

**В.Н. Павленко, С.А. Полтарушников, В.Н. Сапрыкин**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Украина*

## **ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УЗЛА ПРЕСС-ПУШКИ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ**

Расчет на прочность ствола в установке для реализации ГДШ. Источником движения снаряда является энергия газа в заснарядном объеме, которая может быть подведена путем сгорания пороха. При этом параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) ствола определены как с учетом давления газов в заснарядной полости, так и с учетом изменения температуры ствола в результате его нагрева, т.е. рассмотрена термодинамическая модель. Показано, что расчет на прочность в опасных точках ствола можно проводить в первом приближении в квазистатической постановке с использованием энергетической теории прочности.

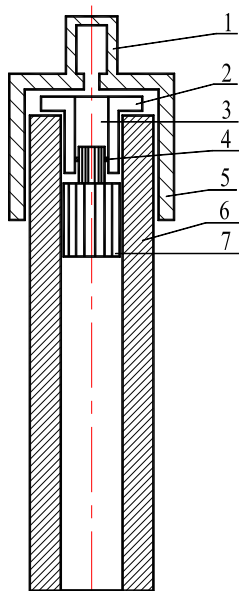
**ствол в установках ГДШ, параметры НДС элементов ствола, термодинамическая модель, энергетическая характеристика пресс-пушки, энергетическая теория прочности**

Применение в производстве авиационной техники высокопрочных материалов с улучшенными и специальными характеристиками, повышенные требования к качеству, точности и надежности изделий, частое обновление и совершенствование конструкций изделий и как следствие – мелкосерийный характер производства предопределили использование оборудования для импульсной безотходной обработки металлических заготовок, в частности пресс-пушек (ПП) для гидродинамической штамповки (ГДШ) [1, 2]. Вопросам проектирования и создания этого оборудования посвящены работы школ Р.В. Пихтовникова, Ю.Н. Алексева, В.К. Борисевича, А.И. Зимина и др. [3]. Однако дальнейшая эксплуатация этого оборудования и разработка новых технологических процессов, реализуемых на нем, невозможна без совершенствования методик расчета, повышения степени компьютеризации проектно-технологических работ, а также перехода от натурального эксперимента к математическому моделированию.

Наиболее нагруженным элементом пресс-пушек для ГДШ, который оп-

ределяет многие параметры технологического процесса, является энергетический узел, чаще всего ствольного типа.

Энергетический узел (ствол) ПП представляет собой толстостенный цилиндр, заглушенный днищем и предусматривающий движение массивного снаряда в сторону свободного торца под действием давления газа с переменными во времени термодинамическими параметрами (рис. 1). Основные



параметры этого процесса давление газа и тепловое воздействие продуктов сгорания того или иного химического заряда по внутренней поверхности энергоузла, скорость, запасенная снарядом кинетическая энергия, КПД связаны с массой заряда, массой снаряда, диаметром ствола и ограничены прочностью материала ствола.

Сгорая, пороховой или иной заряд, выделяет разогретые до 2000-3000 К газообразные продукты, которые расширяясь за счет запаса внутренней энергии, выталкивают снаряд. Продукты сгорания отдают часть своей энергии посредством теплообмена материалу ствола и снаряда, нагревая их. При теплообмене газа и стенок ствола в массивных частях энергоузла возникают нестационарные, неоднородные поля температур.

Рис. 1. Энергетический узел:  
1 – механизм воспламенения;  
2 – заряд энергоносителя;  
3 – затвор; 4 – связь снаряда  
с взрывной камерой; 5 – затвор;  
6 – ствол; 7 – снаряд

Вследствие неравномерного разогрева стенок возникают температурные напряжения, которые необходимо учитывать при проектировании стволов и оценивать их влияние на общее напряженное состояние разогретого ствола при выстреле. Давление газов в заснарядной камере не превышает 500 МПа. Действие давления газов на стенки ствола, как и поля температур в стволе являются факторами, обуславливающими напряженно-деформированное состояние в стволе.

Кратковременность протекающих процессов и высокая интенсивность рабочих нагрузок, сложность и разнообразие конструктивных решений

определяют суть проблемы обеспечения прочности и долговечности энергетических узлов оборудования импульсного формообразования деталей.

В публикациях не рассматривается комплексная задача, в которой рассматривается взаимодействие деформируемого твердого тела (ствола) с параметрами газа, того или иного химического заряда, характерными для процесс выстрела в стволе ПП, не рассмотрены.

В связи с этим целью данной работы является оценка динамического поведения ствола ПП для ГДШ с учетом комплекса процессов, протекающих в энергетическом узле, а именно исследование НДС и прочности стволов, на основе данных о совместном действии одновременно изменяющихся давлений и поля температур.

Типовая схема такого устройства, достаточная для исследования, представлена на рис. 2.

Исходными данными для проведения прочностного расчета, являются ре-

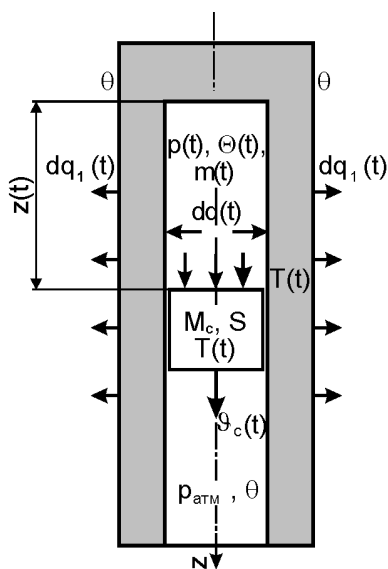


Рис. 2. Типовая расчетная схема энергетического узла:  
 $M_c$  – масса снаряда;  $m$  – масса порохового заряда,  $\theta_c$  – скорость снаряда,  $S$  – площадь поперечного сечения снаряда

зультаты совместного решения комплексной многопараметрической газодинамической интегро-дифференциальной модели, которая полностью описывает термодинамические процессы и НДС ствола при выстреле с учетом тепловых потерь [1]. Основными из них являются: геометрические параметры канала ствола, диаметр –  $d$  и длина ствола –  $L$ , величина заснарядного объема –  $V_0$ , а также закон распределения давления –  $p(t)$  и температур внутри канала ствола –  $\Theta(t)$ , как в пространства, так и во времени.

Характерные закономерности изменения основных термодинамических параметров процесса разгона снаряда (давление и температура пороховых газов в заснарядной камере ствола), а также закон движения снаряда приве-

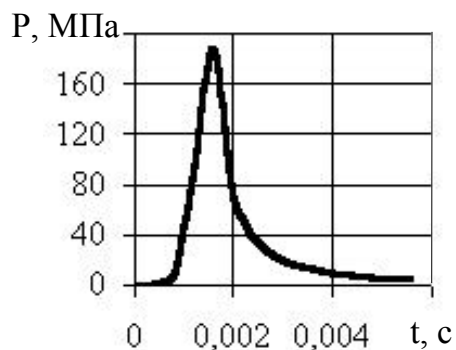


Рис. 3. Изменение давления пороховых газов

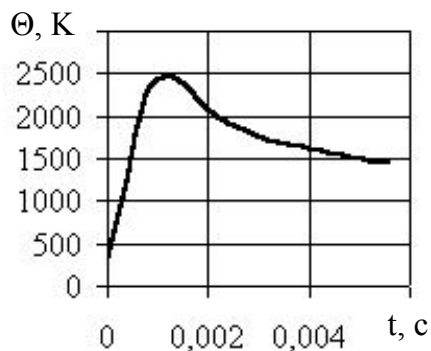


Рис. 4. Изменение температуры пороховых газов

дены на рис. 3 – 5.

Перед проведением поверочного расчета на прочность ствола, выполним исследования разогрева ствола, как за время одного, так и при серии выстрелов. При этом высокая температура пороховых газов влечет за собой возникновение высокоградиентного поля температур в стволе, что может при определенных условиях вызвать значительные температурные напряжения в стволе. В связи с этим необходимо при проектировании

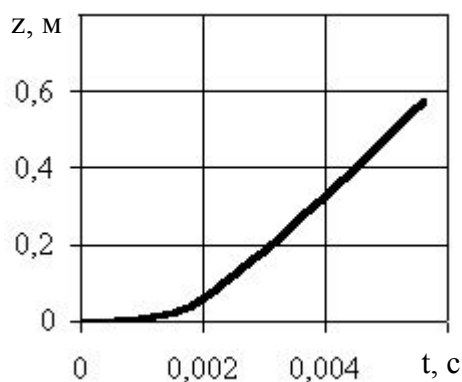


Рис. 5. Закон движения снаряда

ствола оценить их влияние на общее напряженно-деформированное состояние ствола. Кроме этого необходимо оценить влияния разогрева ствола на механические характеристики материала ствола.

На основании разработанной расчетной модели, приведенной в [1], установлен закон изменения температурного поля по толщине ствола в зависимости от количества выстрелов (1 – одного выстрела; 2 – 10 выстрелов;

3 – 20 выстрелов), если продолжительность одного технологического цик-

ла составляет 120 с представлено на рис. 6.

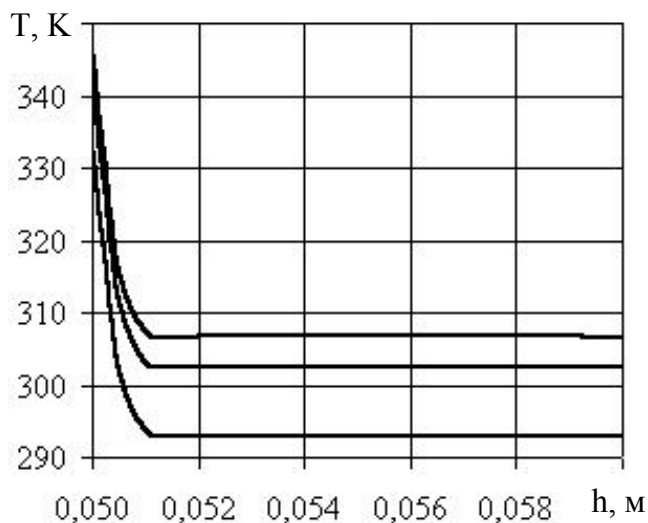


Рис. 6. Распределение температурного поля по толщине ствола

Кратковременность действия температурной нагрузки и существенное время остывания приводят к тому, что ствол к началу следующего выстрела почти полностью остывает, в результате чего каждый последующий выстрел приводит к увеличению температуры внутренней и наружной поверхности ствола на 3÷5% если сравнивать с полем температур после первого выстрела.

При единичном выстреле наблюдается низкий уровень температур в стволе, в результате чего нет необходимости учитывать изменение механических характеристик.

После изучения процесса разогрева ствола переходим к определению эквивалентных напряжений возникающих в стволе энергетического узла ПП.

Исходными данными для определения эквивалентных напряжений по одной из теорий прочности являются: закон изменения давления пороховых газов, во времени (рис. 3); закон движения снаряда (рис. 5); температура ствола (рис. 6).

Зная нагрузки, действующие на стенки ствола можно определить НДС ствола и провести поверочный расчет на прочность. В последнее время

при расчете прочности артиллерийских стволов [4], частным случаем которых являются гладкие стволы ПП, наметилась тенденция перехода от теории наибольших линейных деформаций (вторая теория прочности), к теории удельной потенциальной энергии формоизменения (четвертая теория прочности Мизеса-Хилла), которая и будет использована в дальнейшем анализе.

Эквивалентное (расчетное) напряжение определяется формулой

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{экв}}^{IV}$  – эквивалентные напряжения;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Условие прочности в нашем случае принимает следующий вид

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение, определяемое по следующей формуле:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала ствола;  $n_T$  – коэффициенты запаса прочности:  $n_T = 1,4 - 1,6$  [6].

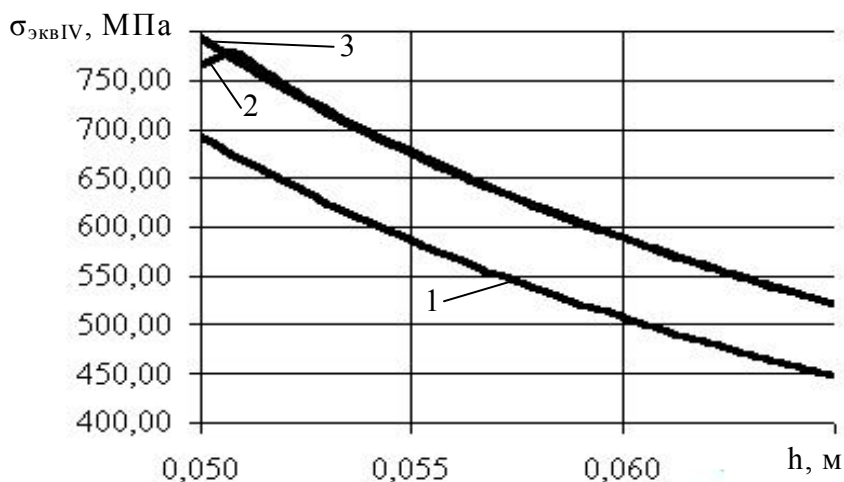


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений по толщине ствола

С целью выявления вклада каждого из факторов (давления, температу-

ры) в напряженное состояние ствола выполнен соответствующий анализ. Одновременно с этим проведено сравнение результатов по напряженному состоянию, возникающему за счет давления рассчитанному по динамической модели, т.е. с учетом нестационарности, и в предположении действия статического давления, равного пиковому [6].

С учетом принятых допущений, геометрических размеров и материала ствола типичное распределение эквивалентных напряжений, как от поля давления, так и от совместного действия поля температур и давления пороховых газов в опасном сечении в зависимости от толщины стенки ствола при статическом и динамическом расчете приведено на рис. 7.

На рис. 7 кривая 1 показывает эквивалентные напряжения полученные

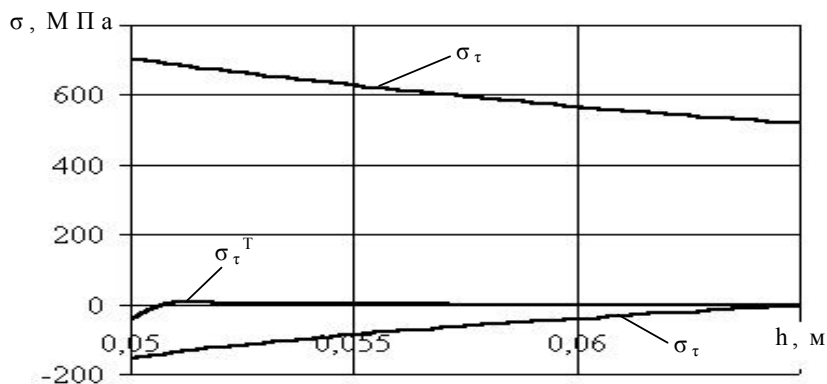


Рис. 8. Распределение окружных и радиальных напряжений по толщине ствола:

$\sigma_{\tau}^T$  – окружное напряжение от поля температур в стволе

при статическом расчете без учета температурных напряжений; 2 – динамический расчет с учетом температурных напряжений; 3 – динамический расчет без учета температурных напряжений).

Проведенный расчет, позволил установить закон распределение окружных напряжений от поля температур в стволе и давления пороховых газов, а также радиальных напряжений от давления пороховых газов (рис. 8).

Совместный анализ рис. 7 и 8 показывает, что сжимающие температурные напряжения возникают в пограничном слое (рис. 8), учет которых приводит к тому, что уровень эквивалентных напряжений на внутренней

поверхности ствола ниже, чем при расчете эквивалентных напряжений без учета температурных напряжений (рис. 7).

Эквивалентные напряжения в стволе установки работающей со временем цикла меньше 120 с уменьшаются от выстрела к выстрелу в связи с ростом температуры внутренних слоев ствола и вследствие этого с ростом отрицательных температурных напряжений. Поэтому в режиме циклической работы наиболее опасным в смысле прочности будет первый выстрел, и нет необходимости в исследовании напряженно-деформированного состояния энергетических узлов в режиме циклической работы.

В результате деформирования ствола происходит изменение зазора между стенками ствола, величину которого необходимо знать, чтобы правильно оценить тепловые потери, связанные с истечением газа через зазор.

Изменение радиального перемещения стенки ствола толщиной 0,015 м, в момент возникновения максимальных напряжений в стволе, приведено на рис. 9. Как видно радиальное перемещение внутренней поверхности ствола составляет порядка 0,13 мм, что с учетом принятого зазора при расчете не превышает ограничения на величину зазора, в зависимости от диаметра ствола, которая составляет от  $0,25 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$  м.

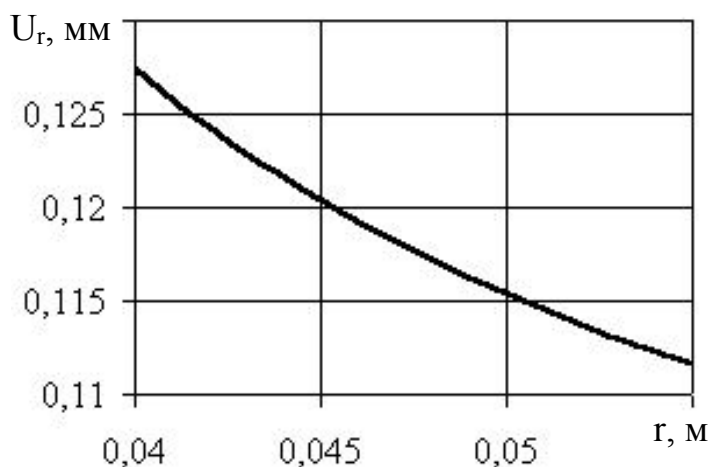


Рис. 9. Изменение радиального перемещения в стенке ствола

Анализ показал, что не происходит заметного уменьшения КПД энергетического узла.



Далее, пользоваться статическим подходом можно только при ориентировочном расчете прочности ствола с учетом коэффициента динамичности.

Коэффициент динамичности введем следующим образом:

$$k_D = \frac{\sigma_{Dэ\kappa\epsilon}^{IV}_{\max}}{\sigma_{CTэ\kappa\epsilon}^{IV}_{\max}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{Dэ\kappa\epsilon}^{IV}_{\max}$  – максимальные эквивалентные динамические напряжения в стенке ствола, посчитанные с учетом действия поля давлений и поля температур;  $\sigma_{CTэ\kappa\epsilon}^{IV}_{\max}$  – максимальные эквивалентные статические напряжения в стенке ствола, посчитанные от действия только поля давлений пороховых газов.

Численная зависимость коэффициента динамичности от толщины стенки ствола, полученная на основании проведенных теоретических исследований представлена на рис. 10. Результаты исследований показали, что

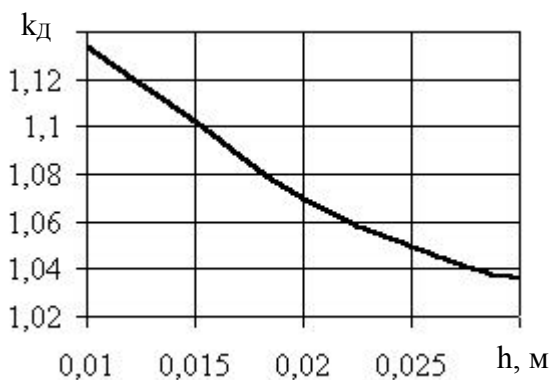


Рис. 10. Зависимость коэффициента динамичности от толщины стенки ствола

коэффициент динамичности слабо зависит от массы заряда и массы снаряда, т.е. он может быть определен для общего случая в зависимости от толщины стенки ствола.

Выполненный прочностной расчет показал:

- из-за кратковременности действия выстрела температура пороховых газов воспринимается лишь тонкими слоями металла, прилегающими к поверхности канала ствола;

- температурные напряжения распространяются в пределах пограничного слоя, не оказывая существенного влияния на общее напряженное состояние ствола. Однако проведение динамического расчета без учета на-

пряжений от поля температур при одном выстреле приводит к увеличению запаса прочности ствола в 1,03...1,14 раза;

– радиальные перемещения внутренней поверхности ствола не превышают предельных значений, в результате чего не происходит заметного уменьшения коэффициента полезного действия энергетического узла;

– в случае учета динамического поведения конструкции под действием приложенных нагрузок при помощи коэффициента динамичности, при расчете на прочность стволов при одном выстреле можно перейти от динамического подхода определения напряжений к статическому подходу (задача Лямэ).

### Литература

1. Брагин А.П., Мацукин Ю.Г. Пресс-пушки как машинное оборудование для гидродинамической штамповки // Импульсная обработка металлов давлением. – Х., 1981. – Вып. 9. – С. 18-22.

2. Кривцов В.С., Нарыжный А.Г., Павленко В.Н. Математическая модель напряженно-деформированного состояния и термодинамических процессов ствола технологической пресс-пушки // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосмич. ун-т. «ХАИ», 1998. – Вып. 6. – С. 104-108.

3. Пихтовников Р.В., Завьялов В.И. Штамповка листового металла взрывом. – М.: Машиностроение, 1964. – 175 с.

4. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – М.: Машиностроение, 1976. – 432 с.

5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наук. думка, 1988. – 737 с.

6. Павленко В.Н. Совершенствование конструктивных параметров и технических характеристик энергетических узлов пресс-пушек для гидродинамической штамповки: Дис... канд. техн. наук. – Х., 2002. – 152 с.

*Поступила в редакцию 13.06.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.