

УДК 539.3

**В.Н. ПАВЛЕНКО, В.Н. САПРЫКИН***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Украина***ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ  
КОМБИНИРОВАННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХ  
СОБОЙ ПОЛЫЕ ТОЛСТОСТЕННЫЕ ЦИЛИНДРЫ**

Рассмотрены существующие методы упрочнения машин и агрегатов, определена необходимость изучения методов комбинированного упрочнения деталей машин, представляющих собой толстостенные цилиндры. Указан подход к созданию единой математической модели по определению напряженно деформированное состояние в системе толстостенный цилиндр-покрытие в процессе нагружения этой системы.

**толстостенный цилиндр, покрытие, автофретирование, напряженно-деформированное состояние, упругопластическое деформирование**

**Введение**

Упрочнение ответственных деталей машин и агрегатов, работающих при высоких импульсных давлениях и температурах, является одной из актуальных задач технологии машиностроения, поскольку это рациональный путь повышения эксплуатационных характеристик машин и экономии материальных ресурсов на их изготовление за счет уменьшения металлоемкости конструкции.

Одним из ответственных конструктивных элементов технологических машин и артиллерийских комплексов является толстостенный цилиндр, который подвергается в процессе эксплуатации высоким статическим или динамическим нагрузкам, основными из которых являются давление и температура. Поэтому вопрос о повышении эксплуатационных характеристик данного конструктивного элемента всегда остается актуальным.

В настоящее время существуют следующие основные методы упрочнения внутренней поверхности толстостенных цилиндров:

- термоупрочняющая обработка;
- химико-термическая обработка [1];
- нанесение упрочняющих покрытий [2];
- поверхностное пластическое деформирование;
- упругопластическое деформирование внутрен-

ним давлением – автофретирование или автоскрепление [3, 4];

- комбинированное упрочнение.

Основными характеристиками методов упрочнения поверхности изделия являются: величина микротвердости, величина остаточных напряжений, глубина напряженного и упрочненного слоя. Так, при термоупрочняющей обработке можно упрочнить поверхность детали на глубину до 5 мм, при химико-термической обработке – до 1,5 мм, при нанесении упрочняющих покрытий толщина упрочняющего слоя равна толщине наносимого покрытия, при поверхностном пластическом деформировании можно достичь толщины упрочнения внутренней поверхности до 20 мм, при автофретировании можно упрочнить материал изделия на необходимую глубину.

Первые пять методов упрочнения изучены достаточно хорошо и описаны как в отечественных, так и зарубежных литературных источниках, а конкретные данные о применении комбинированного упрочнения, т.е. автофретировании совместно с нанесением упрочняющих покрытий и наоборот, или химико-термической обработке и нанесении покрытий пока еще отсутствуют или носят разрозненный характер. В связи с этим проведение теоретических

и экспериментальных исследований по изучению методов комбинированного упрочнения и оценки влияния различных технологических процессов и факторов на величину упрочнения внутренней поверхности толстостенных цилиндров представляет собой научный и практический интерес.

**Целью данной работы** является описание подходов к постановке задачи о комбинированном упрочнении внутренней поверхности полых толстостенных цилиндров методом упругопластического деформирования (автофретирования) и методом нанесения упрочняющих покрытий.

### Решение проблемы

Объектом исследования является полый толстостенный цилиндр, который применяется в качестве комплектующих для насосов высокого давления, стволов артиллерийских систем и др.

Предметом исследования являются процессы комбинированного упрочнения внутренней поверхности толстостенного цилиндра.

В качестве комбинированного упрочнения внутренней поверхности толстостенного цилиндра моделируем последовательное упрочнение методом автофретирования, а затем нанесения на уже упрочненную поверхность дополнительного упрочняющего покрытия.

В зависимости от способа автофретирования, который можно осуществить или с помощью гидравлического давления, или дорнирования, или взрывом (сгоранием) заряда с большим давлением записываются условия нагружения (граничные условия) на внутренней поверхности цилиндра.

Так, в случае упругопластического деформирования внутренним давлением на внутреннюю поверхность действует постоянное во времени гидравлическое давление, при сгорании заряда по внутренней полости цилиндра на внутреннюю поверхность цилиндра действует совместное нестационарное поле температур и высоких давлений, причем давления, превосходящие предел упругого сопро-

тивления материала цилиндра. Это приводит к возникновению нестационарного напряженно-деформированного состояния (НДС) в цилиндре.

Теоретический анализ автофретирования полого толстостенного цилиндра сводится к решению упругопластической задачи нагружения и разгрузки цилиндра. Рассмотрим постановку задачи автофретирования толстостенного цилиндра (рис. 1).

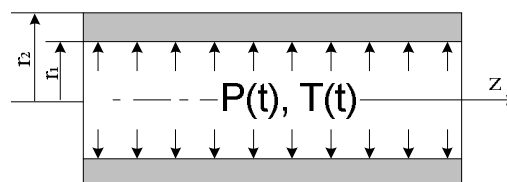


Рис. 1. Схема упрочнения методом автофретирования

Совместное действие нестационарного поля температур и давлений, образовавшихся после сгорания заряда, в канале цилиндра вызывает в качестве реакции нестационарное НДС стенок цилиндра. Так как форма, нагрузки и поле температур осесимметричны, то и НДС будет обладать симметрией относительно оси  $z$ . Поскольку в теле цилиндра в процессе автофретирования появятся остаточные деформации на внутренней поверхности цилиндра, а наружная поверхность будет иметь упругие деформации, то применим упругопластическую модель деформирования.

Следует также отметить, что для достижения максимального эффекта от автофретирования необходимо, чтобы весь цилиндр переходил в пластическое состояние, но это может привести к накоплению значительных повреждений в материале цилиндра.

Рассмотрим подход к математическому моделированию комбинированного упрочнения толстостенных цилиндров в цилиндрической системе координат, когда имеет место симметрия относительно оси  $z$ , а компоненты перемещения в радиальном и осевом направлениях  $u, w$  не зависят от угла  $\varphi$ .

Как в упругой, так и в пластической областях толстостенного цилиндра имеют место условия равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – масса единицы объема.

Полное приращение составляющих деформаций  $d\varepsilon_{ij}$  складывается из приращений составляющих упругой деформации  $d\varepsilon_{ij}^e$  и пластической деформации  $d\varepsilon_{ij}^p$  [5]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p. \quad (2)$$

Компоненты упругих деформаций определяются по следующим зависимостям:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}; \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u}{r}; \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}; \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где  $u, w$  – перемещения в радиальном и осевом направлении, которые определяются по следующим формулам:

$$\Delta u - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{\rho}{G} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial(\alpha T)}{\partial r},$$

$$\Delta w + \frac{1}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{\rho}{G} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial(\alpha T)}{\partial z}.$$

$e = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z}$  – объемное расширение.

Пластическая деформация определяется по соотношению

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot s_{ij}, \quad (4)$$

где  $s_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon$  – девиатор напряжений.

После снятия давления в стенке цилиндра возникает предварительное НДС, которое необходимо учитывать как при нанесении упрочняющего покрытия, так и при дальнейшем исследовании НДС толстостенного комбинированно упрочненного цилиндра.

Теоретический анализ исследования предварительно упрочненного цилиндра с нанесенным упрочняющим покрытием на внутреннюю поверхность цилиндра сводится к решению упругой задачи нагружения с учетом начальных и граничных условий как на внутренней и наружной поверхности цилиндра, так и на границе покрытие и основной материал.

Решение задачи о комплексном исследовании НДС комбинированно упрочненного цилиндра может быть получено с помощью метода конечных элементов, являющегося численным методом решения системы дифференциальных уравнений, описывающих разнообразные физические явления и хорошо зарекомендовавшим себя в силу универсальности и практической реализации на ЭВМ.

## Заключение

Таким образом, изучение процессов комбинированного упрочнения ответственных узлов машин и агрегатов является актуальной задачей. Поэтому создание единой математической модели, описывающей напряженно-деформированное состояние полого толстостенного цилиндра в процессе эксплуатации, и последующая ее численная реализация с применением компьютерных технологий позволит смоделировать и исследовать различные виды комбинированного упрочнения.

## Литература

1. Александров А.Ю., Спиринов Р.В. Износ и эксплуатационные характеристики высоконагруженных деталей с различными видами защиты рабочего слоя материала // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №2. – С. 3 – 8.
2. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. – Х.: Изд-во АИНУ. – 2002. – 1030 с.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Теория автоскрепления цилиндров. – М.: Оборонгиз, 1940. – 286 с.
4. Lvov G., Lysenko S. Contact problem for the autofrettage of thick cylinders // Journal of Computational and Applied Mechanics. – 2002. – Vol. 3. – № 1. – P. 51 – 60.
5. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

Поступила в редакцию 1.06.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.