

УДК 621.74.045:621.742.001.57

## АНАЛИЗ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТОЙ ДЕТАЛИ С ФОРМОЙ

© 2011 А.С. Савинов, Е.В. Сеницкий, А.С. Тубольцева

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Поступила в редакцию 14.03.2011

В работе рассмотрен анализ деформационных процессов при силовом взаимодействии литой осесимметричной детали с сырой песчано-глинистой формой. Показаны способы прогнозирования граничных условий: теплового поля, физико-механических свойств формообразующей среды применительно к задаче о напряженно-деформированном состоянии отливки в процессе ее охлаждения.

Ключевые слова: *отливка, охлаждение, деформация, плотность слоя, влажность смеси, тепловое поле, физико-механические свойства, теплофизические свойства*

Решение задачи о силовом взаимодействии литой детали с формой невозможно без определения деформаций, возникающих в данной системе. При рассмотрении литой осесимметричной детали с плоскими поверхностями элементов затруднения усадки (рис. 1) для определения напряжений в стенке отливки проведем разбиение сжимаемой среды на ряд слоев  $x_i$ . Ввиду воздействия теплового потока отливки, каждый слой будет отличаться жесткостью, выражаемой произведением модуля Юнга  $E_i$  на площадь сжимаемого слоя  $A_i$ . Таким образом, в первом приближении нахождение деформации системы под воздействием усадочных процессов можно осуществить путем решения статически неопределимой задачи о центральном сжатии элементов различной жесткости. Решение данной задачи в условиях упругих деформаций позволяет найти абсолютное перемещение  $z$  плоскости 1 в положение 1' (см. рис.1.), при изменении температуры стенки отливки

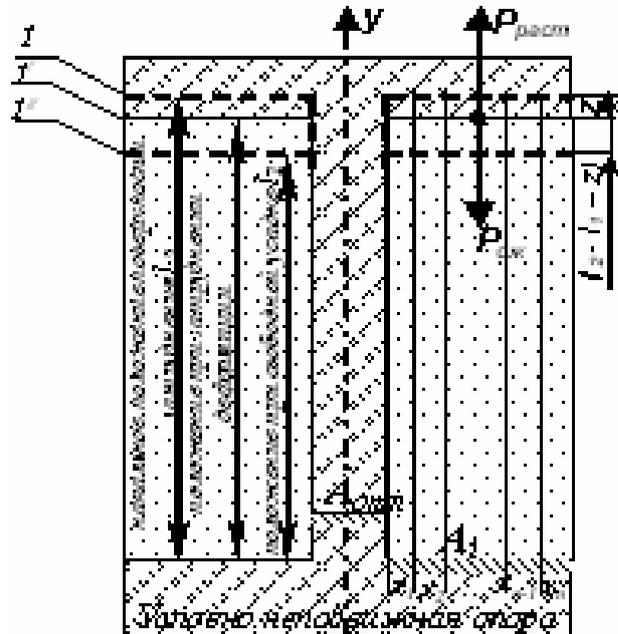
$$z = \frac{E_{отл} A_{отл} \ell_2 (\ell_2 - \ell_1)}{E_{отл} A_{отл} \ell_2 + 2\ell_1 \sum E_i A_i}; \text{ при } i = 1, \dots, n \quad (1)$$

где  $E_{отл} A_{отл}$  – жесткость стенки отливки;  $\ell_2, \ell_1$  – расстояния между плоскостями, затрудняющих усадку элементов, до изменения температуры и после изменения температуры в условиях сводной усадки сплава.

*Савинов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: Savinov\_nis@mail.ru*

*Сеницкий Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрометаллургии и литейного производства. E-mail: e-v-s@mail.ru*

*Тубольцева Алена Сергеевна, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: a-tus@mail.ru*



**Рис. 1.** Схема к расчету деформации системы «отливка-форма» при затрудненной усадке

Плоскости 1 (см. рис.1) отображают начальное положение системы, 1' – положение после изменения температуры стенки отливки  $\Delta T$ , 1'' – положение при допущении о свободной усадке материала. Значение  $\ell_1$  не трудно найти как

$$\ell_1 = \ell_2 - \Delta T \alpha \ell_2, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения сплава.

Ранее проведенные исследования [1] по расширению базы данных сопротивления деформации сырых и сухих формовочных смесей в различных температурных условиях позволяют

получить значения модулей Юнга  $E_i$ , используемых в уравнении (1). В ходе эксперимента варьировали содержание связующего (каолиновых и бентонитовых глин) в пределах 0-10%, начальной влажности 0-10%, плотности 1350-1750 т/м<sup>3</sup>, температур 20-900°С. Осевое сжатие исследуемых образцов обеспечивали путем их нагружения в устройстве (рис. 2). На основе полученных данных были разработаны нейросетевые модели, прогнозирующие относительную деформацию смесей  $\varepsilon$  (рис. 3):

$$\varepsilon = f(P; \rho_0; U_0; T; \%), \quad (3)$$

где  $P$  – усилие нагружения;  $\rho_0$ ,  $U_0$  – начальные плотность и влажность образца;  $T$  – температура смеси; % - компонентный состав образца.

Полученные модели показали высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных (корреляционное отношение для сырых смесей  $\eta_{сыр}=0,96$ , сухих  $\eta_{сух}=0,98$ ).

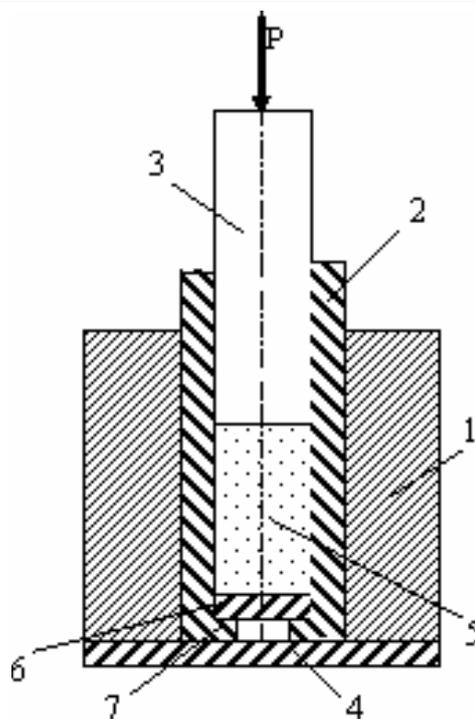


Рис. 2. Установка для определения податливости формовочной смеси:

1 – корпус; 2 – обойма; 3 – шток; 4 – опора; 5 – образец; 6 – шайба; 7 – ограничитель

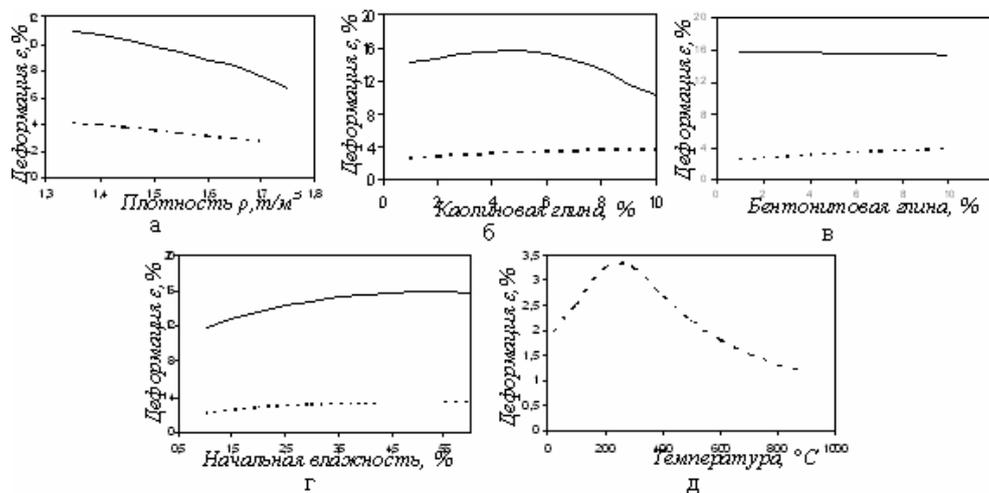


Рис. 3. Расчетные зависимости влияния на деформацию формовочной смеси:

а – плотности; б – содержания каолиновой глины; в – содержания бентонитовой глины; г – начальной влажности; д – температуры; прямая линия – сырая смесь, пунктир – сухая смесь

Как показано в работе [1], значительное влияние на деформационную способность формообразующей среды оказывает температура слоя. Учитывая, что при моделировании деформации системы производили разбивку сжимаемой среды на ряд слоев  $x_i$ , то для нахождения ее температуры, изменяемой под воздействием теплового поля отливки, удобно использовать явную разностную схему [2], по которой, температура каждого слоя в текущий

момент времени описывается следующими уравнениями:

$$T_i^{k+1} = fT_{i-1}^k + (1-2f)T_i^k + fT_{i+1}^k, i = 1, \dots, n-1; \quad (4)$$

$$T_n^{k+1} = 2fT_{n-1}^k + [1-2f(1+b)]T_n^k + 2fbT_0 \quad (5)$$

при  $f = \frac{\lambda \Delta t}{c_{\text{экв}} \Delta x^2}$ ,  $b = \frac{L \Delta x}{\lambda}$ ,

где  $T_i^{k+1}$ ,  $T_i^k$  – температура  $i$ -го слоя в текущий и предыдущий момент времени соответственно;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $\lambda$  – теплопроводность смеси;  $\Delta t$  – временной отрезок в промежутке между  $k$ -м и  $k+1$  моментом времени;  $\Delta x$  – величина  $i$ -го интервала системы;  $c_{эКВ}$  – объемная теплоемкость слоя смеси;  $L$  – коэффициент теплоотдачи.

Устойчивость решения при применении выражений (4), (5) обеспечивается выполнением следующего условия  $f \leq \frac{1}{2(1+b)}$ .

Для учета влияния на температурное поле избыточной, химически несвязанной влаги слоя формы в уравнениях (4), (5) использовали следующее выражение эквивалентной теплоемкости  $c_{эКВ}$  [3]:

$$c_{эКВ} = (57,15 + 11,06 \cdot T_i^k \cdot 10^{-3}) \frac{1000}{M_{SiO_2}} \rho_{сух} + K \times \left( 1 - th^{U_0} e^{2,87 \cdot 10^{-3} U_0^2 + 29,426 \cdot 10^{-2} U_0 - 1,849} \left( \frac{T_i^k - T_0}{2(9,653 - 0,023 U_0 \ln(U_0)) - 1,251 \ln(U_0)} \right) \right) \times \frac{61800 \rho_0}{9,653 - 0,023 U_0 \ln(U_0) - 1,251 \ln(U_0)}, \quad 2 \leq U_0 \leq 14, \quad (6)$$

где  $M_{SiO_2}$  – молярная масса оксида кремния;  $\rho_{сух}$  – плотность высохшего слоя формы;  $K$  – поправочный коэффициент,  $K=0,98$ .

Применение выражения (6) в уравнениях (4), (5) позволило с достаточной точностью учесть влияние влаги формы на динамику нагрева слоя. Что подтвердилось при сравнении экспериментальных данных источника [4] с расчетными кривыми (рис. 4).

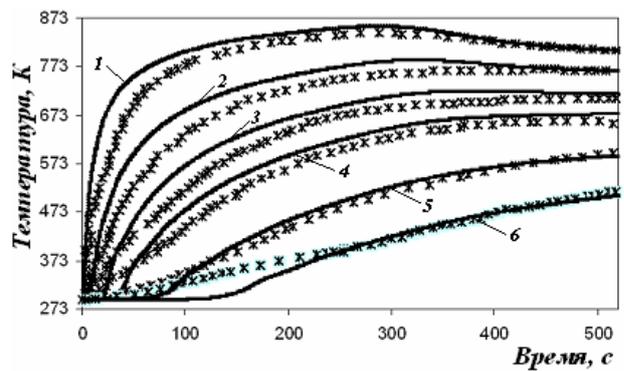


Рис. 4. Температурные кривые сырой песчано-глинистой формы: прямая линия – расчетные; ж – экспериментальные значения; 1 – 2,5 мм от границы металл-форма; 2 – 5 мм; 3 – 7,5 мм; 4 – 10 мм; 5 – 15 мм; 6 – 20 мм

Одним из основополагающих факторов, влияющих на деформацию системы «отливка-форма», являются геометрические параметры зон испарения и конденсации слоя формовочной смеси. Анализ экспериментальных данных по влиянию на геометрию зоны конденсации начальных параметров формы, приведенных в работах [5, 6], позволил разработать физико-аналитическую модель расчета формирования зоны конденсации [7]. По предложенным алгоритмам создана программа расчета кривых конденсации, прогнозирующая распределение влажности в слое сырой песчано-глинистой формы [8]. Экспериментальная проверка работы программы детально описана в источнике [7]. Программа позволяет производить расчет кривой конденсации с начальной влажностью формы  $U_0 = 2-14\%$ , начальной плотностью формы  $\rho_0 = 1400-1660 \text{ кг/м}^3$  (рис. 5).

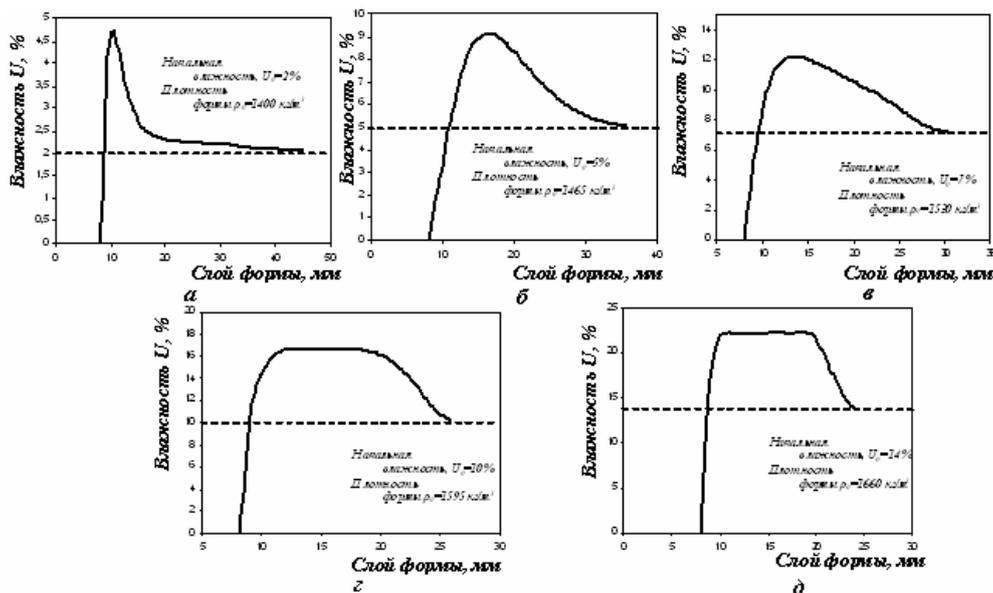


Рис. 5. Кривые распространения влажности в слое формовочной смеси при различных начальной влажности  $U_0$  и плотности  $\rho_0$  формы: а –  $U_0=2\%$ ,  $\rho_0=1400 \text{ кг/м}^3$ , б –  $U_0=5\%$ ,  $\rho_0=1465 \text{ кг/м}^3$ , в –  $U_0=7\%$ ,  $\rho_0=1530 \text{ кг/м}^3$ ; г –  $U_0=10\%$ ,  $\rho_0=1595 \text{ кг/м}^3$ , д –  $U_0=14\%$ ,  $\rho_0=1660 \text{ кг/м}^3$

**Выводы:** проведенная работа позволяет моделировать основные граничные условия формирования линейного напряженного состояния литой детали в процессе ее охлаждения при рассмотрении осесимметричных элементов затруднения усадки с параллельными плоскостями внедрения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Савинов, А.С. Расчет податливости сырой песчано-глинистой формы / А.С. Савинов, А.С. Тубольцева, Е.В. Синицкий // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 55-59.
2. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенинников. – М.: Металлургия, 1990. 239 с.
3. Савинов, А.С. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы / А.С. Савинов, А.С. Тубольцева, Д.В. Варламова // Черные металлы. 2011. Спецвыпуск посвященный ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова».
4. Вейник, А.И. Термодинамика литейной формы. – М.: Машиностроение, 1968. 335 с.
5. Ле Конг, Ха. Распределение влажности в сырой форме при заливке // Литейное производство. 1970. №5. С. 37-38.
6. Аксенов, П.Н. Аналитический расчет зоны конденсации в литейной форме / П.Н. Аксенов, А.П. Трухов // Литейное производство. 1972. №5. С. 19-21.
7. Савинов, А.С. Расчет миграции влаги в сырой песчано-глинистой литейной форме / А.С. Савинов, А.С. Тубольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. унт-та, 2011. 98 с.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614714. Программа расчета геометрических параметров зон испарения и конденсации сырой песчано-глинистой формы.

## ANALYSIS OF POWER INTERACTION BETWEEN THE CAST DETAIL AND THE MOULD

© 2011 A.S. Savinov, E.V. Sinitskiy, A.S. Tuboltseva

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov

In work the analysis of deformation processes at power interaction of cast axisymmetric detail with the crude sandy-argillaceous mould is considered. Ways of forecasting the boundary conditions: thermal field, physical-mechanical properties of the form-building environment with reference to a problem about the intense-deformed condition of casting in the course of its cooling are shown.

Key words: *casting, cooling, deformation, layer density, mix humidity, thermal field, physical-mechanical properties, thermal properties*

---

Alexander Savinov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Materials Resistance. E-mail: Savinov\_nis@mail.ru

Evgeniy Sinitskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrometallurgy and Foundry Manufacture. E-mail: e-v-s@mail.ru

Alena Tuboltseva, Senior Teacher at the Department of Theoretical Mechanics and Materials Resistance. E-mail: a-tus@mail.ru