

УДК 621.98

## Численное моделирование процесса калибровки менисковых деталей жидкой технологической средой

**А.О. Мазуркевич, А.В. Петюков, В.Д. Баскаков**

*Методом конечно-элементного анализа проведено исследование напряженно-деформированного состояния детали менисковой формы на стадии нагрузки жидкой технологической средой и последующей разгрузки. Получена зависимость пружинения от геометрических параметров заготовки и внешнего прикладываемого давления. Установлено доминирующее влияние радиуса кривизны мениска и его высоты на величину пружинения.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, ANSYS Mechanical APDL, калибровка менисковых деталей, регрессионный анализ.

## Numerical simulation of meniscus shape parts calibration by liquid process medium

**A.O. Mazurkevich, A.V. Petyukov, V.D. Baskakov**

*The research of the stress-strain state of the meniscus shape part has been carried out at the stage of the liquid process medium loading and subsequent discharge by the finite element analysis. The relation of the springing and the workpiece geometric parameters and the external pressure applied is obtained. The dominant influence of the meniscus curvature radius and of its height on the springing value is established.*

**Keywords:** numerical simulation, ANSYS Mechanical APDL, meniscus parts calibration, regression analysis.

Одной из важнейших деталей, определяющих эффективность действия снарядоформирующих зарядов, является кумулятивная облицовка менисковой формы, изготавливаемая из стали или меди. Она позволяет сформировать при взрыве удлиненный поражающий элемент, пробивающий танковую броню с больших расстояний [1].

В деталях подобного класса предъявляют высокие требования к геометрической точности. В частности, отклонение от сферичности не должно превышать 0,03...0,05 мм, а разностенность\* — 0,03...0,05 мм.

Одна из наиболее перспективных технологий получения облицовок включает операцию калибровки внутренней поверхности и позволяет обеспечить точность ее формы и в дальнейшем, при механической обработке, обеспечить снижение разностенности детали [2]. Основным способом проведения этой операции является деформирование сферической заготовки за счет внешнего гидростатического давления

\* Разностенность — разность между наибольшей и наименьшей толщиной детали в плоскости поперечного сечения.



**МАЗУРКЕВИЧ**  
Алексей Олегович  
студент



**ПЕТЮКОВ**  
Андрей Вячеславович  
студент  
кафедры «Высокоточные  
летательные аппараты»



**БАСКАКОВ**  
Владимир Дмитриевич  
кандидат технических  
наук, доцент кафедры  
«Технологии  
ракетно-космического  
машиностроения»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail:  
lex19900310@yandex.ru.ru

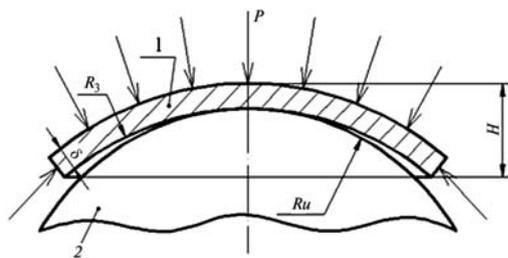


Рис. 1. Схема проведения калибровки:

- 1 — сферическая сегментная заготовка;
- 2 — сферическая матрица;  $H$  — высота сегментной заготовки;  $\delta$  — толщина заготовки;  $R_3$  — радиус заготовки;  $R_m$  — радиус матрицы;
- $P$  — прикладываемое давление

$P$  (давление жидкой технологической среды, либо полимера) до полного соприкосновения внутренней поверхности заготовки, имеющей в начале операции радиус  $R_3$ , с поверхностью матрицы радиусом  $R_m$ , при этом  $R_3 > R_m$  (рис. 1).

В данной работе проводилось численное моделирование калибровки на обжим сферической заготовки при помощи программного комплекса ANSYS Mechanical APDL с целью выявления основных закономерностей ее поведения.

С помощью программного комплекса ANSYS построена геометрическая модель процесса калибровки в лагранжевой постановке в трехмерной геометрии. В силу симметрии задачи рассматривалась 1/4 часть модели.

На рисунке 2 представлена конечно-элементная модель системы тел, участвующих в процессе калибровки. В качестве материала оправки использовалась модель абсолютно жесткого тела. Для материала заготовки была выбрана модель упругопластического материала с кинематическим упрочнением. Параметры материалов приведены в табл. 1. Заготовка разбита 20-узловыми объемными конечными элементами. Число элементов, на которые разбита заготовка, составило 4 800, оправка — 1 850.

Таблица 1

Механические свойства материала заготовки

Свойство	Медь М1	Сталь Ст3
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	8940	7850
Модуль упругости $E$ , ГПа	110	210
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,35	0,28
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	120	235
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	220	410
Модуль упрочнения $E_t$ , МПа	166	764

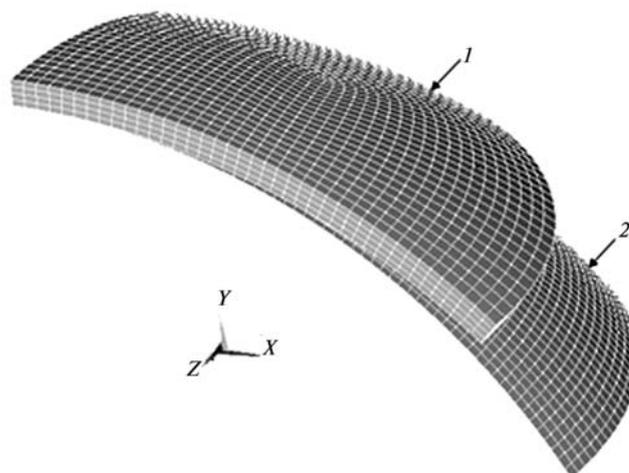


Рис. 2. Конечно-элементная модель системы тел, участвующих в процессе калибровки:

- 1 — заготовка; 2 — матрица

В начальный и последующие моменты времени к заготовке прикладывалось давление, закон изменения которого приведен на рис. 3. В плоскости симметрии  $XOY$  запрещалось перемещение вдоль оси  $Z$  и поворот вокруг осей  $Y$  и  $X$  всех узлов заготовки, лежащих в этой плоскости. Аналогично для плоскости  $YOZ$  запрещалось перемещение вдоль оси  $X$  и поворот вокруг осей  $Y$  и  $Z$  узлов, лежащих в этой плоскости. Для задания контактных условий между матрицей и заготовкой использовался, так называемый штрафной метод (penalty formulation). При этом сила отталкивания соприкасающихся ячеек материалов прямо пропорциональна глубине их взаимопроникнове-

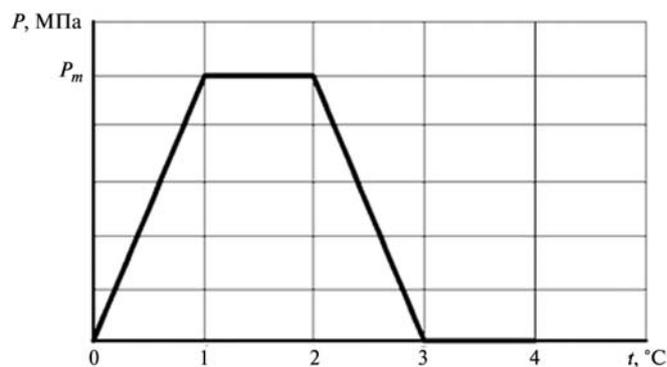


Рис. 3. Изменение во времени  $t$  прикладываемого к заготовке давления  $P$ .

$P_m$  — максимальный уровень давления

ния. Трение между матрицей и заготовкой не учитывалось.

В данной работе пружинение заготовки  $\Pi_i$  в процессе  $i$ -го моделирования калибровки определялось как модуль вектора перемещения крайней точки грани, принадлежащей внутренней поверхности заготовки, при разгрузке (максимальное перемещение заготовки вследствие упругого пружинения).

В качестве величин, имеющих решающее влияние на результат калибровки, были выбраны следующие (табл. 2): начальный радиус заготовки  $R_3$ ; начальная толщина облицовки  $\delta$ ; начальная высота облицовки  $H$ ; максимальное давление нагружения на этапе калибровки  $P_m$ .

Предполагая, что зависимость между факторами и величиной пружинения является линейной, для построения искомого полинома был использован метод множественного регрессионного анализа [3]. В соответствии с выбранным подходом численное моделирование проводилось по плану полного факторного эксперимента, в котором каждый фактор принимал два значения. Для построения одного полинома проводилось  $n = 2^4 = 16$  расчетов.

Таблица 2

Диапазон изменения факторов, влияющих на пружинение

Уровни факторов	$R_3$ , мм	$\delta$ , мм	$H$ , мм	$P_m$ , МПа (Ст3)	$P_m$ , МПа (М1)
Основной уровень	62,4	2,86	11,7	216,25	110
Интервал варьирования	5,2	0,78	3,9	136,25	70
Верхний уровень	67,6	3,64	15,6	352,5	180
Нижний уровень	57,2	2,08	7,8	80	40

В соответствии с матрицей планирования численных расчетов был проведен ряд вычислений, в результате которых получены величины пружинения для заготовок, выполненных из меди М1 и стали Ст3.

Рассмотрим подробнее результаты моделирования одной из расчетных задач. Подтверждением корректности использования симметрии задачи с целью минимизации расчетов, а также правильности выбора граничных усло-

вий, служит осесимметричное распределение модуля вектора перемещения  $N$  узлов заготовки (рис. 4). В целом аналогичную картину демонстрирует и распределение интенсивностей напряжений. Неравномерность распределения величины интенсивности напряжений  $\sigma_i$  по толщине говорит о правильности выбора типа конечного элемента для заготовки (рис. 5).

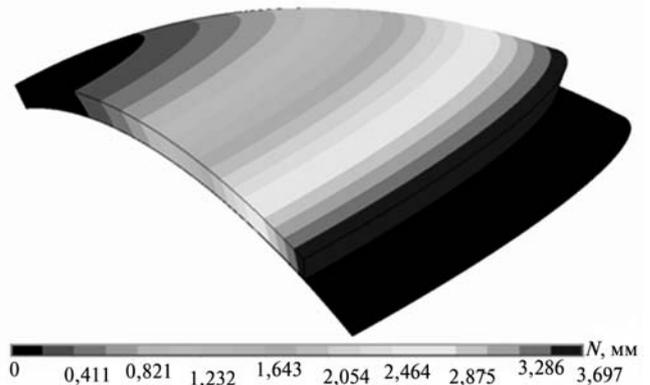


Рис. 4. Распределение модуля вектора перемещения  $N$  узлов заготовки в конечный момент времени

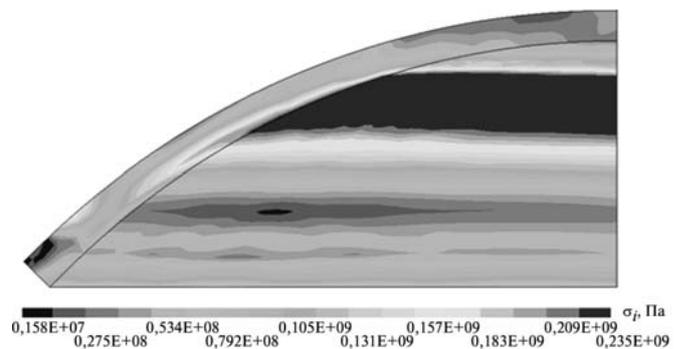


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в узлах заготовки в конечный момент времени

На основе полученных результатов попытаемся установить зависимость между начальными параметрами задач (факторами) и величинами упругого пружинения заготовки  $\Pi_i$ , при этом предположим, что искомая связь описывается полиномом вида

$$\Pi = a_0 + \sum_{j=1}^J a_j x_j, \quad (1)$$

где  $\Pi$  — оцененное значение пружинения, мм;  $a_0$  — постоянная составляющая пружинения, мм;  $a_j$  — коэффициент влияния  $j$ -го фак-

тора на величину пружинения;  $x_j$  — значение  $j$ -го фактора;  $J = 4$  — число факторов.

Определение коэффициентов линейного полинома (1) для заготовок, выполненных из указанных материалов, было проведено с использованием линейного множественного регрессионного анализа (табл. 3).

Таблица 3

Значения коэффициентов уравнения регрессии

Коэффициент влияния	Размерность	Ст3	М1
$a_0$ (постоянная составляющая)	мм	0,157	0,161
$a_1$ (радиус заготовки $R_3$ )	—	-0,456	-0,928
$a_2$ (толщина заготовки $\delta$ )	—	-0,019	-0,014
$a_3$ (высота заготовки $H$ )	—	5,518	5,175
$a_4$ (максимальное давление $P_m$ )	м/МПа	$-2,5 \cdot 10^{-8}$	$-1,2 \cdot 10^{-7}$

Близость результатов наблюдений и оценки с использованием полинома (1) была установлена путем вычисления коэффициента множественной корреляции  $R$ . Величина  $R$  для заготовок, выполненных из сплава М1, составила 0,95, а из стали Ст3 — 0,93. Значимость коэффициента множественной корреляции оценивали с помощью критерия Фишера. Связь считают статистически значимой в том случае, если расчетное значение  $\hat{F}_R$  (коэффициент Фишера) превышает табличное  $F_T$ . Расчетное значение  $\hat{F}_R$  для стали составляет 19,10, для меди — 26,25;  $F_T = 14,45$  для уровня значимости 0,01 и числа степеней свободы  $\nu_1 = 11$ ,  $\nu_2 = 4$  [3].

Аналогично по  $t$ -критерию Стьюдента (для уровня значимости 0,01): расчетное значение  $\hat{t}_R$  для Ст3 составляет 24,64, для М1 — 33,28 $\sqrt{r}$  равно 3,11 для уровня значимости 0,01 и числа степеней свободы  $\nu_1 = 11$  [3].

Близкое к единице значение коэффициента множественной корреляции  $R$  подтверждает гипотезу о линейном характере зависимости величины пружинения от выбранных факторов в заданном диапазоне варьирования факторов.

Запишем полином в безразмерном виде:

$$\bar{\Pi} = \bar{a}_0 + a_1 \bar{R}_3 + a_2 \bar{\delta} + a_3 \bar{H} + \bar{a}_4 \bar{P}_m, \quad (2)$$

где  $\bar{\Pi} = \Pi / R_m$ ;  $\bar{a}_0 = a_0 / R_m$ ;  $\bar{\delta} = \delta / R_m$ ;  $\bar{H} = H / R_m$ ;  $\bar{a}_4 = a_4 \sigma_T / R_m$ ;  $\bar{P}_m = P_m / \sigma_T$ .

Полином в форме (2) работает в следующем диапазоне значений факторов:

$$\bar{R}_3 = [1,1 \dots 1,3]; \quad \bar{\delta} = [0,04 \dots 0,07]; \\ \bar{H} = [0,15 \dots 0,30]; \quad \bar{P}_m = [\bar{P}_{\min}; 1,5].$$

Здесь  $\bar{P}_{\min}$  — безразмерное давление, минимально необходимое для обеспечения полного прилегания заготовки к матрице.

Полученная полиномиальная зависимость позволяет провести оценку пружинения сферической заготовки (см. рис. 1), величины прикладываемого внешнего воздействия, а также размеров, которые лежат в диапазоне варьирования выбранных факторов калибровки.

Характер воздействия факторов на величину пружинения определяется знаком коэффициентов влияния  $a_j$ . Отрицательная величина коэффициентов влияния радиуса заготовки, толщины заготовки, а также прикладываемого давления говорит о том, что данные факторы стремятся снизить пружинение. Сходность знаков коэффициентов полиномов, полученных для заготовок, выполненных из стали Ст3 и сплава М1, подтверждает индифферентность характера их влияния к материалу заготовки.

При помощи полученных зависимостей были установлены абсолютные значения вкладов, которые вносят факторы в переменную часть полинома пружинения (рис. 6).

Диаграмма демонстрирует качественное совпадение распределения вкладов факторов для медной и стальной заготовок.

На основе приведенной диаграммы вкладов, а также знаков коэффициентов влияния, можно сделать вывод о том, что для уменьшения величины пружинения необходимо калибровать заготовки с большим припуском на механическую обработку (с большей толщиной). Повышение максимального давления калибровки приводит к незначительному уменьшению пружинения. Исходя из этого, значение данного параметра рекомендуется принимать минимально необходимым, при котором обеспечи-

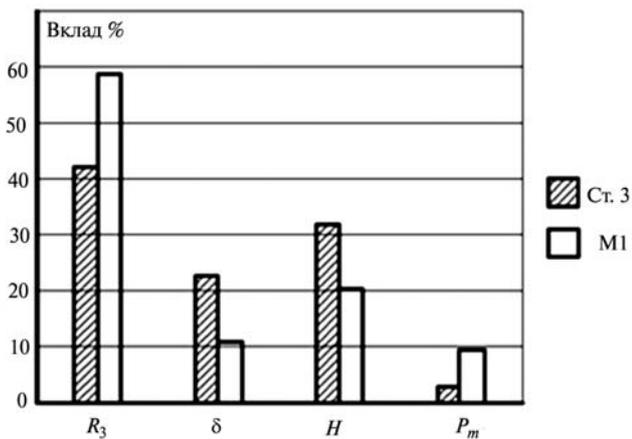


Рис. 6. Диаграмма вкладов факторов в переменную составляющую пружинения для различных материалов заготовки

вается закрытие зазора между матрицей и заготовкой, что согласуется с общепринятой практикой и позволяет повысить срок службы штамповой оснастки.

С помощью полинома (2) можно решать как прямые задачи оценки пружинения при заданных значениях конструктивных параметров заготовки, так и обратные — по допустимой величине пружинения определить параметры заготовки. Однако, в условиях реального производства факторы  $\bar{R}_3$ ,  $\bar{\delta}$ ,  $\bar{H}$ ,  $\bar{P}_m$  являются случайными значениями. Поэтому также представляет интерес оценка диапазона разброса случайной составляющей пружинения  $\Delta\bar{\Pi}$ :

$$\Delta\bar{\Pi} = a_1\Delta\bar{R}_3 + a_2\Delta\bar{\delta} + a_3\Delta\bar{H} + a_4\Delta\bar{P}_m,$$

где  $\Delta\bar{\Pi} = \Delta\Pi / R_m$ ;  $\Delta\bar{R}_3 = \Delta R_3 / R_m$ ;  $\Delta\bar{\delta} = \Delta\delta / R_m$ ;  $\Delta\bar{H} = \Delta H / R_m$ ;  $\Delta\bar{P}_m = \Delta P_m / \sigma_T$ ;  $\Delta\bar{R}_3$ ,  $\Delta\bar{\delta}$ ,  $\Delta\bar{H}$ ,  $\Delta\bar{P}_m$  — нестабильность радиуса заготовки, ее толщины, ее высоты и прикладываемого давления соответственно.

Таким образом, для оценки рассеяния величины пружинения необходимо определить диапазоны колебания факторов. Эта информация может быть получена по результатам измерений партии заготовок перед калибровкой, а также из паспортных данных прессового оборудования.

### Выводы

1. Предложен подход к построению аналитических соотношений для оценки номинальной и случайной составляющих величины пружинения однотипных заготовок после калибровки жидкими или эластичными средами путем обработки результатов численного эксперимента и построения на этой основе регрессионной зависимости.

2. На основе изложенного подхода получены значения коэффициентов уравнения регрессии для оценки пружинения, а также нестабильности пружинения, заготовок типа сферический сегмент, выполненных из Ст3 и М1.

3. Анализ полученных соотношений показал, что для заготовки типа сферический сегмент наибольшее влияние на величину пружинения оказывают ее геометрические параметры: радиус  $R_3$  и высота  $H$ .

### Литература

1. Средства поражения и боеприпасы / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
2. Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Круглов П.В. Методика проектирования технологии изготовления высокоточных деталей боеприпасов // Оборонная техника. 2000. № 1–2. С. 89–92.
3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.

Статья поступила в редакцию 02.05.2012