

Исследование и анализ механического состояния элементов конструкций и поведения материалов при нестационарном термомеханическом воздействии

Мелекесцев А.И., канд. техн. наук, Кривцов В.С., канд. техн. наук,  
Нарыжный А.Г., Корнилов Г.Л., канд. техн. наук,  
Сапрыкин В.Н., канд. техн. наук, Шехов А.В.

При исследовании НДС элементов конструкций необходимо учитывать особенности поведения материалов при нестационарном термомеханическом воздействии. Поэтому в отчетном году, как и в предыдущем, особое внимание было обращено на уточнение модели поведения материалов под импульсной нагрузкой.

Исходя из ранее проведенных исследований получены аппроксимирующие коэффициенты физического закона связи напряжений с деформационными параметрами, включая ускорение деформаций, уточнена модель поведения материала под импульсной нагрузкой в области упругих деформаций:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i + B_0 \dot{\varepsilon}_i^{m_0} + C_0 \ddot{\varepsilon}_i^{n_0} \quad (1)$$

Теоретически показано, что величина коэффициента Пуассона остается неизменной в ходе динамического нагружения и определяется только структурой материала.

Теоретически показано, что после динамического нагружения материала в пределах упругих деформаций и разгрузки изменяются механические характеристики материала. При динамическом нагружении связь напряжений с деформациями имеет нелинейный характер, а при разгрузке — линейный.

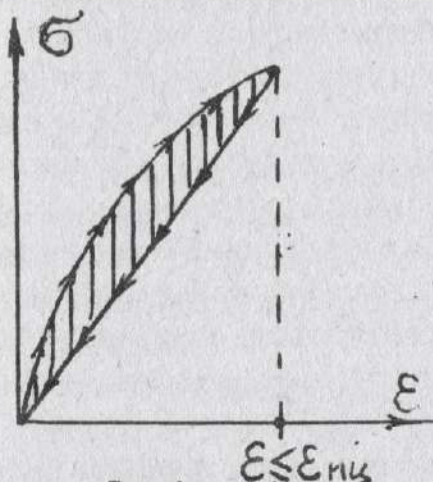


Рис. 1

Возникающая петля гистерезиса (рис. 1) характеризует происходящие микропластические деформации в объеме материала, что и приводит к упрочнению материала при деформировании в области результирующих упругих деформаций при динамическом нагружении.

В ходе теоретического анализа показан волновой характер НДС при импульсном нагружении. По деформируемому телу распространяется волна ускорений

перемещения частиц тела, соответствующая им волна ускорений деформации и волна напряжений.

Однако на переднем фронте волны ускорений деформации не возникает разрыва в перемещениях и, соответственно, в деформациях, что имеет место при расчетах НДС по классической волновой теории, учитывающей зависимость напряжений только от деформаций.

Разработанная модель поведения материала с учетом совпадения направляющих тензоров динамических напряжений и ускорений деформации, а также экспериментально полученного закона связи напряжений с деформационными параметрами легли в основу расчета НДС толстостенной цилиндрической оболочки под импульсным давлением по внутренней поверхности. Составлен алгоритм счета НДС и разработана программа, позволяющая проанализировать изменение НДС в любой точке деформируемой оболочки по времени при экспоненциальном законе изменения давления по внутренней поверхности (рис.2).

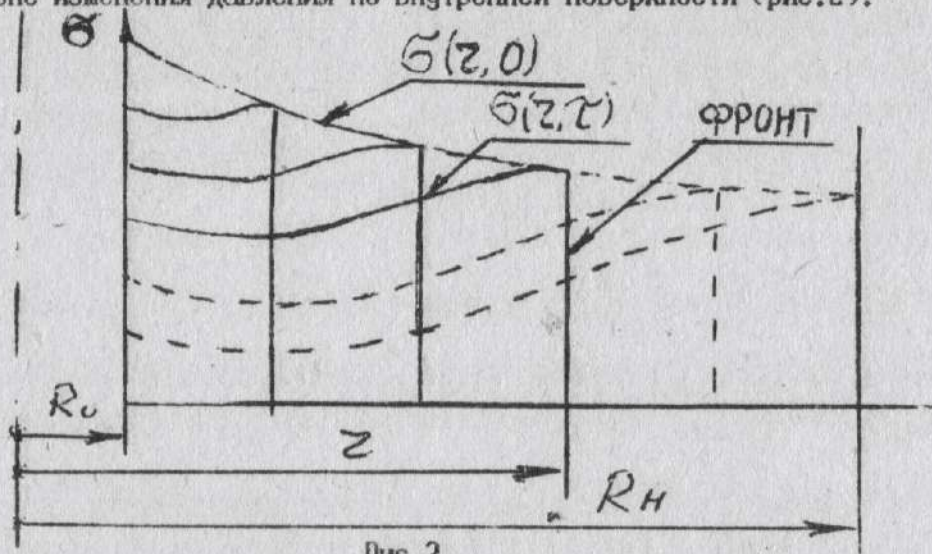


Рис.2

Кроме исследования физического закона формулируется и решается задача по определению напряженно-деформированного состояния конструкции технологической пушки, испытывающей действие интенсивных нагрузок импульсного типа, подобных силам, воспринимаемым лафетом артиллерийского орудия при выстреле. С учетом характера нагрузок типовая конструкция технологической пушки представляет собой самоуравновешенную пространственную раму со стволом, покоящуюся на плоском резино-металлическом амортизаторе, включающую 2-3 горизонтальные пластины, соединенные с 2-4 вертикальными колоннами посредством гаек, а также специальные демпферы, служащие для снижения сейсмического воздействия на фундаменты и технологическое оборудование, изменения амплитудно-частотных характеристик конструкции, поглощения и рассеяния избыточной энергии, обеспечения прочности, надежности, долговечности и экологичности.

При выстреле плиты испытывают динамическую реакцию отката со стороны ствола, а также сложное нагружение оснастки, передающей действие снаряда на рабочую среду и заготовку. Итогом выстрела является деформация заготовки и колебания конструкции.

Предложен расчетно-экспериментальный подход к исследованию и управлению колебаниями конструкции с целью обеспечения прочности, безопасности, долговечности и экологичности конструкции пушек. В рамках подхода разрабатываются три новых вопроса.

### 1. Расчетная модель и исследование динамического НДС конструкции в целом

Расчетная модель построена по методу конечных элементов. Основные конструктивные элементы, плиты и колонны, не должны претерпевать геометрических изменений, в связи с этим для них принята линейно-упругая модель поведения материала. Плиты работают как на изгиб и поперечный сдвиг, так и на растяжение в плоскости плиты. Плиты имеют сложную в плане форму с вырезами и отверстиями, переменную толщину и присоединенные массы. Колонны цилиндрической формы, работают на изгиб, поперечный сдвиг и растяжение. Для многослойного амортизатора использована модель многослойной плиты на Винклеровом основании. Демпферы моделируются вязко-упругими стержнями.

Расчетная модель построена в пространстве перемещений. Для плит использованы 4-х узловые конечные элементы (КЭ), для колонн и демпферов - 2-х узловые КЭ. Определяющая система уравнений имеет вид

$$[K]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [M]\{\ddot{\delta}\} = \{f\}, \quad (2)$$

где  $[K]$ ,  $[C]$ ,  $[M]$  - матрицы жесткости, демпфирования и масс ансамбля КЭ, соответственно;

$\{\delta\}$ ,  $\{\dot{\delta}\}$ ,  $\{\ddot{\delta}\}$  - векторы перемещений, скоростей, ускорений, ансамбля КЭ, соответственно;

$\{f\}$  - вектор внешних узловых сил ансамбля КЭ.

Дискретизация по времени уравнения (2) выполнена с использованием устойчивого метода Рунге-Кутты, при этом получается система уравнений вида

$$[K^*]\{\delta\} = \{F\}, \quad (3)$$

где  $[K^*]$  - модифицированная матрица жесткости;

$\{F\}$  - модифицированный вектор узловых нагрузок.

Матрица жесткости  $[K^*]$  имеет симметричную структуру и постоянные коэффициенты. Для решения системы уравнений (3) используется программа фронтального метода Айронса.

### 2. Построение определяющих уравнений и методика определения обобщенных механических характеристик узла связи плит и колонн

В расчетах конструкций широко используются три типа узлов связи: шарниры, абсолютно жесткие и абсолютно упругие, которые не отражают специфики резьбового соединения. Отмечена аналогия между поведением резьбового соеди-

нения в динамике и поведением вязкоупругого элемента, однако отсутствуют конкретные зависимости или определяющие уравнения для таких узлов.

Предполагается, что резьбовое соединение отвечает уравнению состояния общего вида

$$\Phi(u' - u'', \dot{u}' - \dot{u}'', \sigma, \alpha, t) = 0, \quad (4)$$

где  $u', (\dot{u}')$ ,  $u'', (\dot{u}'')$  – перемещение (скорости) элементов на поверхности взаимодействия;

$\sigma$  – тензор напряжений;

$\alpha$  – параметры;

$t$  – время.

В предположении малости относительных перемещений и их скоростей для узла, включающего части соединяемых в узле упругих деталей, с использованием конечно-элементной дискретизации и идеи конденсации узловых переменных выводится эквивалентное определяющее уравнение для суперэлемента – двухполосника вида (при отсутствии действия внешних сил)

$$[K_{se}]\{\delta_{se}\} + [C_{se}]\{\dot{\delta}_{se}\} + [M_{se}]\{\ddot{\delta}_{se}\} = \{R_{se}\}, \quad (5)$$

где  $se$  – индекс, означающий принадлежность к суперэлементу;

$\{R_{se}\}$  – вектор реакций со стороны конструкции.

Уравнение (5) имеет стандартный вид и может быть включено в систему уравнений (2) с использованием стандартных процедур метода конечных элементов.

Предлагается матрицы  $[K_{se}]$ ,  $[C_{se}]$ ,  $[M_{se}]$  определять не путем математического вывода, а посредством специальной разрабатываемой экспериментально-расчетной процедуры.

### 3. Расчетная модель и исследование динамических процессов и НДС ствола

В расчетах стволов используются адиабатические формулировки процессов горения зарядов и расширения продуктов сгорания, что затрудняет учет и исследование процессов теплообмена и термо-НДС в материале ствола. Сформулирована математическая модель динамических процессов и НДС в стволе, включающая уравнения:

- горения заряда;
- расширения продуктов сгорания и движения снаряда;
- состояния продуктов сгорания общего вида;
- сохранения энергии;
- кондуктивной теплопередачи в теле ствола;
- радиационно-конвективного теплообмена между продуктами сгорания и телом ствола, а также окружающим пространством;

- массовых потерь продуктов сгорания через зазоры и неплотности;
- термоупругого и динамического НДС тела ствола.

Параметры процессов считаются функциями состояния, поэтому в целом система уравнений нелинейна. Сопротивление движению снаряда может быть произвольной природы и выражаться различными зависимостями. Вследствии высказанных предположений система уравнений распадается на две последовательно решаемые подсистемы: подсистему теплообмена и подсистему НДС (последнее уравнение). Обе системы описаны в цилиндрической системе координат. Первая подсистема нелинейна, представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений, которая решается численно. Сначала выполняется линеаризация, затем дискретизация по методу конечных разностей с использованием устойчивого метода экономических схем Самарского. Результаты решения: температура в теле ствола, температура, давление, объем и масса продуктов сгорания, смещение и скорость движения снаряда.

Вторая подсистема также решается численно с использованием дискретизации в пространстве по методу конечных элементов, а по времени - по методу Ньюмарка.

Выбор методов решения второй подсистемы связан с необходимостью совместить решение модели НДС ствола и НДС конструкции пушки в целом, для которой ствол является источником возмущения.

Выполненные решения тепловой подсистемы в сравнимых постановках полностью совпали с опубликованными другими авторами адиабатическими решениями задач внутренней баллистики стволов.

Разрабатываемый подход к исследованию НДС конструкций технологических пушек с неидеальными связями может быть полезен для исследования колебаний и прочности других подобных конструкций, а модель ствола - при расчете и оптимизации стволов артиллерийских систем и стрелкового вооружения.