

Формула (18) в точности совпадает с разложением в ряд по полиномам Чебышева—Лагерра функции $a \sin \omega x$, которая представляет собой известное решение задачи (11)–(12). Значение функции может быть определено с достаточной точностью при удержании двух членов этого ряда (речь идет фактически о восьмичленной частной сумме ряда (18), содержащей $L_0(\omega x), L_1(\omega x), \dots, L_7(\omega x)$). Поэтому, ограничиваясь этими членами для нахождения корней уравнения $y(1) = 0$, получим для ω семь значений, отличающихся от точных в среднем на 4%. При подстановке $x = 1$ и $\omega = \pi$ в (11) абсолютная погрешность результатов, получаемых по итоговой восьмичленной формуле, составляет 0,02. Для сравнения погрешность при семичленном разложении $\sin \omega$ в ряд Тейлора равна 0,077.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г а л а з ю к В.А., Г о р е ч к о А.Н. Об одном методе решения динамических задач теории упругости в сферических и цилиндрических координатах // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1980. – № 6. – С. 41–44.
2. Г а л а з ю к В.А. Метод полиномов Чебышева—Лагерра в смешанной задаче для нелинейного дифференциального уравнения 11-го порядка с постоянными коэффициентами // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1981. – № 1. – С. 3–6.
3. Г а л а з ю к В.А., Г о р н я к Г.О. Исследования нестационарного температурного поля в бесконечном шаре с кольцевой линией раздела краевых условий методом полиномов Чебышева—Лагерра // Вестн. Львовского ун-та. – Задачи прикладной математики и механики. – 1985. – Вып. 23. – С. 72–77.
4. Т и х о н о в А.Н., С а м а р с к и й А.А. Уравнения математической физики. – М., 1977. – 736 с.
5. Л е б е д е в Н.Н. Специальные функции и их приложения. – М.; Л., 1963. – 360 с.

УДК 621.791:075

Н.Н. БУТКЕВИЧ, канд. техн. наук (БПИ),
И.В. БУТКЕВИЧ (ММЗ)

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ДЕТАЛЯХ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

Детали, работающие в переменных температурных полях, находятся в очень неблагоприятных условиях и часто выходят из строя вследствие смятия или растрескивания в зоне концентрации напряжений. В некоторых случаях при наличии большого числа теплосмен за время работы детали температурные напряжения значительно превышают механические. Например, для таких деталей, как крышка цилиндра, клапан двигателя внутреннего сгорания (ДВС), максимальные значения температурных напряжений более чем на порядок выше механических. Это позволяет в целях упрощения анализа ограничиться рассмотрением только температурных напряжений с учетом эффектов от нестационарности режимов эксплуатации.

Исследования температурных напряжений в клапане ДВС показали, что окружные составляющие этих напряжений σ_θ могут превышать предел прочности материала [1]. С целью снижения температурных напряжений для изготовления клапанов используют биметаллы со специально подобранными коэф-

фициентами теплового расширения. Значительный эффект снижения тепловых напряжений получается за счет выполнения сердцевинки клапана из материала, который плавится при определенной температуре [2].

Снижению температурных напряжений способствует выбор рациональной геометрической формы детали. Такие задачи весьма эффективно решаются с применением поляризационно-оптического метода. Метод особенно результативен при определении влияния на напряженно-деформированное состояние деталей таких факторов, как температурные циклы, учет которых расчетными методами затруднителен.

Вопросы формирования и накопления температурных напряжений изучались на моделях клапанов ДВС, изготовленных из оптически чувствительного материала ЭД-20М состава № 2 [3]. Были изготовлены три варианта моделей с разными радиусами закругления R в области перехода от стержня клапана к посадочному поясу. Термоциклирование осуществлялось вертикальным погружением клапанов со стороны тарелки попеременно в масло ($t = 100^\circ\text{C}$) и в воду ($t = 15^\circ\text{C}$), что соответствовало обдуванию клапана горячим и холодным потоками газов в рабочих условиях. Максимальное число циклов $N = 1000$. Программа эксперимента представлена в табл. 1.

После термоциклирования из моделей вырезались темплеты для просмотра и изучения зафиксированной картины полос в поляризованном свете. Согласно [4], при температурном воздействии в эпоксидном компаунде возникают "замороженные" и "незамороженные" деформации. При разрезании образца "незамороженные" деформации снимаются. Оставшиеся "замороженные" деформации соответствуют температурным напряжениям, появившимся в процессе теплового воздействия на модель. Зафиксированные в моделях картины полос и изоклин, необходимые для расчета напряжений, снимались со срезов в вертикальном центральном сечении и в горизонтальном сечении тарелки в области посадочного пояса после 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 900 и 1000 циклов.

Подобие температурных полей в модели и натуре определялось отношением $(t - t_0)_M / (t - t_0)_N = 0,17$, где t — максимальная температура цикла; t_0 — минимальная. Индексы "м" и "н" относятся к модели и к натуре соответственно.

Таблица 1

Номер модели	R , мм	Расстояние от центра по радиусу тарелки до точки измерения температуры	Число термоциклов
1	10	0 0,25R	100
2	20	0,5R	200
3	30	0,75R R	500

Принимая время одного цикла (нагрев—охлаждение) для натуре 1/25 с, можно рассчитать время полного цикла для модели, пользуясь критерием Фурье:

$$\frac{K_a K_\tau}{K_l^2} = 1, K_a = \frac{a_n}{a_m}, K_\tau = \frac{\tau_n}{\tau_m}, K_l = \frac{l_n}{l_m}.$$

Здесь $a_n, a_m, \tau_n, \tau_m, l_n, l_m$ — соответственно коэффициенты температуропроводности, время одного цикла и размеры натуре и модели. По данным работы [2], критерий подобия по температуропроводности равен 200. Геометрическое подобие натуре и модели осуществлялось в отношении 2/1.

На рис. 1 представлена типичная для всех вариантов термоциклирования картина полос в горизонтальном сечении тарелки и в осевом вертикальном сечении клапана.

Температурное поле в процессе эксперимента регистрировалось с помощью медно-константановых термопар, впаянных в четырех точках контрольных образцов вдоль радиуса тарелки по сечению I—I. По данным регистрации температур после указанного числа циклов согласно температур-

ной зависимости определялась оптическая постоянная материала [2]. Предварительный расчет термонапряженного состояния модели показал, что разность максимального и минимального значений напряжений, соответствующих различным значениям оптической постоянной, не превышает 4...5%. Поэтому определялось среднее значение оптической постоянной при температурном градиенте, установившемся после данного числа температурных циклов. Расчет температурных напряжений производился в соответствии с основным законом фотоупругости:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_0^{(1,0)}(t)}{d_b} m_b, \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \frac{\sigma_0^{(1,0)}(t)}{d_r} m_r,$$

где m_b, m_r — порядок полос в вертикальном и горизонтальном сечениях; d_b, d_r — толщина этих сечений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — квазиглавные напряжения в соответствующих сечениях; $\sigma_0^{(1,0)}(t)$ — оптическая постоянная материала при температуре t .

В начале теплового воздействия, когда число циклов невелико, большую часть сечения занимает изотропная область ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). С увеличением чис-

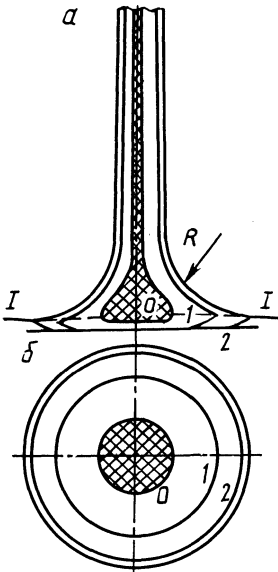


Рис. 1. Картина полос, характеризующих распределение максимальных касательных напряжений в клапане ДВС:

a — в вертикальном осевом сечении клапана; *б* — в горизонтальном сечении в области посадочного пояса (0, 1, 2 — порядок полосы)

Рис. 2. Зависимость максимальных касательных напряжений τ_{\max} на ободе тарелки в области посадочного пояса от числа температурных циклов:

● — модель № 1; ▲ — модель № 2;
■ — модель № 3

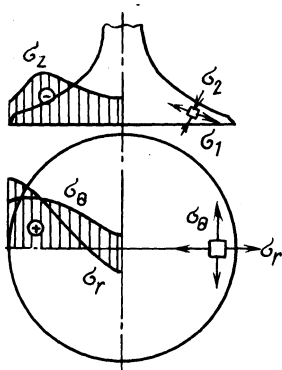
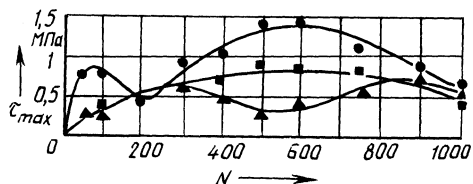


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений σ_θ , σ_r и σ_z вдоль радиуса тарелки клапана в области посадочного пояса (модель № 2) после 200 температурных циклов

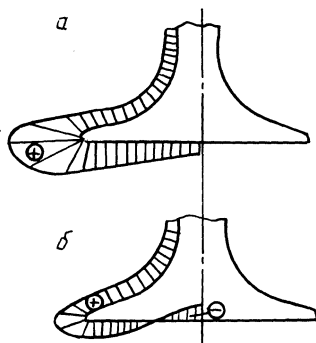


Рис. 4. Распределение напряжений σ_θ по контуру вертикального осевого сечения клапана (модель № 2): а — после 500 циклов; б — после 1000 циклов

ла температурных циклов эта область уменьшается и стягивается в сингулярную точку, характерную для температурных напряжений. Полоса максимального порядка, соответствующая контурным напряжениям σ_θ , σ_z , находится на ободе тарелки в области посадочного пояса. В этой области τ_{\max} изменяется с ростом числа температурных циклов в соответствии с зависимостями, представленными на рис. 2. Максимальные касательные, а следовательно, и главные напряжения, действующие по обою тарелки, изменяются циклически, причем расположение максимумов этих напряжений зависит от геометрии клапана. На формирование термонапряженного состояния в каждом последующем цикле влияют напряжения предыдущего цикла, причем относительный порядок полос, приходящийся на один цикл τ_{\max} , по мере увеличения числа температурных циклов уменьшается. По данным работы [2], этот факт находится в соответствии с картиной изменения деформации стальных деталей при термоциклировании.

На рис. 3 приведены эпюры нормальных напряжений σ_θ , σ_r и σ_z в наиболее напряженном сечении тарелки после 200 температурных циклов. При любой геометрии модели максимальные нормальные напряжения σ_θ и σ_r с увеличением числа температурных циклов "перемещаются" к центральной оси симметрии с замедлением.

Результаты расчетов напряжений показали, что во всех случаях радиальные и окружные напряжения — растягивающие, осевые — сжимающие. При достаточно большом числе температурных циклов (500 и более) контурные на-

пряжения меняют знак примерно в центральной части основания тарелки клапана (рис. 4).

Таким образом, причины выхода из строя клапанов ДВС могут быть две: концентрация касательных напряжений, вызывающих смятие тарелки в зоне посадочного пояса, и концентрация окружных напряжений, вызывающих появление трещин, причем не обязательно на поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щурков В.Е., Ермолов П.С., Ивашенко Н.А. Влияние теплофизических свойств материалов выпускных клапанов на их теплонапряжения // Двигателестроение. – 1983. – № 8. – С. 13–14.
2. Буткевич Н.Н. Исследование напряженного состояния кованых штампов с неоднородным термическим упрочнением: Дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 1972. – 164 с.
3. Буткевич Н.Н. Формирование остаточных напряжений при изготовлении моделей из материала ЭД-20М // Теоретическая и прикладная механика. – Минск, 1981. – Вып. 8. – С. 70–71.
4. Кардаш С.Т., Чемоход Е.В. Исследование термоупругих напряжений путем замораживания с осуществлением заданного перепада температур // Исследование температурных напряжений. – М., 1972. – С. 28–31.
5. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М., 1971. – С. 455–460.

УДК 539.376

А.Х. КИМ, д-р техн. наук,
Г.С. СОКОЛОВСКИЙ (БПИ),
Р.В. СТЕФАНОВИЧ, канд. техн. наук
(БР НПО ПМ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ БИМЕТАЛЛА МЗ-АД1.0 ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Роль новых материалов в технике постоянно возрастает, что вызвано их значительными преимуществами перед традиционными материалами. Широкие перспективы применения в технике имеют биметаллы. Однако они еще далеко не полностью исследованы, в частности нет сведений по такой важнейшей характеристике поведения биметалла в нагруженном состоянии, как ползучесть.

Были проведены экспериментальные исследования ползучести биметалла медь–алюминий марки МЗ-АД1.0 при одноосном напряженно-деформированном состоянии на разработанной авторами экспериментальной установке рычажного типа. Плоские образцы вырезались из биметаллической пластины, которая до этого не подвергалась специальной обработке.

Закрепленный в установке и помещенный в нагревательную печь образец предварительно нагревался без нагрузки в течение 5 ч при постоянной температуре [1]. Затем производилось плавное нагружение образца постоянной растягивающей силой. Длительность испытаний составляла 80 ч. Измерение деформации ползучести осуществлялось с помощью измерительного узла, основой которого являются индикаторные головки, с точностью 0,001 мм.

Была получена кривая ползучести биметалла, ординаты точек которой определялись как среднее арифметическое результатов экспериментов при одинаковых и тех же уровнях температуры и напряжений. По среднему квадратическому