

УДК 621.74.045

Р.В. Лютьий, доцент, канд. техн. наук

А.С. Кочешков, доцент, канд. техн. наук

И.М. Гурия, доцент, канд. техн. наук

Д.В. Кеуш, аспірантка

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: rvl2005@ukr.net

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ПРИ ЗАЛИВКЕ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

Статья посвящена изучению и расчету параметров силового взаимодействия тонкостенных литейных форм с заливаемым в них жидким металлом. Возникновение напряжений в оболочковых и особенно в керамических формах зачастую приводит к их разрушению и, как следствие, к браку литья. Обоснована необходимость расчета минимального уровня механической прочности форм при изгибе. Расчеты проведены для динамических условий (контакт формы с движущимся жидким металлом) и для статических условий (заполненная металлом форма). Установлены условия прочности на изгиб и даны рекомендации по организации ее контроля.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, изгибающий момент, керамическая форма, металл, напряжение, отливка, прочность, статическая нагрузка.

Введение

Литейная форма работает в экстремальных условиях. При заливке жидким металлом литейная форма поддается одновременному действию механических и термических нагрузок. Это зачастую приводит к образованию в поверхностном слое формы трещин, деформаций, частичному или полному разрушению формы. Данные процессы являются одними из основных причин брака литья. Общий анализ факторов, обуславливающих появление дефектов или брака литых изделий показывает, что основным из них является неудовлетворительное состояние литейной формы в процессе заливки [1].

Согласно принятой классификации, литейные формы делят на толстостенные, тонкостенные и оболочковые [2]. К последним также относят и керамические формы, полученные по выплавляемым моделям [3]. Для получения внутренних полостей и других сложных профилей в отливках используют стержни, к которым также предъявляется ряд требований.

Очевидно, что для противодействия статическим и динамическим нагрузкам со стороны заливаемого металла, форма должна иметь определенные механические свойства. В первую очередь, контролируют ее прочность [4]. Для большинства формовочных и стержневых смесей теоретическими расчетами и практическим путем определены необходимые значения прочности для предупреждения деформации и/или разрушения форм и стержней. Таким образом, развитие большинства современных технологий литья в традиционные (толстостенные) формы подкреплено соответствующей числовой базой [5].

В то же время такие технологии, как литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) и литье в оболочковые формы (ЛОФ), где применяются тонкостенные литейные формы, полной теоретической базы по необходимой прочности не имеют. Это не означает, что контроль прочности в данных технологиях не осуществляют как таковой. Речь идет о том, что необходимый числовой уровень этой прочности на сегодня не установлен. Основной задачей ставится просто достижение максимальной прочности, при этом часто приходится жертвовать рядом других важных технологических свойств.

Таким образом, данные технологии лишь номинально можно отнести к «точному» литью. Существующая нерешенная задача сдерживает развитие приведенных перспективных технологических процессов и ограничивает возможности повышения качества литых изделий.

Постановка задач

Задачей нашего исследования является установление числовых значений необходимого уровня прочности тонкостенных (оболочковых) литейных форм для обеспечения их устойчивости против статических и динамических нагрузок, возникающих при заполнении жидким металлом.

Задачи исследования:

1. Проанализировать основные усилия, возникающие в оболочковой форме при заполнении ее жидким металлом.
2. Выбрать оптимальную математическую (физическую) модель для расчета максимальных нагрузок, возникающих в оболочковой форме в процессе ее работы.
3. Определить значения статических и динамических напряжений в оболочковой форме.

4. Сформулировать выводы и рекомендации для обеспечения надлежащего контроля прочности оболочковых форм.

Методика расчетов, результаты

Определение величины необходимой прочности тонкостенных форм является нерешенным вопросом. Измерения, которые проводятся на практике, базируются на ничем не обоснованных цифрах для образцов оболочек разного состава, которые сравниваются между собой, а решающим считают факт большего значения прочности при сравнении.

Наибольшие нагрузки в процессе контакта с заливаемым металлом воспринимает керамическая форма (КФ), используемая в литье по выплавляемым моделям, поскольку она имеет наименьшую толщину (3...10 мм). Как показывают литературные данные, все исследователи придерживаются мнения, что решающей нагрузкой в КФ является нагрузка при изгибе [3, 6, 7].

Проанализируем силовое взаимодействие КФ с жидким металлом. Основные процессы силового воздействия металла на форму можно разделить на три группы (рисунок 1):

1) статическое действие залитого металла на оболочку, которое, пропорционально металлостатическому напору, имеет максимальное значение в нижней точке стояка формы; выражается в статическом давлении $P_{ст}$;

2) динамическое действие расплава металла во время заливки (имеет максимальное значение также в нижней точке, где происходит контакт со свободно падающей струей металла); выражается в виде динамического давления $P_{дин}$;

3) статическое действие металла на оболочку в процессе кристаллизации и охлаждения отливки; выражается в виде изгибающих моментов M , наибольшие значения которых достигаются в тонких элементах КФ, то есть в сечениях питателей.

Расчет реальных числовых показателей необходимой прочности формы для каждого из указанных вариантов даст возможность получить необходимые данные для организации адекватного контроля свойств КФ.

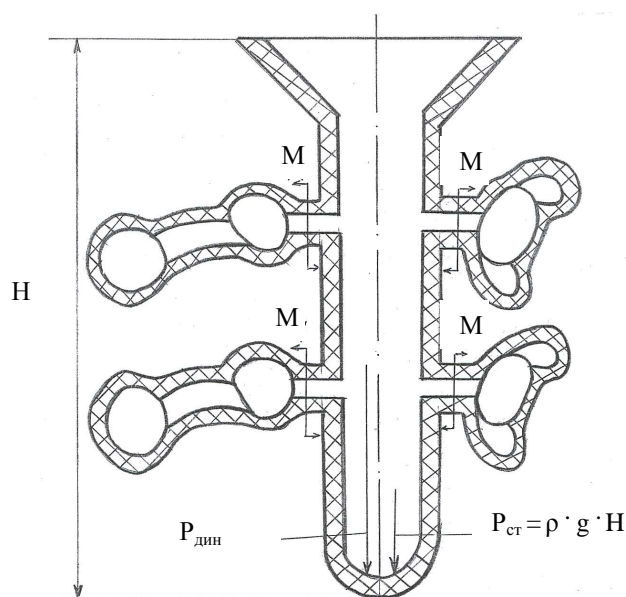


Рисунок 1 – Схема силовых нагрузок в керамической форме:
 $P_{ст}$ – статическое давление металла; $P_{дин}$ – динамическое давление металла;
 M – изгибающие моменты; ρ – плотность металла; H – высота стояка

Для определения металлостатического давления в керамических формах используется простая формула [2, 7, 8], приведенная на рисунке 1:

Принимая плотность расплава 7000 кг/м^3 (такое значение соответствует жидкой стали), ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ и максимальное значение величины металлостатического напора H , встречающееся при заливке керамических форм – 65 см [3, 7], для такого наиболее неблагоприятного случая получаем давление металла в нижней части формы:

$$P = 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,65 = 44636 \text{ Па} = 0,045 \text{ МПа}.$$

Очевидно, что такая нагрузка металла на форму не является опасной для любой оболочки. Тут следует уточнить, что полученная величина является эквивалентом прочности при сжатии. Нагрузки при изгибе имеют более высокие значения, чем при сжатии. Коэффициент, связывающий эти две величины,

для КФ неизвестен, но для преобладающего большинства формовочных смесей он находится в пределах 1,5...4,0 [4, 9]. В таком случае необходимая прочность при изгибе должна быть в четыре раза больше, чем полученное расчетное значение, но все равно не превышает 0,18 МПа.

Наибольшее разрушающее воздействие на форму составляет поток жидкого металла. Прочность КФ должна обеспечить её стойкость в процессе заливки.

Расчет динамической прочности КФ сложнее, чем для статической прочности. Поэтому и методики в литературе представлены разные [7, 10]. Авторы [7] предлагают формулу:

$$P = K \cdot \rho \cdot H, \quad (1)$$

где K – коэффициент динамического воздействия, который принимают равным 1,25.

Однако согласно этой формуле рассчитывается лишь так называемая гидравлическая прочность формы. Гидравлическая прочность не является реальной величиной нагрузки. Этими же исследователями [7] теоретически и экспериментально доказано, что гидравлическая прочность КФ связана с прочностью при изгибе соотношением $\sigma_{\text{ГИДР}} = 0,02\sigma_{\text{ИЗГ}}$. В таком случае необходимая прочность при изгибе в 50 раз больше, чем гидравлическая прочность:

$$\sigma_{\text{ИЗГ}} = 50 \cdot 1,25 \cdot 7000 \cdot 0,65 = 284375 \text{ кг} / \text{м}^2, \text{ или } 2,84 \text{ МПа}.$$

Далеко не все КФ имеют рассчитанную прочность. К тому же, они заливаются, как правило, в нагретом (точнее в горячем) состоянии (600...900 °С). При этой температуре их прочность, по данным [3, 7], снижается на 36...40 %, в результате чего они частично теряют способность противодействовать динамическим нагрузкам.

Определение статических нагрузок на керамические формы в процессе кристаллизации и охлаждения отливок заслуживает особого внимания. Согласно нашему убеждению, именно в этом случае важнейшую роль играет прочность КФ, потому что форма на протяжении всего периода от заливки металлом до кристаллизации отливки подвержена действию изгибающих нагрузок. Как показано на рис. 1, уязвимым с этой точки зрения является место сопряжения отливки со стояком, то есть сечение питателя.

Из законов теоретической, прикладной механики и сопротивления материалов [10], расчет прочности при изгибе такой системы можно провести по методике для консольной (закрепленной с одного конца) балки.

На рисунке 2 изображена схема (керамическая оболочка для получения отливки 1 длиной l , питателя 2 и элемента стояка 3). Этот рисунок преобразуем в расчетную схему (рисунок 3), где изображена отливка в виде консольной балки длиной l , а также построены соответствующие эпюры распределения нагрузок.

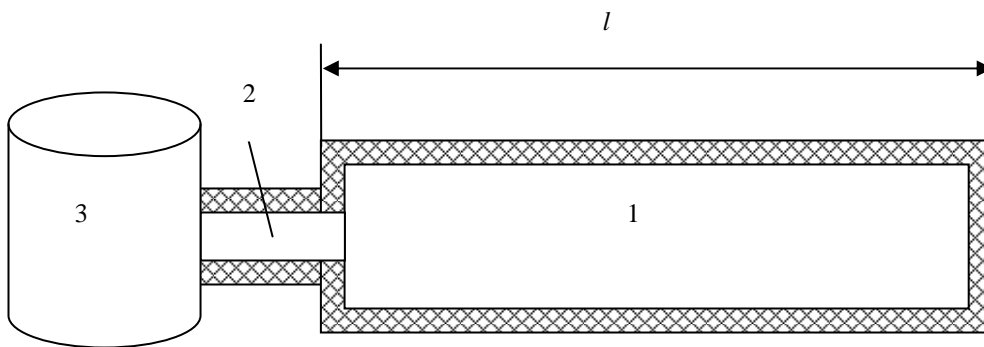


Рисунок 2 – Схема расположения отливки в керамической форме:
1 – отливка; 2 – питатель; 3 – стояк

Пока металл находится в жидком состоянии, всю нагрузку воспринимает на себя КФ. Наименьшее сечение она имеет в месте расположения питателя. Поэтому как раз в этом сечении должна быть обеспечена максимальная прочность.

Массу отливки представляем как равномерно распределенную нагрузку q , которая в расчетах может быть рассмотрена также как обычная нагрузка Q . Оба способа представления нагрузки дают одинаковый результат.

Изгибающий момент является первой производной от сконцентрированной нагрузки и второй производной от равномерно распределенной нагрузки:

$$Q = \frac{dq}{dl}, \quad M = \frac{dQ}{dl} = \frac{d^2q}{dl^2}. \quad (2)$$

Для расчета нагрузок и моментов используем следующие формулы:

$$Q = q \cdot l, \quad M = Q \cdot \frac{l}{2} = ql \frac{l}{2} = \frac{q \cdot l^2}{2}. \quad (3)$$

Равнораспределенную и сконцентрированную нагрузку рассчитаем по известным формулам:

$$q = \frac{m \cdot g}{l}, \quad Q = m \cdot g, \quad (4)$$

где m – масса отливки, кг; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

От изгибающего момента переходим к прочности КФ при изгибе, в МПа:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_x}, \quad (5)$$

где M_{\max} – максимальный изгибающий момент, Н·м; W_x – момент сопротивления для соответствующего сечения, м^3 .

Питатель, в основном, имеет квадратное или прямоугольное сечение, потому воспользуемся расчетной схемой (рисунок 4), которая может рассматриваться как универсальная для всех КФ.

Момент сопротивления такого сечения КФ определяем по формуле:

$$W_x = \frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3}{6h}, \quad (6)$$

где b, b_1, h, h_1 – размеры, указанные на рисунке 3.

По приведенным формулам (2)–(6) провели расчет изгибающих нагрузок в литейных КФ. Проанализировав номенклатуру отливок, которые серийно получают в таких формах, выбраны наиболее неблагоприятные детали, которые обеспечивают максимальную нагрузку на форму. Как показал анализ, к ним относятся отливки массой 2 кг и длиной $l = 250 \text{ мм}$, расположенные так, как указано на рисунке 2.

Максимальная расчетная нагрузка на стенки КФ при получении таких отливок составляет 1,44 МПа. Данные получены при условии толщины КФ 6 мм, что является средним показателем на практике.

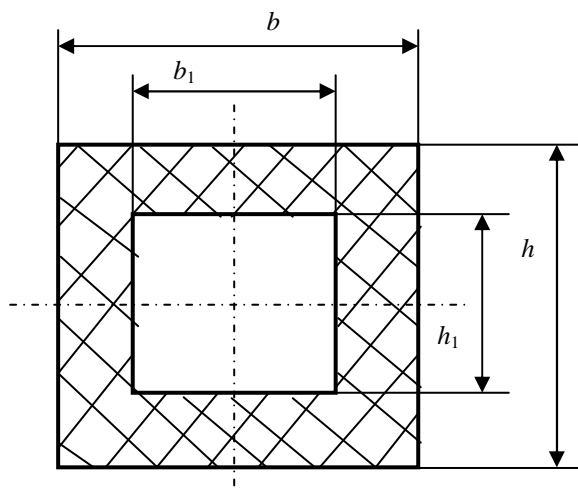


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения момента сопротивления сечения керамической формы

С уменьшением толщины КФ величина нагрузки возрастает (рисунок 5), что связано с уменьшением момента сопротивления расчетного сечения, и в форме толщиной 3 мм нагрузка составляет 4,23 МПа.

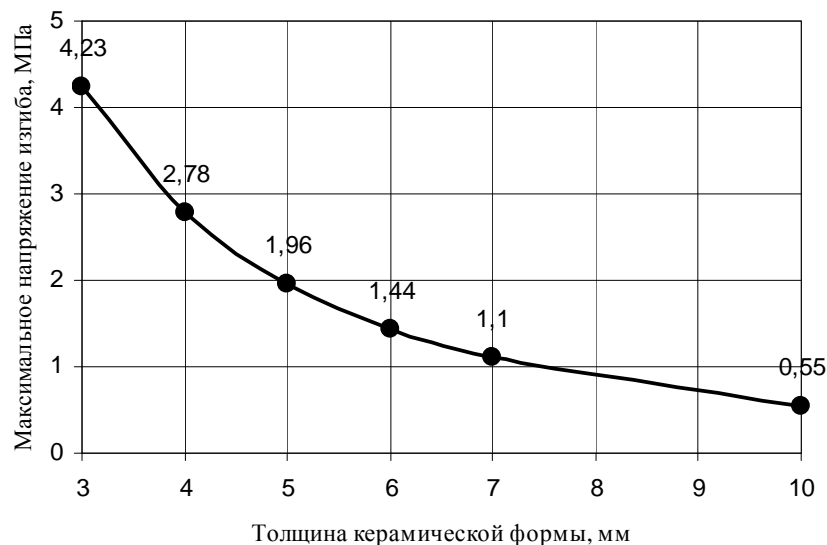


Рисунок 4 – Залежність максимальних статических вигибаючих навантажень від товщини керамічних форм

Таким образом, достичь стойкости КФ против силовых нагрузок возможно двумя путями – обеспечением высокого абсолютного значения прочности огнеупорной керамической формы при изгибе или же нанесением большего количества слоев формы с увеличением ее толщины. Воспользовавшись данными рисунка 4, можно практически выбрать достаточную толщину КФ (или количество нанесенных слоев суспензии) в зависимости от предусмотренной нагрузки. С учетом нагрева формы и заливки ее в горячем состоянии, полученные данные для обеспечения запаса прочности должны быть увеличены на 36...40 % [7]. Например, необходимая прочность для КФ толщиной 6...7 мм составит 1,54...2,10 МПа.

Выводы

1. Проанализирована система нагрузок, действующих в заполненной жидким металлом керамической форме. Показано, что наибольшие абсолютные значения наравне с динамическим давлением струи металла имеют статические изгибающие моменты, которые возникают после заполнения полости формы.

2. Разработана методика расчета необходимой прочности керамической формы при изгибе, в зависимости от ее размеров и конфигурации отливок, для получения которых она предназначена.

3. Рассчитаны максимальные напряжения в керамических формах при их контакте с металлом для трех случаев: статическое (гравитационное) воздействие залитого в форму металла, статическое (изгибающее) воздействие в наиболее тонком сечении формы, динамическое воздействие потока металла. Наибольшее напряжение в форме вызывает динамическое воздействие – 2,84 МПа – при условии использования формы с максимальной высотой (650 мм). Причем величина динамической нагрузки не зависит от толщины и материала керамической формы.

4. Для наиболее неблагоприятных конструкций отливок при средней толщине (6...7 мм) керамической формы рассчитано значение необходимой прочности форм при статическом изгибе, которое составляет 1,1...1,5 МПа при нормальной температуре и 1,54...2,10 МПа при температуре контакта с металлом (с учетом снижения прочности формы при ее нагреве).

5. Величина статической загрузки в форме зависит от ее толщины, и поэтому для керамики с недостаточной прочностью величина возникающих в ней напряжений может быть значительно снижена при условии нанесения большего количества слоев огнеупорного покрытия.

Библиографический список использованной литературы

1. Контроль якості продукції в машинобудуванні / Г.Є. Федоров, М.М. Ямшинський, А.М. Фесенко, М.А. Фесенко. — Краматорськ: ДДМА, 2008. — 332 с.
2. Дорошенко С.П. Взаимодействие песчаной формы с отливкой / С.П. Дорошенко. — К.: УМК ВО, 1991. — 76 с.
3. Литьё по выплавляемым моделям / Под ред. Шкленника Я.И., Озерова В.А. — М.: Машиностроение, 1984. — 408 с.
4. Жуковский С.С. Прочность литейной формы / С.С. Жуковский. — М.: Машиностроение, 1989. — 288 с.

5. Формовочные материалы и смеси / С.П. Дорошенко, В.П. Авдокушин, К. Русин, И. Мацашек. — К.: Высшая школа, 1990; Прага: СНТЛ – Издательство технической литературы, 1990. — 415 с.
6. Лакеев А.С. Формообразование в точном литье / А.С. Лакеев. — К.: Наукова думка, 1986. — 256 с.
7. Суслов А.Е. Некоторые аспекты технологии ЛВМ / А.Е. Суслов // Литейное производство. — 2001. — № 11. — С. 24–25.
8. Ливарна гідравліка: навч. посібник / В.М. Дробязко, А.М. Фесенко, Р.В. Лютий, М.А. Фесенко. — Краматорськ: ДДМА, 2010. — 108 с.
9. Вопросы теории литейных процессов / П.Н. Аксенов [и др.]. — М.: Машгиз, 1960. — 696 с.
10. Ицкович Г.М. Сопrotивление материалов / Г.М. Ицкович. — М.: Высш. школа, 2001. — 368 с.

Поступила в редакцию 11.03.2014 г.

Лютий Р.В., Кочешков А.С., Гурія І.М., Кеуш Д.В. Розрахунок статичної і динамічної міцності тонкостінних ливарних форм при заливанні рідким металом

Стаття присвячена вивченню і розрахунку параметрів силової взаємодії тонкостінних ливарних форм з рідким металом, яким вони заповнюються. Виникнення напружень в оболонкових і особливо в керамічних формах часто призводить до їх руйнування і, як наслідок, до браку литва. Обґрунтована необхідність теоретичного розрахунку мінімального рівня механічної міцності форм при вигині. Дані розрахунки проведені для динамічних умов (контакт форми з рідким металом, що рухається) і для статичних умов (заповнена металом форма). Для форм різної товщини встановлені умови міцності при вигині та надані рекомендації з організації її контролю.

Ключові слова: вигинальний момент, виливок, динамічне навантаження, керамічна форма, напруження, метал, міцність, статичне навантаження.

Lyuty R.V., Kocheshkov A.S., Guriya I.M., Keush D.V. Calculation of static and dynamic strength of thin-walled molds by pouring liquid metal

The article is devoted to the study and calculation of the parameters of power interaction of thin-walled molds with the liquid metal that is poured in them. The occurrence of tensions in the shell and especially in ceramic molds often leads to their destruction and, as a consequence, the scrap of casting. The necessity of a theoretical calculation of the minimum level of the mechanical strength of molds in bending is substantiated. These calculations are performed for dynamic conditions (interaction molds with moving liquid metal) and static conditions (filled metal mold). The conditions of the strength in bending and recommendations on the organization of its control are given for the molds of different thickness.

Keywords: bending moment, casting, ceramic mold, dynamic load, metal, static load, strength, tension.