

Разработанные связующие имеют высокую термостойкость и низкую физико-химическую активность к железоуглеродистым расплавам. Это позволяет использовать их для производства отливок из углеродистой, легированной стали и чугуна, что подтверждено экспериментально. Отливки, полученные с использованием стержней из разработанных смесей, не имеют пригара и других поверхностных дефектов.

### Список літератури

1. *Судакас Л.Г.* Фосфатные вяжущие системы. – СПб: РИА «Квинтет», 2008. – 260с.
2. *Копейкин В.А., Клементьева В.С., Красный Б.Л.* Огнеупорные растворы на фосфатных связующих. – М.: Металлургия, 1986. – 102 с.
3. Патент Украины №99789. МПК В22С9/12. Спосіб зміцнення ливарних стрижнів / *Р.В. Лютый, Д.В. Кеуш, Е.А. Анисимова*, опубл. 25.06.2015.

УДК 621

**В. Ф. Мазорчук, Р. В. Усенко, И. Ю. Наумова, С. И. Репях**

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

### НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЕ ОТЛИВКИ И ПОЛОГО КЕРАМИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ

Для определения факторов, влияющих на величину напряжений в отливке и стержне (вставке), провели расчёты напряжений в полой цилиндрической отливке и её неподатливом полом стержне бесконечной длины, охлаждённых до комнатной температуры. Схема поперечного сечения такой отливки со стержнем, принятая для расчётов, представлена на рисунке 1.

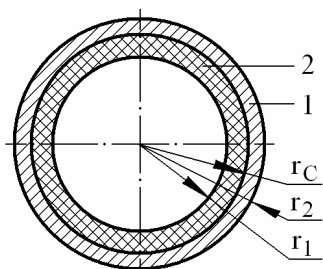


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения цилиндрической отливки с полым стержнем:

1 – отливка;  
2 – стержень

Из анализа схемы на рисунке 1 следует, что, по сути, в охлаждённом состоянии рассматриваемая система «отливка–стержень» – это составной цилиндр, полученный в результате горячей посадки отливки на стержень.

жень.

Для проведения теоретических исследований приняли, что:

- температура заливаемого в форму расплава и начальная температура формы и стержня – одинаковы;
- в процессе охлаждения отливки от температуры солидус сплава до температуры перехода материала отливки из пластичного в упругое состояние ( $t_{пу}$ ) в теле отливки напряжения не возникают;
- силовое взаимодействие между отливкой и стержнем реализуется в интервале температур от  $t_{пу}$  до температуры воздуха окружающей среды  $t_{oc}$ ;
- во всём интервале температур в период охлаждения температуры отливки и стержня одинаковы.

Исходя из этого, коэффициент линейной усадки сплава отливки от температуры  $t_{пу}$  до температуры  $t_{oc}$  рассчитывали по формуле:

$$\alpha_0 = k_0 \cdot (t_{пу} - t_{oc}) = k_0 \cdot \Delta t_{пс},$$

где  $k_0$  – средневзвешенный КТЛР материала отливки в интервале температур от  $t_{oc}$  до  $t_{пу}$ , а коэффициент линейной усадки материала стержня от температуры  $t_{пу}$  до  $t_{oc}$  температуры рассчитывали по формуле:

$$\alpha_k = k_k \cdot (t_{пу} - t_{oc}) = k_k \cdot \Delta t_{пс},$$

где  $k_k$  – средневзвешенный КТЛР материала стержня в интервале температур от  $t_{oc}$  до  $t_{пу}$ .

В этом случае, по достижении рассматриваемой системой температуры воздуха окружающей среды, величина натяга внешнего цилиндра (отливки) на стержень составляет:

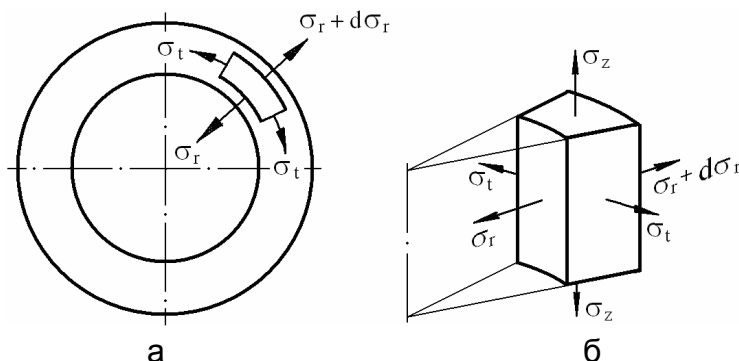
$$\Delta = (\alpha_0 - \alpha_k) \cdot r_c = \Delta t_{пс} \cdot (k_0 - k_k) \cdot r_c, \quad (1)$$

С точки зрения теории сопротивления материалов, полый цилиндр считается толстостенным, если толщина его стенки превышает одну десятую его среднего радиуса. Приняв, что рассматриваемая отливка с этой точки зрения является толстостенной, рассматриваемая задача сводится к задаче Ламе о толстостенной трубе, находящейся под действием внутреннего и внешнего равномерных давлений и относится к случаю плоской деформации (нагрузка не меняется вдоль оси цилиндра, а деформации происходят только в плоскости поперечного сечения цилиндра). То есть, для осесимметричной задачи смещение материала осуществляется только в радиальном направлении (перемещение  $u$ ).

Если из тела цилиндра выделить элемент в форме криволинейного шестигранника (см. рисунок 2), то на его гранях будут следующие напряжения:  $\sigma_t$  – окруж-

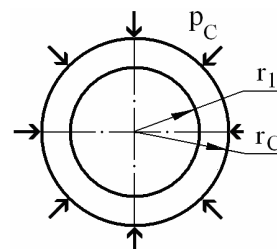
ные (тангенциальные);  $\sigma_r$  – радиальные;  $\sigma_z$  – осевые, возникающие при осевой нагрузке и являющиеся неизменяемыми по оси и радиусу цилиндра.

Рисунок 2 – Схема вырезки криволинейного шестигранника из тела цилиндра (а) и его общий вид (б)



Натяг в составном цилиндре в результате появления давления  $p_c$  по контактной поверхности стержня и внешнего цилиндра (отливки) вызывает напряжения, что схематично представлено на рисунке 3. То есть, давление  $p_c$  в рассматриваемой системе взаимодействия тел возникает из-за наличия натяга  $\Delta$ .

Рисунок 3 – Схема направления (указано стрелками) действия давления  $p_c$  на стержень



С целью определения величины давления  $p_c$  мысленно отделим стержень от внешнего цилиндра (отливки) и их взаимное действие заменим данным давлением. В этом случае, получаем давление  $p_c$ , сжимающее стержень по внешнему радиусу  $r_c$  (см. рисунок 3).

Согласно формулы для расчёта напряжения и перемещения в стержне для  $r_1 \leq r \leq r_c$  выражения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_{r2} = -\frac{r_c^2}{r_c^2 - r_1^2} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right) \cdot p_c, \\ \sigma_{t2} = -\frac{r_c^2}{r_c^2 - r_1^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right) \cdot p_c, \\ u_2 = -\frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{r_c^2 \cdot p_c}{r_c^2 - r_1^2} \cdot r - \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{r_c^2 \cdot r_1^2 \cdot p_c}{r_c^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r}. \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона материала стержня;  $E_2$  – модуль упругости (модуль Юнга) материала стержня.

Для внешнего цилиндра (отливки) это давление ( $p_c$ ) является растягивающим по внутреннему радиусу  $r_c$ . Согласно формулы для расчёта напряжения и перемещения во внешнем цилиндре (отливке) для  $r_c \leq r \leq r_2$  выражения имеют вид:

$$\begin{cases} \sigma_{r1} = \frac{r_C^2}{r_2^2 - r_C^2} \cdot \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2}\right) \cdot p_C, \\ \sigma_{t1} = \frac{r_C^2}{r_2^2 - r_C^2} \cdot \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right) \cdot p_C, \\ u_1 = \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{r_C^2 \cdot p_C}{r_2^2 - r_C^2} \cdot r + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{r_C^2 \cdot r_2^2 \cdot p_C}{r_2^2 - r_C^2} \cdot \frac{1}{r}. \end{cases} \quad (3)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона материала внешнего цилиндра (отливки);  $E_1$  – модуль упругости (модуль Юнга) материала внешнего цилиндра (отливки).

Во время охлаждения внешний радиус стержня  $r_C$  уменьшится и точки на его поверхности получат отрицательное смещение  $u_2(r_C)$ . Внутренний радиус отливки при этом увеличится и точки на этой поверхности получат положительное смещение  $u_1(r_C)$ . В этом случае:

$$u_1(r_C) - u_2(r_C) = \Delta, \quad (4)$$

Подставляя в (4) выражения  $u_1(r_C)$  и  $u_2(r_C)$  согласно формулам (2) и (3), получаем:

$$\Delta = u_1(r_C) - u_2(r_C) = \left[ \frac{r_C}{E_1} \cdot \left( \frac{r_2^2 + r_C^2}{r_2^2 - r_C^2} + \mu_1 \right) + \frac{r_C}{E_2} \cdot \left( \frac{r_C^2 + r_1^2}{r_C^2 - r_1^2} - \mu_2 \right) \right] \cdot p_C,$$

Отсюда находим выражение контактного давления:

$$p_C = \frac{\Delta}{\frac{r_C}{E_1} \cdot \left( \frac{r_2^2 + r_C^2}{r_2^2 - r_C^2} + \mu_1 \right) + \frac{r_C}{E_2} \cdot \left( \frac{r_C^2 + r_1^2}{r_C^2 - r_1^2} - \mu_2 \right)},$$

или с учётом (1):

$$p_C = \frac{\Delta t_{ПС} \cdot (k_0 - k_K) \cdot r_C}{\frac{r_C}{E_1} \cdot \left( \frac{r_2^2 + r_C^2}{r_2^2 - r_C^2} + \mu_1 \right) + \frac{r_C}{E_2} \cdot \left( \frac{r_C^2 + r_1^2}{r_C^2 - r_1^2} - \mu_2 \right)},$$

или:

$$p_C = \frac{(t_{ПВ} - t_{ОС}) \cdot (k_0 - k_K) \cdot r_C}{\frac{r_C}{E_1} \cdot \left( \frac{r_2^2 + r_C^2}{r_2^2 - r_C^2} + \mu_1 \right) + \frac{r_C}{E_2} \cdot \left( \frac{r_C^2 + r_1^2}{r_C^2 - r_1^2} - \mu_2 \right)}. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива только в случае, когда в каждой из сопрягаемых деталей напряжения не превосходят величину предела пропорциональности их материалов. В случае появления пластических деформаций хотя бы в материале одной из сопрягаемых деталей рассматриваемой системы контактное давление  $p_C$  будет иметь меньшую величину, которую можно рассчитать, используя, например, методы теории пластичности.

Для определения факторов, оказывающих наиболее значимое влияние на величину напряжений в стенке отливки и её стержня, используя приведенные выше аналитические выражения, провели расчёт напряжений, сформировавшихся в данных элементах рассматриваемой системы к моменту достижения ею температуры  $t_{ОС} = 20$

<sup>0</sup>С. Теоретические исследования проводили для отливки бесконечной длины с внешним радиусом  $r_2 = 35$  мм, внутренним радиусом  $r_c = 30$  мм и для стержня с внешним радиусом  $r_c = 30$  мм, внутренним радиусом  $r_1 = 25$  мм. В качестве материала отливки были приняты бронза и конструкционная нелегированная сталь. Величины коэффициентов Пуассона ( $\mu$ ) и модуля Юнга ( $E$ ), принятые для данных материалов при расчётах, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта напряжений

Параметры	Вариант					
	1	2	3	4	5	6
	<i>Материал отливки</i>					
	бронза			сталь		
$\mu_1$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$E_1$ , МПа	105000	105000	210000	210000	210000	210000
$k_1$ , град <sup>-1</sup>	0,000004	0,000004	0,000018	0,000018	0,000014	0,000014
$T_{\text{ПУ}}$ , <sup>0</sup> С	450	450	450	450	650	650
	<i>Материал стержня</i>					
$\mu_2$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$E_2$ , МПа	36000	72000	36000	72000	36000	72000
$k_2$ , град <sup>-1</sup>	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004

Результаты проведенных расчётов представлены в виде зависимостей на рисунке 4, где сплошные линии – тангенциальные напряжения, пунктирные линии – радиальные напряжения.

Из анализа полученных зависимостей следует, что уровень растягивающих напряжений в охладившейся отливке повышается с увеличением: модуля упругости материала стержня; температуры перехода материала охлаждающейся в форме отливки из пластичного в упругое состояние; КТЛР материала отливки и стержня.

Наиболее высокие напряжения сжатия создаются на внутренней поверхности стенки стержня и напряжения растяжения на внутренней поверхности стенки отливки.

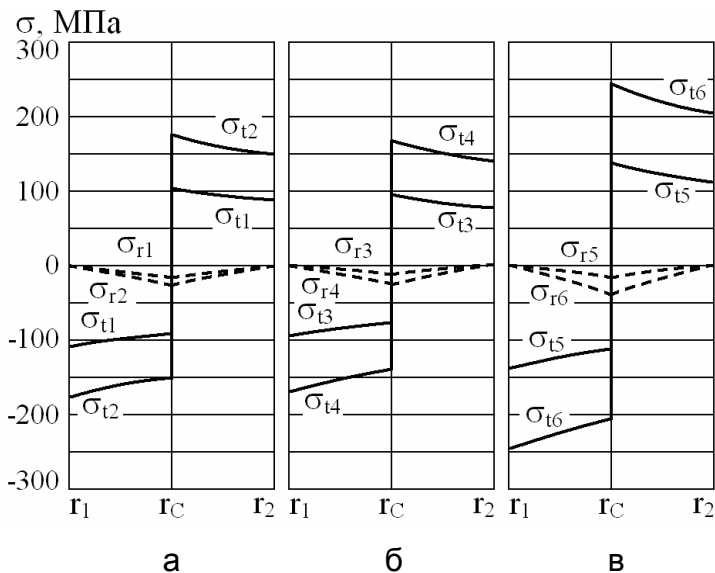


Рисунок 4 – Распределение напряжений в стенке стержня, бронзовой (а), стальной при  $t_{пу} = 450$  °С (б) и стальной при  $t_{пу} = 650$  °С (в) отливках (индексы в обозначениях кривых соответствуют номеру варианта в таблице 7.5)

При этом, на внутренней поверхности стенки стержня реализуется линейное напряженное состояние, поскольку здесь возникает наибольшее в стержне сжимающее тангенциальное напряжение, а радиальное напряжение в этой точке равно нулю. То есть, во избежание разрушения стержня, на её внутренней поверхности необходимо обеспечить выполнение условия прочности для хрупких материалов при сжатии:

$$|\sigma_{t2}(r_1)| \leq [\sigma_c],$$

где  $[\sigma_c]$  – допустимое напряжение на сжатие.

На внутренней поверхности стенки отливки реализуется плоское напряженное состояние. Поэтому здесь возникает наибольшее растягивающее тангенциальное напряжение  $\sigma_{t1}(r_c)$  и наибольшее сжимающее радиальное напряжение  $\sigma_{r1}(r_c)$ . Исходя из этого, для сохранения целостности материала отливки, на её внутренней поверхности необходимо создать условия, при которых выполняется третье условие прочности (для пластичных материалов), а именно:

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{III}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma],$$

где  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{III}}$  – эквивалентное напряжение по третьей теории прочности сопротивления материалов,  $[\sigma]$  – допустимое напряжение растяжения для пластичных материалов.

Анализ установленных закономерностей и приведенных выше формул показывает, что:

- к моменту окончания охлаждения материал отливки испытывает растягивающие напряжения, а материал стержня – сжимающие;
- наибольшие значения растягивающих напряжений в отливке и сжимающих напряжений в полем стержне – на их внутренних стенках;

- на величину напряжений в материалах рассматриваемой системы наибольшее значение оказывает температура перехода материала отливки из пластичного в упругое состояние, модуль упругости материала отливки и коэффициент термического линейного расширения материала отливки и стержня. При этом, напряжения в стенке отливки тем больше, чем выше уровень указанных параметров;
- увеличение модуля упругости материала стержня вдвое незначительно повлияло на абсолютные значения напряжений, как в отливке, так и стержне.

УДК 669.245:536.421.4

**И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, А. М. Верховлюк**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

(044)424-0450, [kvasnytska@ptima.kiev.ua](mailto:kvasnytska@ptima.kiev.ua)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К КОРРОЗИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗО-СОЛЕВОМ ПОТОКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Известно, что жаропрочные сплавы на основе железа, никеля, кобальта, в результате образования на их поверхности плотной защитной окалины, обладают повышенной стойкостью к высокотемпературной коррозии. Однако и в этом случае для надежной работы тонкостенных охлаждаемых деталей ГТД при длительном ресурсе применяют защитные покрытия. При определенных условиях на деталях турбины, вследствие совместного действия примесей, попадающих из топлива и атмосферы, в том числе, серы и солей морской воды, образуются осадения в твердом или жидком состоянии. Явление ускоренного окисления под действием осадений примесей называется высокотемпературной коррозией (ВТК).

В данной работе представлены результаты анализа стойкости к высокотемпературной коррозии разработанного сплава типа ХН57КВЮТМБРЛ для рабочих лопаток турбин в сравнении с используемыми в настоящее время в отрасли марочными сплавами СМ88У и сплавом для защитного покрытия лопаток СДП-ЗА. Последний был выбран как эталонный образец, обладающий высокой стойкостью к рассматриваемому виду коррозии.

Оценку коррозионной стойкости материалов проводили после испытаний на газодинамическом стенде в продуктах сгорания дизельного топлива и солей морской воды. Этот способ ускоренных испытаний выбран как наиболее полно моделирую-