

**Чернышова Д. В., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокое В. И.**  
**D. V. Chernyshova, A. I. Evstigneev, E. A. Dmitriev, V. I. Odinokov**

## **ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ**

## **EVALUATION OF RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF CRACK RESISTANCE OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL CERAMIC SHELL FORMS**

**Чернышова Дарья Витальевна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(914)373-43-38. E-mail: daracernysova744@gmail.com.

**Darya V. Chernyshova** – Post-graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(914)373-43-38. E-mail: daracernysova744@gmail.com.

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант отдела организации и сопровождения научной и инновационной деятельности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(914)175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

**Alexei I. Evstigneev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Consulting Professor, Department of Organization and Support of Scientific and Innovative Activities, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(914)175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

**Дмитриев Эдуард Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(914)184-36-01. E-mail: rector@knastu.ru.

**Eduard A. Dmitriev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(914)184-36-01. E-mail: rector@knastu.ru.

**Одинокое Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант отдела организации и сопровождения научной и инновационной деятельности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(912)271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

**Valerii I. Odinokov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Consulting Professor, Department of Organization and Support of Scientific and Innovative Activities, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(912)271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

**Аннотация.** Представлены результаты численного моделирования напряжённо-деформированного состояния цилиндрических и сферических керамических оболочковых форм при формировании в них стальных отливок.

**Summary.** The results of numerical simulation of the stress-strain state of cylindrical and spherical ceramic shell forms during the formation of steel castings in them are presented.

**Ключевые слова:** керамическая оболочковая форма, стальная отливка, трещиностойкость, напряжения.

**Key words:** ceramic shell mold, steel casting, crack resistance, stresses.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>.*

УДК 539.5,621.74.045

В машиностроении, авиастроении и ракетно-космической технике всё больше применяются разногабаритные отливки из различных сплавов, полученные литьём по выплавляемым моделям. Такие отливки имеют не только переменные кривизну и толщину, но и переменную геометрию.

Оболочковые формы (ОФ) для получения таких отливок изготавливаются многослойными, иногда десяти-, двадцатислойными, что приводит к значительному росту себестоимости их изготовления из-за сложности, трудоёмкости и продолжительности процесса. Потери таких оболочковых форм очень высоки из-за их низкой трещиностойкости, особенно если трещинообразование в них происходит на этапах прокаливания и заливки их жидким расплавом.

Причиной образования микро- и макротрещин в оболочковых формах является высокий уровень их напряжённо-деформированного состояния (НДС), возникающего за счёт температурного и силового воздействия на технологических операциях прокаливания форм, заливки их жидким расплавом и затвердевания отливки.

Напряжённое состояние оболочковой формы связано прежде всего с системой взаимодействующих компонентов (тел); наиболее широко распространённой в промышленном производстве является четырёхкомпонентная система, а именно: жидкий металл (ЖМ) – твёрдый металл (ТМ) – оболочковая форма – опорный наполнитель (ОН). Как частный случай из системы может быть исключён опорный наполнитель (вариант безопочной заливки ОФ жидким металлом).

В настоящее время вычисление и прогнозирование уровня напряжённого состояния керамических оболочковых форм основывается на экспериментальных и эмпирических данных упрощённых математических моделей и опыте технологов. Поэтому для определения параметров управления процессом формирования отливок в оболочковых формах требуется огромный массив экспериментальных и натурных производственных данных, что сопряжено со значительными материальными и временными затратами.

Процесс деформирования оболочковых форм при формировании в них отливок сопряжён с накоплением и ростом уровня их напряжённого состояния, что в конечном итоге может привести к их разрушению. Поэтому поиск оптимальных термомеханических параметров внешних и внутренних воздействий является актуальным направлением исследований.

На сегодня имеются решения ряда частных модельных задач по формированию отливок в оболочковых формах, например цилиндрических. Решение задачи оптимального деформирования оболочковых форм при получении в них других геометрических (сферических и других конфигураций) отливок позволяет в дальнейшем перейти от моделирования процессов простых конфигураций к получению типовых моделей отливок (цилиндр, сфера) с реальными геометрическими формами, а именно блоков отливок.

Полученные результаты научного исследования позволят решать новые технологические задачи формообразования ОФ для получения качественных отливок, определять оптимальные параметры технологического процесса, предложить новые структуры ОФ и режимы внешних воздействий, что имеет большое значение для промышленного производства.

Наиболее изученным в литье по выплавляемым моделям с помощью математического моделирования является НДС оболочковой формы при формировании в ней отливки в виде цилиндра.

Стойкость к трещинообразованию ОФ оценивается по их НДС, возникающему в форме при её заливке жидким металлом и последующем охлаждении и кристаллизации в ней получаемой отливки.

Расчётная схема с учётом осевой симметрии процесса математического моделирования напряжённо-деформированного состояния ОФ, заформованной в ОН в виде цилиндра (стояка) со сферической донной частью (зупфом), приведена на рис. 1.

Расчётная схема с осевой симметрией моделирования процесса трещиностойкости керамической ОФ при формировании в ней стальной отливки в виде шара приведена на рис. 2.

Вызывает как научный, так и практический интерес сравнение показателей трещиностойкости керамической ОФ при затвердевании в ней цилиндрических и шарообразных стальных отливок.

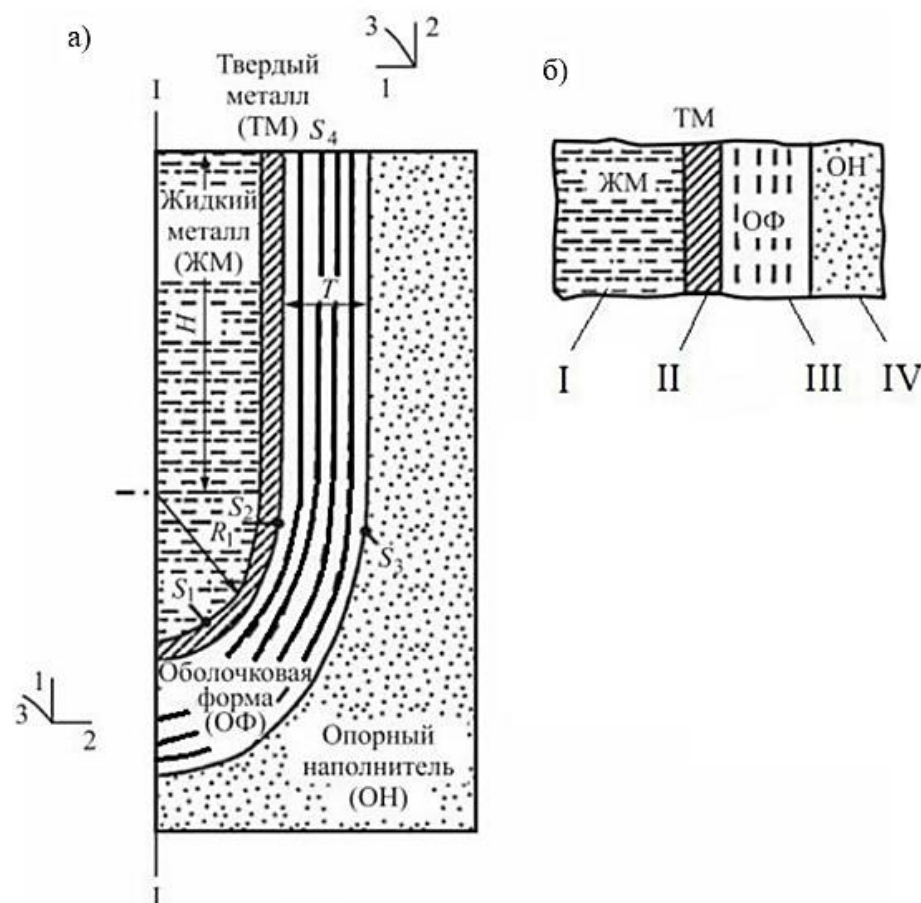


Рис. 1. Расчётная схема системы ЖМ-ТМ-ОФ-ОН с указанием поверхностей к граничным условиям задачи: а – меридианное сечение:  $S_1$  – поверхность контакта жидкого и затвердевшего металла;  $S_2$  – внутренняя поверхность контакта затвердевшего металла и оболочковой формы;  $S_3$  – внешняя поверхность оболочковой формы;  $S_4$  – свободная поверхность торца литниковой чаши оболочковой формы;  $T$  – толщина оболочковой формы;  $H$  – высота цилиндрической части стояка оболочковой формы;  $R_1$  – радиус сферической части стояка (зумпфа); 1, 2, 3 – оси координат; I-I – ось симметрии; б – схема моделирования областей системы ЖМ-ТМ-ОФ-ОН

При решении такой задачи по расчёту НДС оболочковой формы для цилиндрической и шарообразной отливок использовался апробированный численный метод, описанный в работе [1], согласно которому исследуемую область разбивают на конечное число ортогональных элементов. Для каждого элемента записывается и решается с учётом начальных и граничных условий сформулированная система уравнений, которая решается по разработанной в [1] методике и составленному алгоритму. В результате решения получены величины напряжений и перемещений по граням каждого элемента и средняя температура по каждому элементу на временном шаге охлаждения.

Построение математической модели для отливки «шар» подобно построению математической модели для отливки «цилиндр». Отличие состоит только в геометрии отливок и граничных условиях задачи.

Сравнение результатов НДС ОФ для цилиндрических и шарообразных отливок проводилось для приблизительно одинаковых технологических условий формирования отливок.

В расчётах для отливки «цилиндр» приняты следующие геометрические параметры ОФ:  $T = 5$  мм;  $H = 50$  мм  $R_1 = 20$  мм; а для отливки «шар»:  $T = 5$  мм;  $R_1 = 20$  мм. Задавались следующие временные интервалы в секундах ( $\Delta t_n$ ): 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 2; 5,10; 8; 3; 5; 10; 15; 20 с («цилиндр») и 0,1; 1,0; 2,0; 4,0; 5,0; 5,0; 5,0; 10,0; 1,0; 2,0; 5,0; 1,0; 1,0; 3,0; 3,0; 5,0; 10,0; 10 с («шар»).

Для цилиндрических ОФ наибольшие значения в их сечении имеют напряжения  $\sigma_{22}$ . Напряжения  $\sigma_{11}$  почти на порядок меньше, чем  $\sigma_{22}$ . Напряжения  $\sigma_{33}$  на 5...10 % меньше по величине, чем  $\sigma_{22}$ , и также изменяются во времени и по толщине ОФ.

Заливка стали в цилиндрическую холодную ОФ принята из соображения, что это самый «жесткий» вариант. Если ОФ при такой заливке не разрушится, то и в других случаях заливки (горячая ОФ, заливка Al-сплава) она гарантированно не будет разрушаться.

На рис. 3 приведены графики температур (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по сечениям ОФ (б) в двух временных интервалах:  $\tau = 1,65$  с,  $\tau = 29,65$  с. 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 жидким металлом. Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  достигают наибольшей величины при  $\tau = 29,65$  с в сечении стыка сферической и цилиндрической частей ОФ.

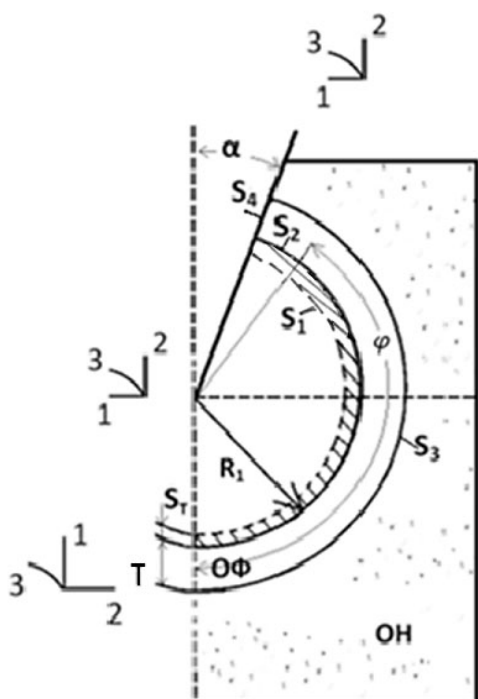


Рис. 2. Расчётная схема шарообразной ОФ, заформованной в ОН и залитой ЖМ с учётом осевой симметрии:

$S_1$  – внутренняя поверхность контакта жидкого и затвердевшего металла;

$S_2$  – внутренняя поверхность контакта затвердевшего металла и оболочковой формы;

$S_3$  – внешняя поверхность оболочковой формы;

$S_4$  – свободная поверхность торца литниковой чаши ОФ;

$R_1$  – радиус шарообразной отливки;

$S$  – толщина оболочковой формы;

$S_T$  – толщина корочки затвердевшего металла;

$\alpha$  – угол наклона литниковой воронки;

$\varphi$  – угол охвата поверхности оболочковой формы опорным наполнителем

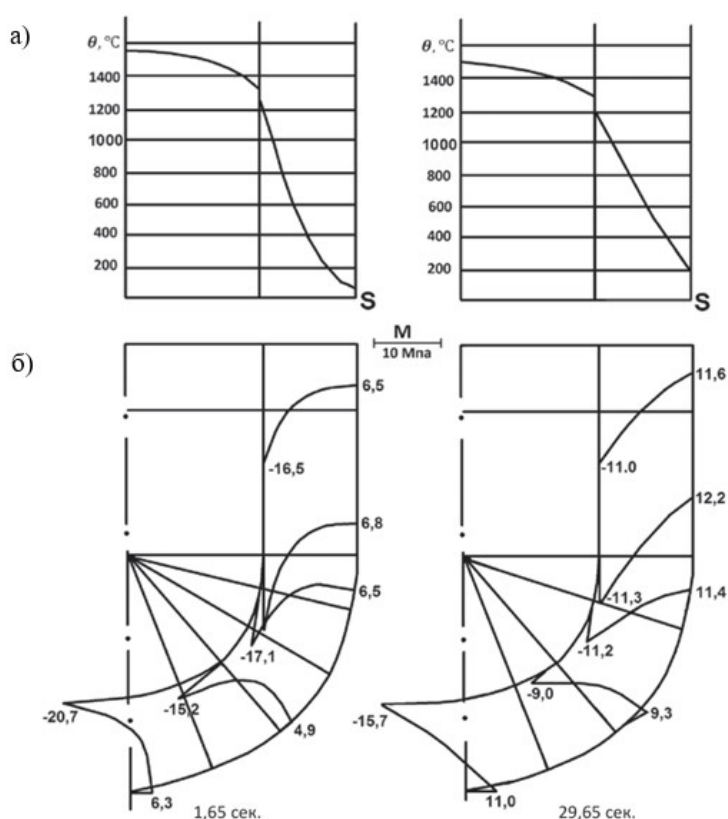


Рис. 3. Распределение температуры (а) и эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  (б) по толщине ОФ со схемой, в разных сечениях и в динамике её охлаждения после заливки сталью в холодную форму при  $\tau_{охл} = 1,65$  с и  $\tau_{охл} = 29,65$  с

На рис. 4 приведены эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  в ОФ при времени охлаждения отливки  $\tau = 1,12$  с и  $\tau = 7,12$  с.

При анализе НДС в сферической ОФ при затвердевании в ней стальной отливки установлено, что наиболее опасными для трещинообразования являются сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  на поверхности облицовочного слоя ОФ, контактирующего с жидким металлом в начальный момент заливки и охлаждения, которые могут превосходить даже предел прочности керамики при сжатии.

Их величина значительно больше (по модулю), чем величины напряжений на поверхности наружного (внешнего) слоя ОФ.

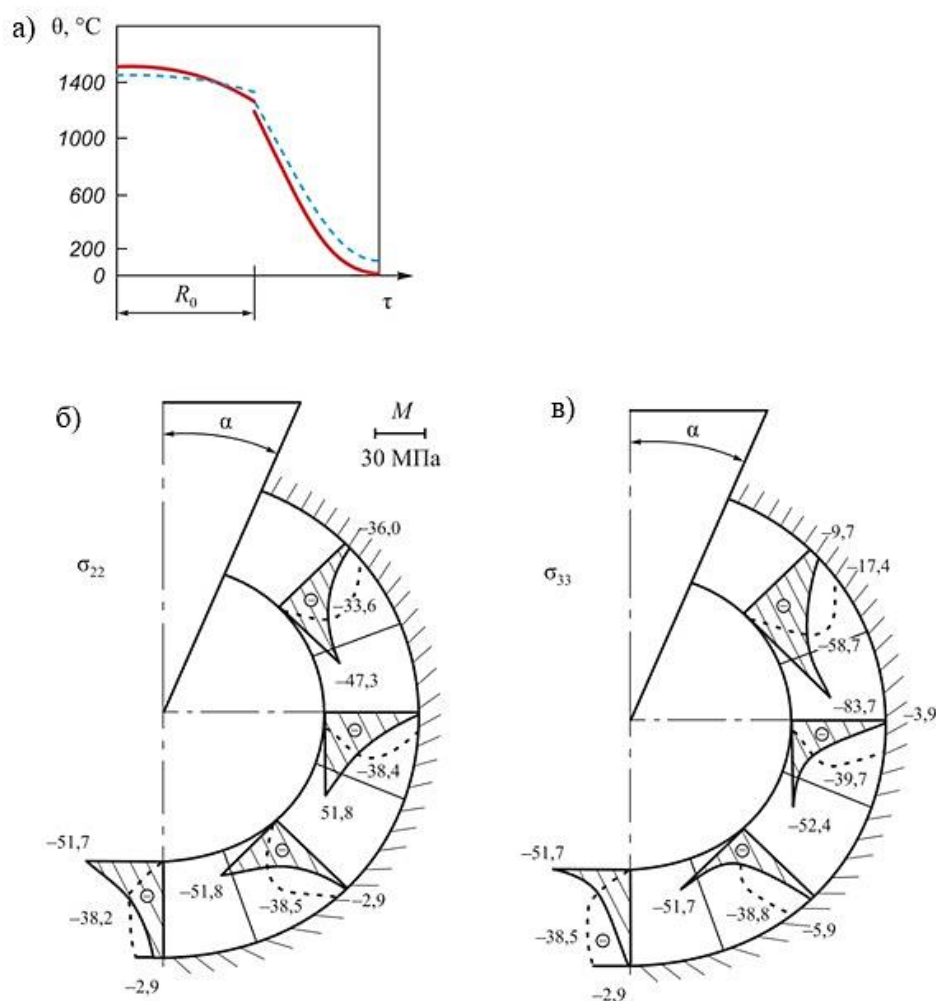


Рис. 4. Поле температур (а), эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  (б) и  $\sigma_{33}$  (в) в ОФ при  $\alpha = 10^{\circ}$  и времени охлаждения отливки 1,12 с (—) и 7,12 с (-----)

В работе [2] показано, что в первый момент времени после заливки жидкого металла в сферическую ОФ растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  минимальны, а сжимающие напряжения максимальны.

При дальнейшем охлаждении величина сжимающих напряжений резко падает, а растягивающих сначала растёт, а затем тоже падает. Величину охвата ОФ опорным наполнителем рекомендуется принять  $\varphi = 90^{\circ}$ , что обеспечивает снижение или сохранение НДС оболочковой формы на доступном уровне без её разрушения.

На рис. 5 представлены поля нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  при времени охлаждения отливки  $\tau = 0,1$  с,  $\varphi = 10^{\circ}$  и  $\alpha = 30^{\circ}$ . Корочка затвердевшего металла ещё не успела сформироваться. Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  значимы.

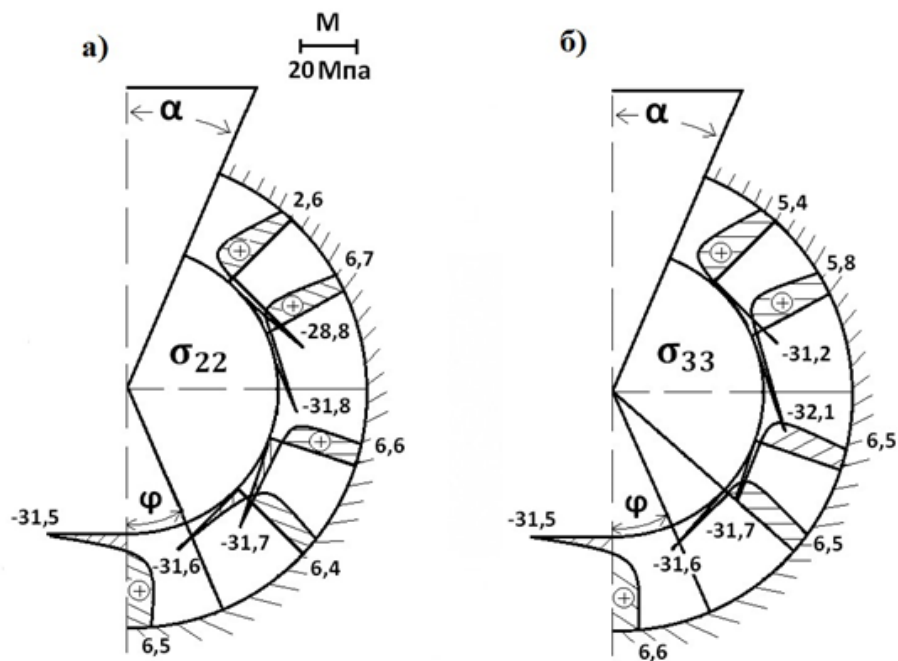


Рис. 5. Поле нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  (а) и  $\sigma_{33}$  (б) при  $\varphi = 10^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\tau = 0,1 \text{ с}$

На рис. 6 приведены результаты решения при времени охлаждения отливки  $\tau = 3,65 \text{ с}$ . Видим, что сжимающие напряжения резко падают, растягивающие же растут, а затем также падают. Таким образом, наиболее опасными с точки зрения вероятности образования трещин в ОФ являются внутренние слои, прилегающие к облицовочному слою, контактирующему в начальный момент заливки с ЖМ. При дальнейшем охлаждении затвердевающей отливки происходит выравнивание величин напряжений по толщине оболочки, но они уже не оказывают влияния на рост НДС, а значит, и вероятность разрушения ОФ.

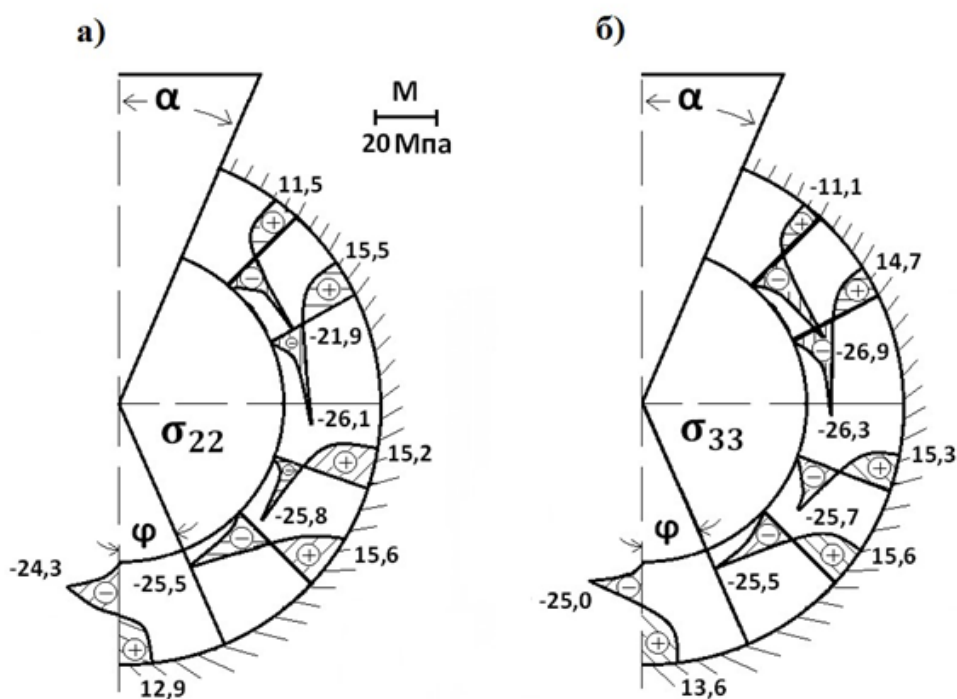


Рис. 6. Поле нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  (а) и  $\sigma_{33}$  (б) при  $\varphi = 10^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\tau = 3,65 \text{ с}$

Расчёты при других значениях  $\varphi$  ( $45^\circ, 90^\circ, 100^\circ$ ) показали, что наиболее оптимальным с технологической точки зрения является угол  $\varphi = 90^\circ$ , при котором максимальные значения  $|\sigma_{33}|$  мало отличаются от контрольного расчётного значения напряжения по целевой функции.

### **Выводы**

Для цилиндрической ОФ наиболее опасными с точки зрения её трещиностойкости на этапе затвердевания стальной отливки являются нормальные растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$ , а для сферической ОФ – нормальные сжимающие напряжения  $\sigma_{33}$ , увеличивающиеся от донной части к литниковой воронке.

Для сферической ОФ уменьшение угла её охвата  $\varphi$  опорным наполнителем обеспечивает снижение уровня НДС в ней, в то время как для цилиндрической ОФ такого не установлено. Для сферической ОФ оптимальное значение  $\varphi = 90^\circ$ .

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокоев, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 178 с.
2. Моделирование и оптимизация угла охвата сферической оболочковой формы опорным наполнителем / В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев и др. // Прикладная механика и техническая физика. – 2024. – Т. 65. – № 6. – С. 73-80.