжения  $\sigma_{22}$  имеем худший вариант морфологического строения ОФ, по сравнению с формами, изображенными на рисунках 6,б...г. Другое расположение двух слоев кварцевого стекла (см. рисунок 6,е) показало наилучшие, из всех рассмотренных выше, результаты по напряжениям  $\sigma_{22}$  при заливке стали в холодную ОФ (рисунок 9).

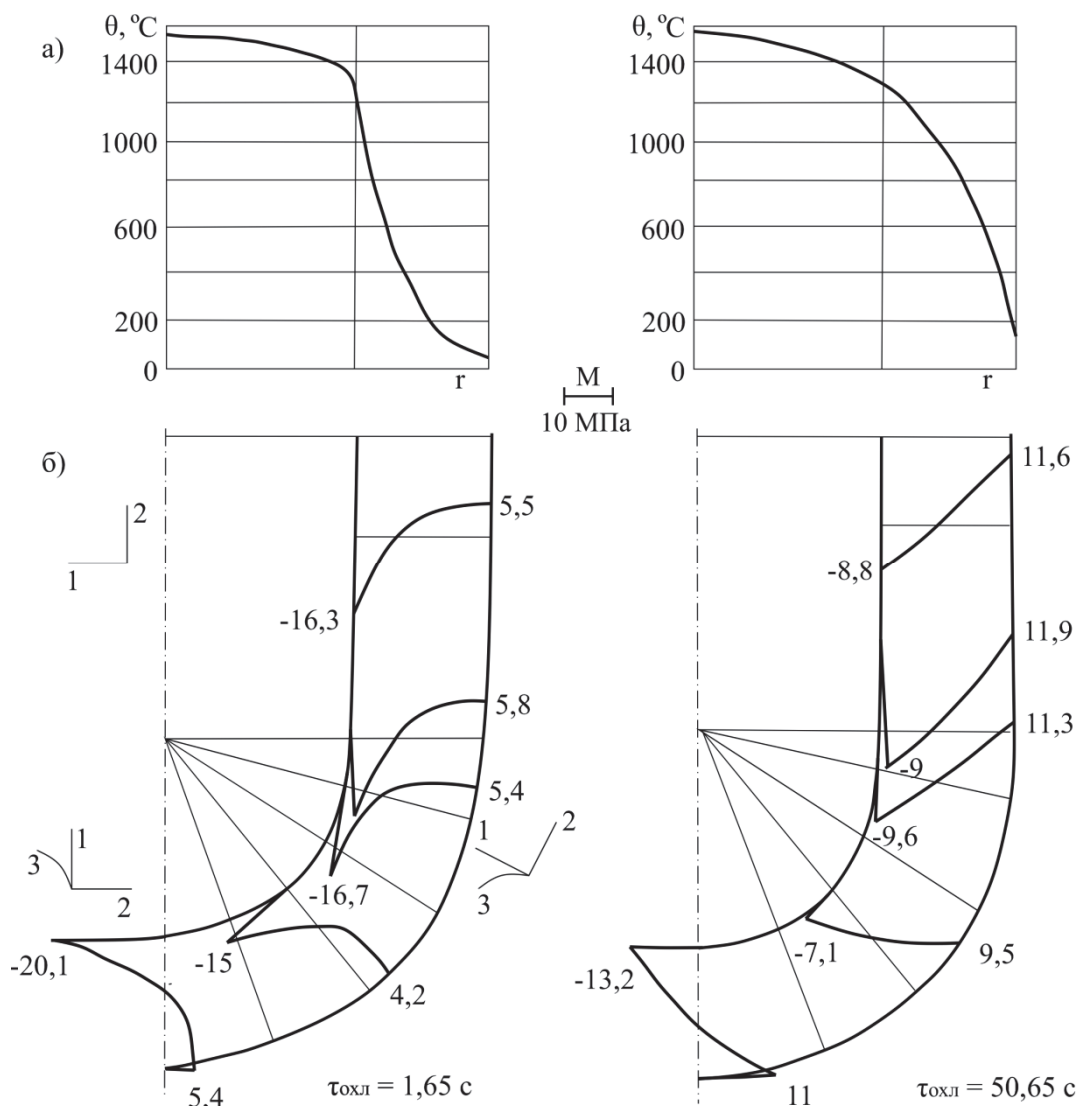


Рисунок 8 – Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) по толщине ОФ (рисунок 6,д) в разных сечениях и в динамике ее охлаждения после заливки стали в холодную форму

Результаты расчетов подтверждают правильность выбора материала и морфологии ОФ, предложенных в работах [5, 6]. Растягивающие и сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$  в ОФ уменьшились более чем в 2 раза, по сравнению с однородной керамической структурой с рассчитанными физическими свойствами, согласно более ранней публикации Салиной М.В и др.<sup>1</sup>, при этом выяснили, что положение слоя с

<sup>1</sup> Евстигнеев А.И., Петров В.В., Салина М.В., Одинокое В.И. Расчет напряжений и деформаций в осесимметричной оболочковой форме при затвердевании отливки // Литейное производство. – 2004. – №6. – С. 29–31.

низким  $\alpha$  незначительно влияет на стойкость ОФ и может выбираться, исходя из сложности его нанесения в сечении ОФ.

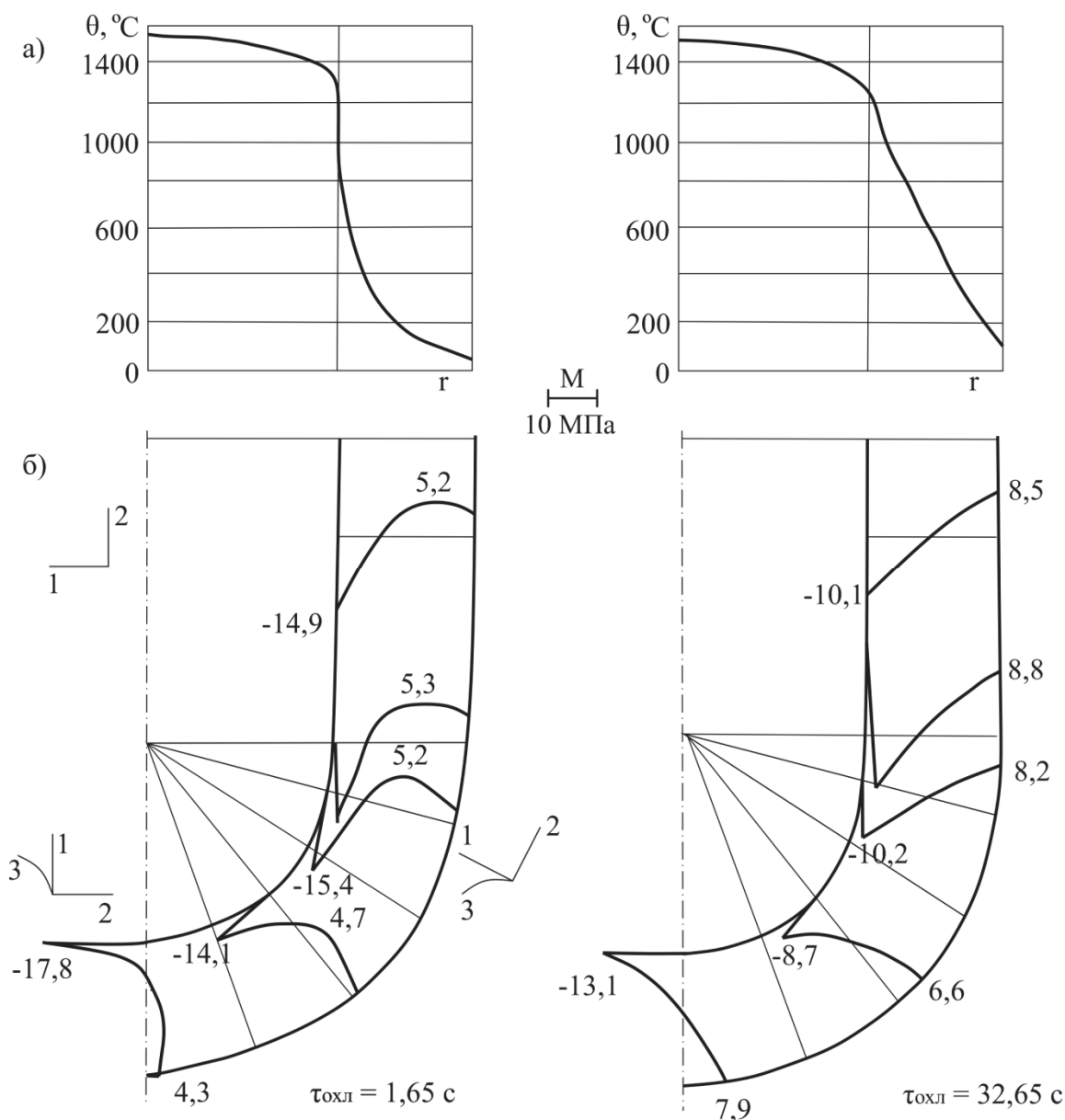


Рисунок 9 – Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) по толщине ОФ (рисунок 6,е) в разных сечениях и в динамике ее охлаждения после заливки стали в холодную форму

В пятой главе решается задача математического программирования, целью которой является построение математической модели для определения температуры опорного наполнителя, при которой будет обеспечиваться максимальная стойкость ОФ при заливке металла [2, 3]. Критерием стойкости служат появляющиеся в сечении ОФ нормальные растягивающие напряжения. Расчетная схема задачи приведена на рисунке 1.

При этом целевая функция будет иметь следующий вид

$$F = \min \sigma_{22}(\theta_{он}) \max \sigma_{22}(\tau, Q), \text{ при } \theta_1^* \leq \theta_{он} \leq \theta_2^*, \quad (19)$$

где  $Q$  – исследуемая область,  $\tau$  – время охлаждения,  $\theta_i^*$  ( $i = 1, 2$ ) – предел ограничений

температуры  $\theta_{\text{OH}}$ . Выбор растягивающего напряжения  $\sigma_{22}$  очевиден, так как предел растяжения  $\sigma_p$  ОФ намного меньше, чем при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$  ( $\sigma_p \ll \sigma_{\text{сж}}$ ).

Целевая функция (19) связана непосредственно с решением уравнений (1-10).

### **Алгоритм решения задачи по влиянию температуры ОН на НДС ОФ**

1) Исследуемая область разбивается на конечное число ортогональных элементов.

2) Вычисляются длины дуг элементов.

3) Время  $\tau^*$  разбивается на конечное число шагов  $\tau^* = \sum \Delta\tau_{\bar{n}}$ .

4) Задается шаг по изменению температуры опорного наполнителя  $\Delta\theta$ .

5) Задаются начальные и граничные условия задачи по элементам, образующих рассматриваемую область.

6) Принимаются температуры опорного наполнителя:  $\theta_{\text{OH}} = \theta_1^*$ .

7) Определяется поле температур на временном шаге  $\Delta\tau_n$  численным решением уравнения теплопроводности (10), при наличии начальных условий на данном временном шаге.

8) Если температура в области  $I$  (рисунок 1,а) у поверхности  $S_2$ :  $\theta|_{S_2} \leq \theta_k$ , то вычисляется толщина закристаллизовавшейся корочки  $\Delta_n$ , по формуле (4).

9) При найденном поле температур численно решается система уравнений (1, 2) при граничных условиях.

10) По найденному полю напряжений  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) отыскивается и запоминается максимальное значение напряжения  $\sigma_{22}$  ( $\sigma_{22}^* = \max \sigma_{22}$ ).

11) Если  $(\sigma_{22}^*)_n > (\sigma_{22}^*)_{n-1}$  производится шаг по времени и выполняется операция 7. Если  $(\sigma_{22}^*)_n \leq (\sigma_{22}^*)_{n-1}$  – следует операция 12.

12) Следует приращение температуры опорного наполнителя:  $\theta_{\text{OH}} = Q_1^* + \Delta\theta$ .

Если  $\theta_{\text{OH}} < \theta_2^*$  – принимается  $n = 1$  и выполняется операция 7.

Если  $\theta_{\text{OH}} \geq \theta_2^*$  – следует операция 13.

13) Из множества  $\{\sigma_{22}^*\}$  находятся минимальные значения  $F = \min(\sigma_{22}^*)$ . Производится распечатка полей  $u_i$  ( $i = 1, 2$ ),  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) при значениях  $\theta_{\text{OH}}$ ,  $\tau$  – полученных при  $\min \sigma_{22}^*$ .

Некоторые результаты решения данной задачи приведены на рисунках 10–11.

Расчетом по предложенному критерию оптимизации установлено, что наилучший результат получен при температуре подогрева ОН в 600 °С. Однако, дальнейший анализ показал, что при  $\theta_{\text{OH}} = 500$  °С (рисунке 11) растягивающие напряжения в центральной части ОФ ниже, чем на рисунке 10, а на наружной поверхности ненамного выше, чем в найденном варианте, при том, что центральная область ОФ в первые секунды более уязвима к разрушению, чем периферийная (наружная) через  $\tau = 36$  с (рисунк 11). Поэтому было бы предпочтительней осуществлять процесс заливки металла (стали) в ОФ с опорным наполнителем нагретым до 500 °С.

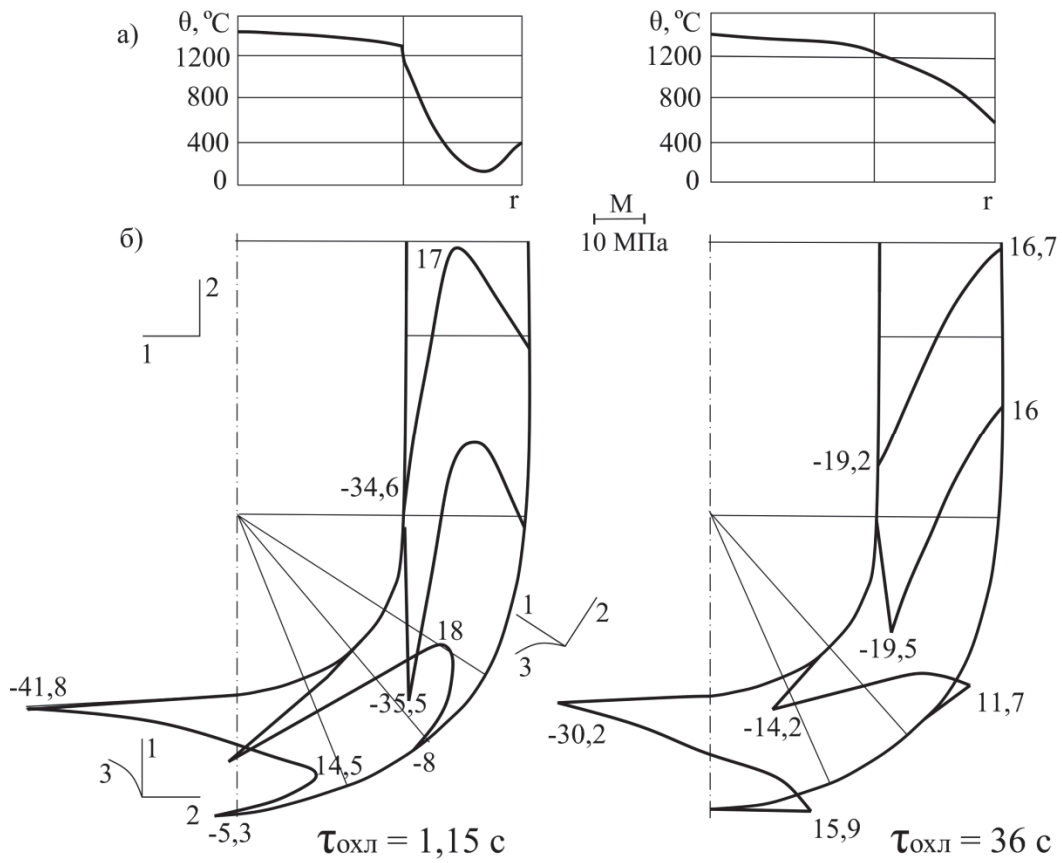


Рисунок 10 – Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) в ОФ и жидком металле при температуре ОН 600 °С

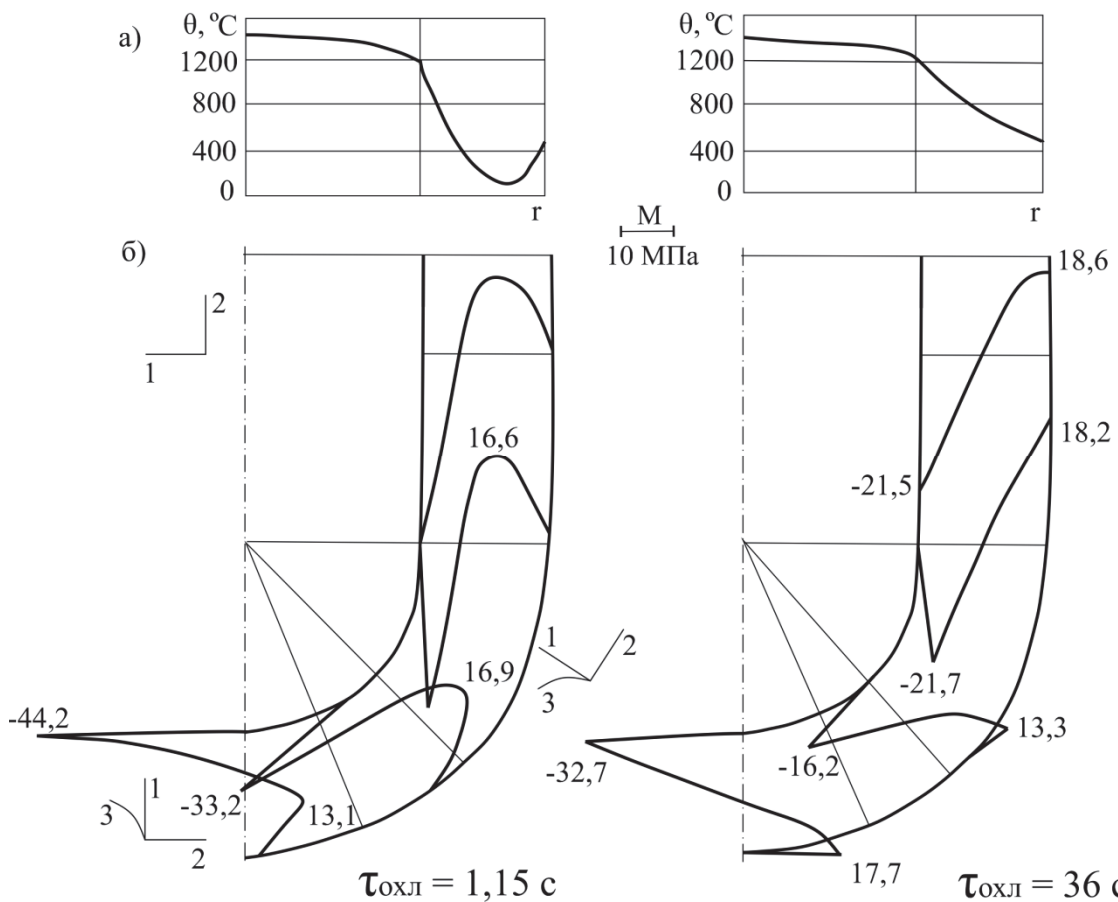


Рисунок 11 – Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) в ОФ и жидком металле при температуре ОН 500 °С

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана математическая модель для определения напряжённо-деформированного состояния в многослойной кварцевой ОФ при заливке ее сталью, некоторые слои которой выполнены из кварцевого песка с коэффициентом линейного расширения  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$  [6].

Предложена математическая модель процесса оптимизации выбора материала и структуры ЛМОФ, обладающая наибольшей трещиностойкостью при заливке ее жидким металлом [6].

Построена математическая модель процесса охлаждения заливаемого металла в многослойную ОФ при внешнем тепловом воздействии от ОН [3].

2. Разработан алгоритм решения задачи по оптимизации выбора важнейших исходных свойств материала ЛМОФ и ее структуры, найдены значения управляющих переменных, при которых ОФ не разрушается [6].

Разработан алгоритм решения задачи по определению оптимальной температуры ОН при заливке стали в холодную ОФ [3]. Предпочтительной температурой нагрева ОН является  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  [6].

3. Реализован и зарегистрирован программный комплекс по математическому моделированию оптимизации выбора температуры ОН, физических свойств материала и структуры ОФ по ВМ для повышения её трещиностойкости при охлаждении в ней отливки [13].

4. Проведен анализ и обобщение расчетных параметров по оптимизации архитектуры внутреннего строения ОФ, обеспечивающая максимальное снижение термических напряжений и на основе которых предложены на уровне изобретений два вида литейных многослойных оболочковых форм с новыми функциональными технологическими структурами промежуточных слоев, повышающие трещиностойкость ОФ и обеспечивающие их заливку жидким металлом без ОН [11, 12].

### *Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы*

В продолжении данной работы планируется расширение полученных результатов и рекомендаций по структурному состоянию оболочек и их напряженного состояния на другие функциональные оболочки и оболочечные конструкции в машиностроении, авиастроении и других областях.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Евстигнеев, А.И. Развитие исследований напряженно-деформированного состояния оболочковых форм по выплавляемым моделям / А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, В.И. Одинокоев, Е.П. Иванкова [и др.] // **Литейное производство**. – 2021. – № 5. – С. 16-20. (WoS: RSCI)

2. Евстигнеев, А.И. Влияние температуры нагрева опорного наполнителя на особенности напряженного состояния оболочковых форм при заливке стали / А.И. Евстигнеев, В.И. Одинокоев, Э.А. Дмитриев, Е.П. Иванкова, А.В. Свиридов // **Литейное производство**. – 2021. – № 3. – С. 20-24. (WoS: RSCI)

3. Евстигнеев, А.И. Влияние внешнего теплового воздействия на напряженное состояние оболочковых форм по выплавляемым моделям / А.И. Евстигнеев,

В.И. Одинок, Э.А. Дмитриев, Е.П. Иванкова, А.В. Свиридов // **Математическое моделирование**. – 2021. – Том 33 – № 1. – С. 63-76. (WoS: RSCI, Scopus)

4. Odinokov, V.I. Modelling selection of structure and properties of monolayer electrophoretic shell molds during investment casting / V.I. Odinokov, E.A. Dmitriev, A.I. Evstigneev, A.V. Sviridov, E.P. Ivankova // **Materials Today: Proceedings** Volume 38, Part 4, 2021, P. 1672-1676 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.200> (WoS, Scopus)

5. Одинок, В.И., Прогнозирование трещиностойкости многослойных оболочковых форм при заливке их сталью / В.И. Одинок, А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, Е.П. Иванкова, А.В. Свиридов, Г.И. Усанов // **Литейное производство**. – 2020. – № 7. – С. 26-30. (WoS: RSCI)

6. Одинок, В.И. Моделирование и оптимизация выбора свойств материалов и морфологического строения структуры оболочковых форм по выплавляемым моделям / В.И. Одинок, Э.А. Дмитриев, А.И. Евстигнеев, Е.П. Иванкова, А.В. Свиридов // **Известия ВУЗов. Черная металлургия**. – 2020. – Том 63 – № 9. – С. 742-754. (WoS:RSCI, Scopus)

#### *Прочие публикации*

7. Евстигнеев, А.И. Разработка новых структур многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям / А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, В.И. Одинок, Е.П. Иванкова, Г.И. Усанов, В.В. Петров, // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-I (47). – С.104-107 (список ВАК)

8. Иванкова, Е.П. Моделирование и оптимизация выбора свойств материалов и структуры многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям / Е.П. Иванкова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III (51) – С. 85-89 (список ВАК)

9. Иванкова, Е.П. Алгоритм процесса оптимизации свойств материалов и структуры оболочковой формы по выплавляемым моделям / Е.П. Иванкова, Э.А. Дмитриев // Исследования и перспективные разработки в машиностроении: Материалы VI науч.-практ. конференции молодых ученых и специалистов, 08-12 февраля 2021 / отв. ред. Р.А. Физулаков. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – С. 32-41. (РИНЦ)

10 Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Ivankova E.P., Usanov G.I., Mathematical modeling of the process of optimizing the temperature regime of the physical properties of materials and the structure of the casting shell mold for its crack resistance. – International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment, September 06-10, 2021, Sevastopol, Russia.

#### *Объекты интеллектуальной собственности*

11. Патент № 2743439 С1 Российская Федерация, МПК В22С9/04 Оpubл. 18.02.2021 г., бюл. №5 Литейная многослойная оболочковая форма / Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинок В.И., Иванкова Е.П.

12. Заявка № 2021105717 от 04.03.2021 г. Литейная многослойная оболочковая форма / Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинокоев В.И., Иванкова Е.П. Положительное решение на выдачу патента от 23.11.2021 г.

***Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ***

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616121 «Программа математического моделирования оптимизации выбора температуры опорного наполнителя, физических свойств материала и структуры оболочковой формы по выплавляемым моделям для повышения её трещиностойкости при охлаждении в ней отливки» / В.И. Одинокоев, Э.А. Дмитриев, А.И. Евстигнеев, Е.П. Иванкова Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.04.2021 г.

Подписано в печать 26.11.2021.

Формат 60×84 1/16. Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Ризограф RISO EZ 570E.  
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,30. Тираж 100 экз. Заказ 30441.

Полиграфическая лаборатория  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

