

Численное моделирование напряженно-деформируемого состояния в месте крепления пули в гильзе патрона

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
Университет гражданской защиты Украины*

Одними из основополагающих факторов, которые оказывают существенное влияние на эффективность и область применения вновь разрабатываемого метода демонтажа, являются как конструкция самого объекта исследования – боеприпаса, так и конструкция его отдельных элементов снаряжения. В связи с этим при разработке новой рациональной технологии и нестандартного оборудования для утилизации мелкокалиберных авиационных унитарных патронов предусматриваются проведение всесторонних исследований и анализ достаточно большого количества параметров утилизируемого объекта.

Особое внимание уделяется разработке метода демонтажа, при котором имеется возможность повторного использования компонентов унитарного патрона в последующем производстве таких же видов боеприпасов для повышения эффективности технологии утилизации в целом и снижения себестоимости вновь изготавливаемых образцов.

Очевидно, что необходимо ввести в расчетные зависимости для определения $F_{узвл}$ поправки, учитывающие крепление пули в дульце гильзы. Для этой цели используем хорошо оправдавший себя по достоверности получаемых результатов метод конечных элементов (МКЭ).

МКЭ позволяет провести более точный расчет, заключающийся в том, что учитывается взаимное влияние двух деформируемых тел, а также снятие напряжений за счет деформаций ползучести в материале гильзы. По МКЭ можно достаточно точно определить контактное давление и извлекающее пулю усилие, а также учесть в расчетах влияние технологического фактора (перекоса), усилие, что имеет актуальное значение для проектирования технологического оборудования.

При численном моделировании напряженно-деформируемого состояния (НДС) в узлах крепления боеприпаса в качестве конечного элемента принимался плоскостной элемент PLANE2D для решения осесимметричных задач и SHELL3 для решения задач по определению контактного давления при перекосе постановки пули. На первоначальном этапе исследований была установлена приемлемость МКЭ для расчета НДС составных цилиндров.

В первом случае рассматривался цилиндр, в который с натягом $\delta = 100$ мкм впрессован сплошной стержень. Диаметр контактной поверхности $d = 9,25$ мм. Диаметр наружной поверхности после установки сплошного стержня составил 9,75 мм. Толщина стенок обечайки принималась равной 0,25 мм.

В качестве материала составного цилиндра принималась сталь со следующими механическими характеристиками: модуль упругости $E = 215$ ГПа, предел прочности $\sigma_s = 300$ МПа и коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$.

При рассмотрении НДС составного цилиндра при помощи МКЭ получено распределение окружных и радиальных напряжений, а также радиальное

перемещение контактирующих тел по внутреннему и внешнему цилиндру (рис. 1 – 4).

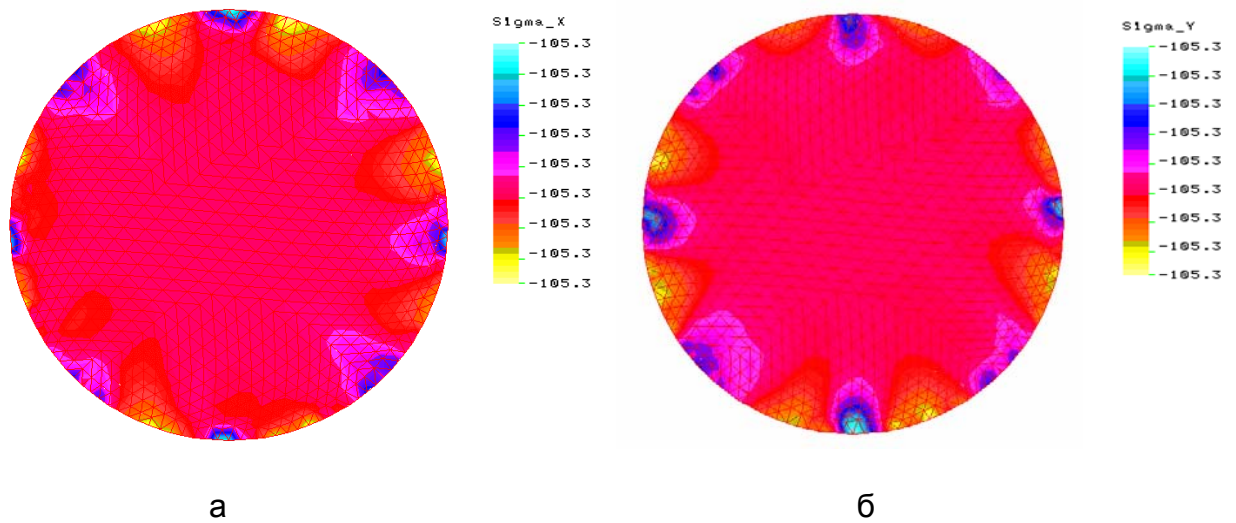


Рис. 1. Распределение напряжений по внутреннему цилиндру: а - радиальных; б - окружных

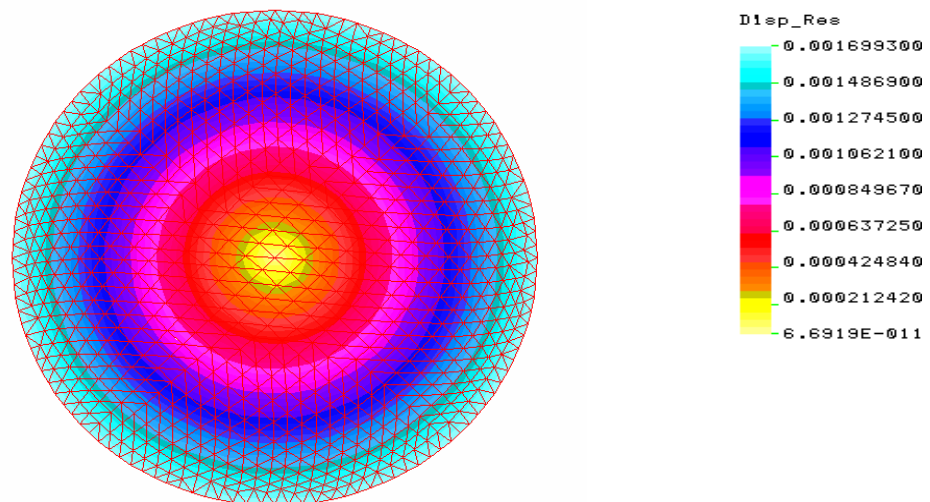


Рис. 2. Радиальное перемещение по сечению внутреннего цилиндра

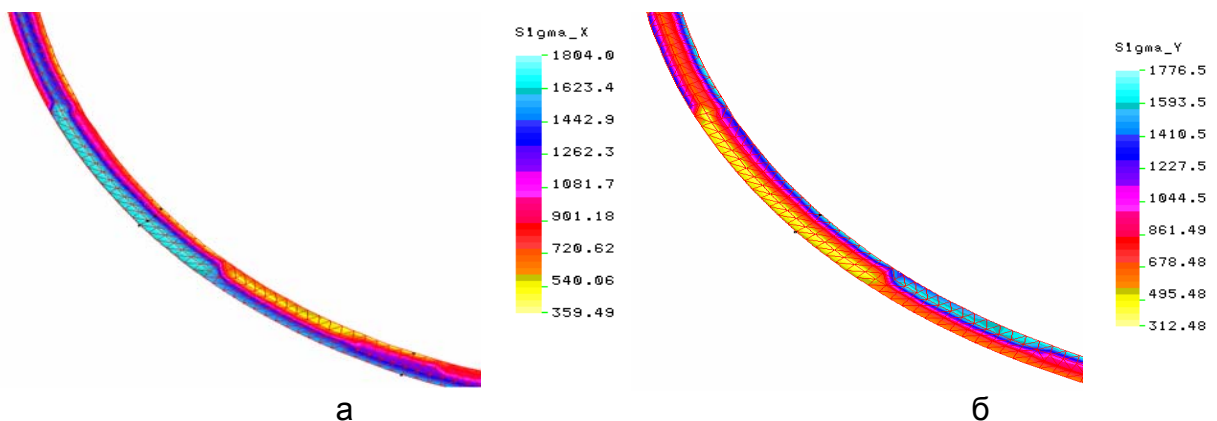


Рис. 3. Распределение напряжений по толщине внешнего цилиндра: а - радиальных; б - окружных

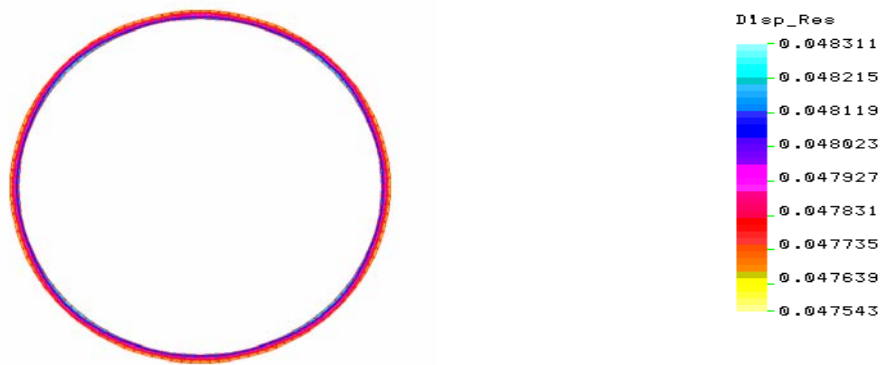


Рис. 4. Перемещение кольца в поперечном сечении

При сравнении результатов, полученных с помощью расчетно-аналитического метода [1], и значений, полученных с помощью МКЭ, видно, что они полностью совпадают для напряжений по внутреннему цилиндру, радиальных перемещений по внутреннему и внешнему цилиндрам и незначительно отличаются для радиальных и окружных напряжений по внешнему цилиндру.

Отклонение в значениях по напряжению может быть устранено применением большего количества элементов по сечению или переходом на конечный элемент более высокого порядка, что и было сделано в дальнейшем.

Подтвержденный результат теоретических исследований МКЭ показал необходимость перехода к рассмотрению составного цилиндра под действием контактного давления как единого деформируемого объекта, НДС которого нельзя рассматривать по отдельным элементам без учета их взаимодействия. При рассмотрении составного цилиндра с обечайкой толщиной 1 мм, нагруженного контактным сжимающим давлением по внутреннему контуру обечайки, равным 105 МПа, из рис. 5 и 6 видно следующее:

- радиальные и окружные напряжения во внутреннем цилиндре возрастают с 105 до 196 МПа;
- окружные напряжения во внешней обечайке падают до 53 МПа;
- радиальные перемещения на внешней поверхности составного цилиндра составляют 1,69 мм и равны радиальным перемещениям внутреннего цилиндра, нагруженного внешним давлением;
- на границе контакта радиальное напряжение меньше контактного давления и равно 97 МПа.

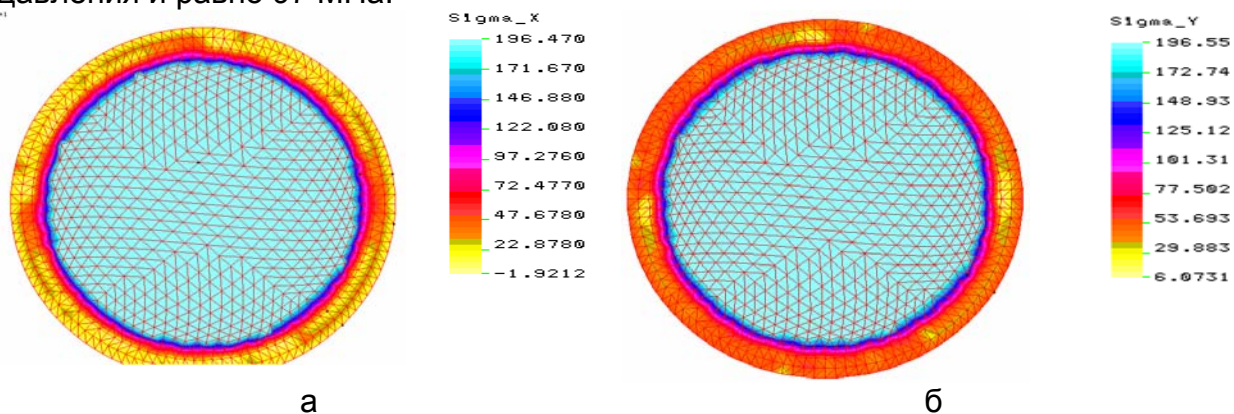


Рис. 5. Распределение напряжений по сечению составного цилиндра: а - радиальных; б - окружных

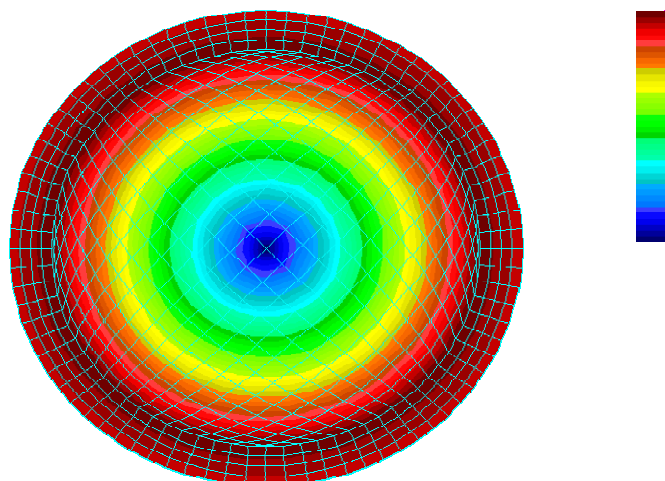


Рис. 6. Распределение радиальных перемещений по сечению составного цилиндра

При исследовании влияния толщины внешней обечайки на НДС составного цилиндра было замечено, что при уменьшении ее толщины радиальные напряжения во внутреннем цилиндре уменьшаются так же же, как и контактные.

При этом последние уменьшаются значительно больше при уменьшении толщины обечайки, что объясняется пластической деформацией обечайки и перераспределением напряжений. Данные о характере изменения параметров НДС в зависимости от толщины обечайки представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Изменение радиальных напряжений σ_r в составном цилиндре при $p_k = 105$ МПа в зависимости от толщины t обечайки

Толщина t , мм	Напряжение σ_r во внутреннем цилиндре, МПа	Напряжение σ_r на контактной поверхности, МПа
1,00	196	97
0,85	101	79
0,60	89	46
0,25	22	16

Следующий этап исследований - анализ распределения напряжений по высоте цилиндра, так как во многих источниках указывается на его неравномерность [2 - 4].

Поэтому было рассмотрено решение МКЭ по продольному сечению составного цилиндра, т.к. нагрузка является осесимметричной. На рис. 7 представлено НДС составного цилиндра с толщиной обечайки 0,25 мм и нагруженного контактным давлением 105 МПа.

Из рис. 7 видно, что существует неравномерность в распределении радиальных напряжений по высоте составного цилиндра, что является следствием действия краевых эффектов. Распределение параметров НДС составного цилиндра в условиях краевого эффекта показано на рис. 8.

Таким образом, неравномерность распределения радиальных напряжений по продольному сечению соответственно оказывает влияние в конечном итоге на

извлекающее усилие, которое в данном случае является интегральной характеристикой и определяется как

$$F_{извл} = f \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \int_l \sigma_r |_{r=r_1} dl, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения;
 d_1 – внутренний диаметр внешнего цилиндра;
 σ_r – окружные напряжения.

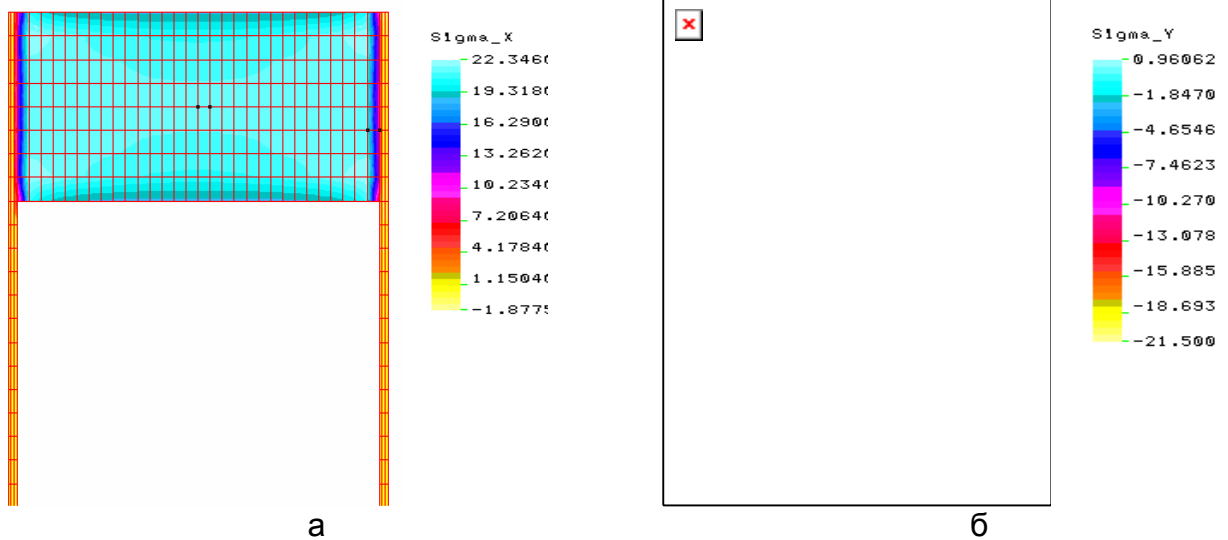


Рис. 7. Распределение напряжений по продольному сечению: а - радиальных; б - окружных

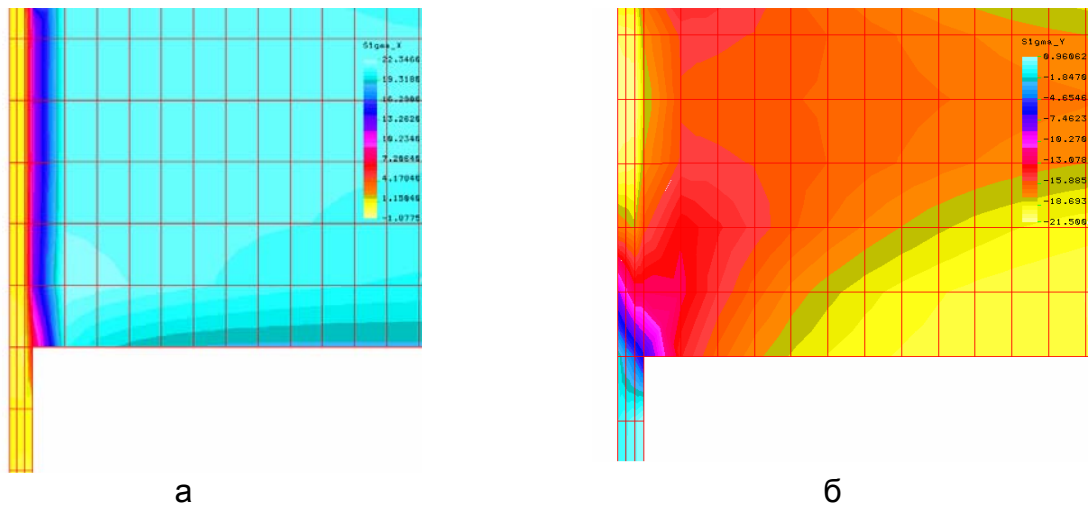
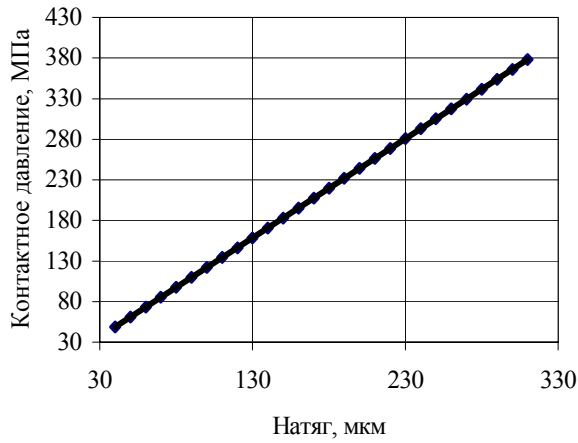


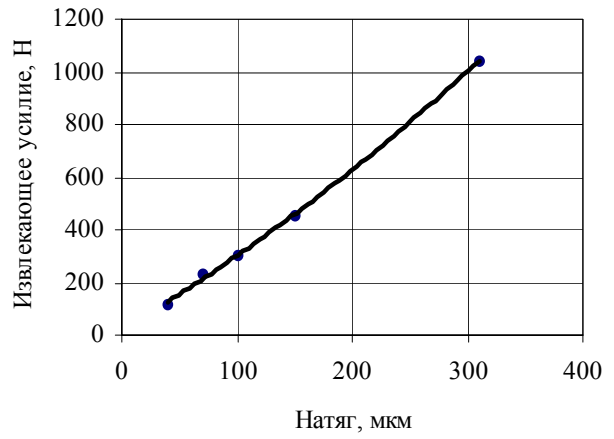
Рис. 8. Распределение радиальных напряжений в зоне краевого эффекта: а - радиальных; б - окружных

Расчет извлекающего усилия (1) по полученным радиальным напряжениям на поверхности контакта совпадает с полученным экспериментальным значением и зависит от натяга.

Значения извлекающего усилия полученного МКЭ в зависимости от натяга для различных снарядов представлены на рис. 9 - 11.

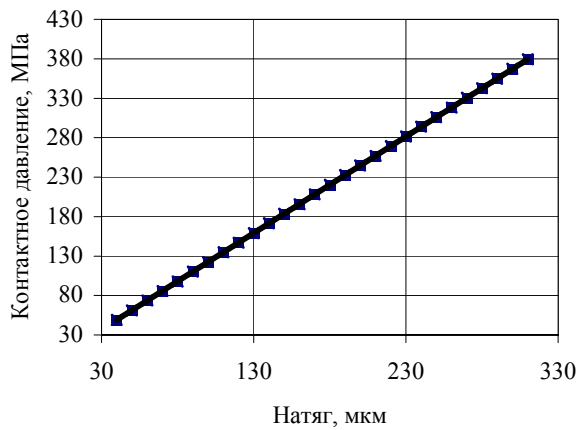


а

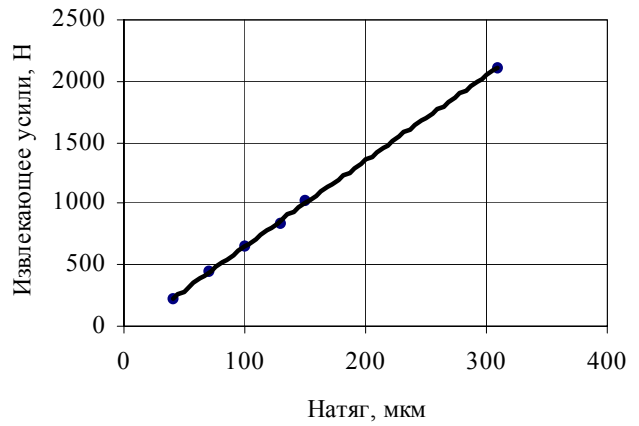


б

Рис. 9. Зависимость величины патрона калибра 9×18ПМ от натяга: а - контактного давления; б - извлекающего усилия

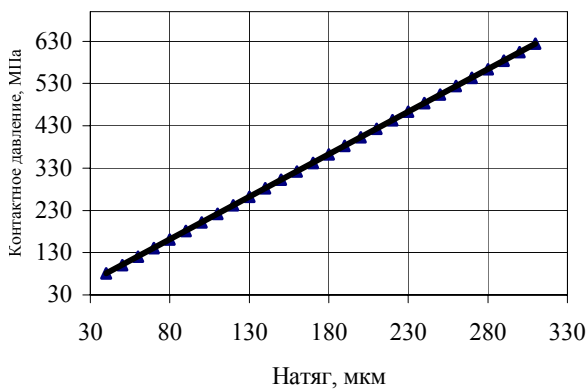


а

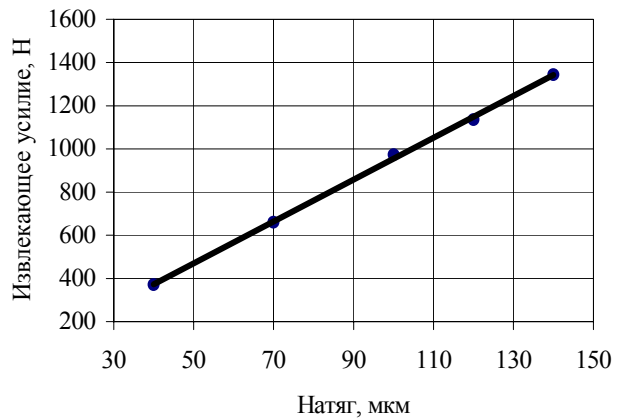


б

Рис. 10. Зависимость величины калибра 9×19 «Parabellum» от натяга: а - контактного давления; б - извлекающего усилия



а



б

Рис. 11. Зависимость величины калибра 7,62×39 от натяга: а - контактного давления; б - извлекающего усилия

Анализ представленных на рис. 9 - 11 данных о характере изменения величины извлекающего усилия в зависимости от натяга подтверждает правильность выбора метода конечных элементов, а полученные значения удовлетворительно коррелируются с экспериментальными данными и техническими условиями на проектирование патронов [5, 6].

Для случаев НДС гильзы при «чистом» натяге, когда отсутствуют дополнительные виды обжима ее дульца, расчетные данные достоверны. При наличии дополнительных факторов, реализованных в виде обжима дульца или кромки гильзы, необходимо их уточнение.

Различия между данными о величине извлекающего пулю усилия для патрона калибра 7,62×39 может быть объяснено рядом положений. Прежде всего, это различные методы определения величины извлекающего усилия.

В заводских условиях измерение происходит с помощью специального устройства, соединенного с динамометром. Устройство снабжено захватом, который вытягивает пулю из гильзы, и гнездом для фиксации донца гильзы. При приложении нагрузки происходит продольное перемещение узлов фиксации элементов снаряжения и определяется величина усилия. Скорости перемещения механизмов устройства незначительные. При инерционном демонтаже извлечение пули происходит при достаточно больших скоростях соударения.

Кроме того, имеется определенная специфика в самом понятии «извлекающее пулю усилие» в зависимости от аспектов его применения. Для процесса демонтажа имеет большое значение извлекающее усилие, которое гарантирует полный выход пули из гильзы, что и было реализовано во время проведения натурных исследований для патрона калибра 7,62×39. При проектировании патронов задается усилие, которое обеспечивает определенное значение давления форсирования [7 - 9], обеспечивающего начало движения пули в канале ствола.

В данном случае имеет значение усилие, при котором пуля начинает выходить из дульца гильзы, а оно, естественно, значительно меньше усилия, гарантирующего полный выход пули из дульца гильзы. Наличие дополнительного обжатия дульца гильзы только повышает это значение.

Расчет параметров НДС гильзы производился для наиболее простого случая нагружения, когда и сплошной стержень и тонкостенная обечайка имеют цилиндрическую форму, которая обладает относительной устойчивостью при продольном сжатии (расчетная модель патронов калибра 9×18 ПМ и 9×19 «Parabellum» с короткой цилиндрической гильзой).

Однако есть другой случай расчета НДС составного цилиндра, когда наружная тонкостенная труба при осевом сжатии обладает меньшей устойчивостью, что связано с ее конструктивными особенностями (расчетная модель патрона калибра 7,62×39 с относительно длинной гильзой бутылочной формы).

При перекосе характер распределения радиальных напряжений по поперечному сечению становится неоднородным, и поэтому извлекающее усилие

$$F_{извл} = f \cdot \int_s \int_{r=r_1} \sigma_r | dlds, \quad (2)$$

где: s – площадь контактной поверхности.

Взаимное перемещение контактирующих тел показано на рис. 12.

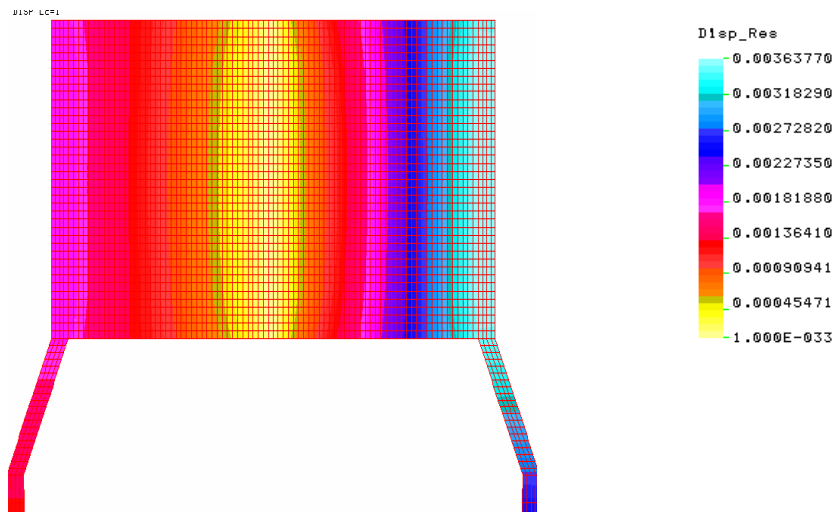


Рис. 12. Взаимное перемещение контактирующих объектов в продольном сечении при расчетной модели патрона калибра 7,62×39

Характер деформаций дульца гильзы при возникновении перекоса, максимальное значение которого находится в пределах величины натяга в процессе снаряжения (при продольном сжатии), показан на рис. 13.

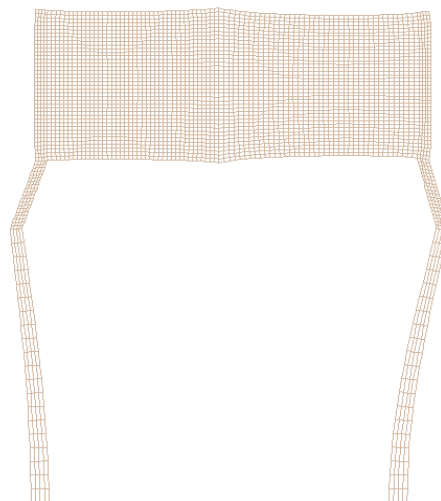


Рис. 13. Деформации дульца гильзы патрона 7,62×39 при перекосе

Данные о значениях величины извлекающего пулю усилия в условиях натяга и перекоса представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения извлекающего пулю усилия $F_{извл}$ патрона калибра 7,62×39 с учетом величины натяга δ и перекоса

δ , мкм	40	70	100	120	140
$F_{извл}$ без учета перекоса, Н	370,721	660,347	973,143	1135,333	1343,863
$F_{извл}$ с учетом перекоса, Н	926,802	1633,489	2328,591	2791,992	3266,978

В некоторых боеприпасах для повышения величины давления форсирования [7 - 9] применяется дополнительное обжатие кромки дульца гильзы, и при расчете извлекающего усилия необходимо учитывать добавку на раскрытие этого обжатия которое произойдет, когда напряжения на данном участке достигнут значений предела текучести материала.

Извлекающее усилие, потребное для раскрытия обжатия, может быть вычислено по формуле:

$$F_{извл}^* = n \cdot \sigma_{0,2} \cdot \pi \cdot d \cdot t, \quad (3)$$

где n – количество рядов обжима;

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала;

d – диаметр дульца гильзы в месте обжима;

t – толщина стенки дульца гильзы.

Таким образом, полное расчетное извлекающее усилие для патрона калибра 7,62x39 с учетом дополнительного усилия, необходимого для извлечения пули из гильзы при наличии дополнительного обжима дульца гильзы, а также с учетом натяга будет равно $F_{извл.общ} = 1973...2263$ Н.

Во время проведения натурных исследований установлено, что $F_{извл.общ} = 2346$ Н [10].

Исходя из исследований можно предложить алгоритм определения технологических параметров оборудования для демонтажа авиационных боевых припасов.

С учетом технологических допусков на размеры посадочных мест элементов снаряжения боеприпаса определяется максимальное значение скорости соударяемых частей технологического оборудования – инерционной установки, гарантирующее полное извлечение пули из гильзы в момент соударения.

Максимальное значение скорости

$$V_{max} = \frac{F_{извл.общ} \cdot T^2}{m_{пули}}, \quad (4)$$

где $F_{извл.общ}$ – общее значение извлекающего пулю усилия, зависящее от вида обжима дульца гильзы патрона;

T – время движения контейнера в направляющих инерционной установки;

$m_{пули}$ – масса пули демонтируемого образца боеприпаса.

Общее значение извлекающего пулю усилия с учетом конструктивных особенностей обжатия дульца гильзы таково

$$F_{извл.общ} = F_{извл} + F_{извл}^* \quad (5)$$

Заключение

Для численного моделирования напряженно-деформируемого состояния в узлах крепления элементов снаряжения авиационных боеприпасов в наибольшей

степени подходит метод конечных элементов (МКЭ), который, учитывая взаимное влияние деформируемых тел и снятие напряжений за счет деформаций ползучести в материале гильзы, позволяет провести более точный расчет и получить достоверные данные о величине и характере изменения напряжений и деформаций.

Применение МКЭ для численного моделирования НДС в узлах крепления элементов снаряжения боеприпасов позволяет не только получить данные о напряжениях и деформациях объектов исследования в условиях «классического» натяга, но и определить параметры НДС в условиях действия дополнительного технологического фактора – перекоса.

Значения извлекающего пулю усилия, полученные на основе данных численного моделирования МКЭ, удовлетворительно коррелируются с данными проведенных экспериментальных исследований.

Предложен алгоритм расчета технологических параметров для демонтажа элементов снаряжения авиационных боеприпасов. Алгоритм учитывает конструктивные особенности образцов патронов, подвергающихся утилизации, и ряд технологических факторов, имеющих отношение к условиям обжима и крепления их компонентов.

При этом также учитываются физико-механические характеристики материалов, применяемых для изготовления элементов снаряжения унитарных патронов.

Список литературы

1. Нечипорук Н.В., Полищук Е.А., Кобрина Н.В. Исследование процесса демонтажа авиационных мелкокалиберных боеприпасов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». - 2006. - Вып. 30. - С. 179 - 182.
2. Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. Соппротивление материалов. – К.: Вища шк., 1973. – 668 с.
3. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. - М.: Наука, 1979. – 560 с.
4. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Строитель, 1970. – 308 с.
5. Данилин Г.А., Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2005. – 374 с.
6. Кириллов В.М., Сабельников В.М. Патроны стрелкового оружия. – М.: Машиностроение, 1980. – 372 с.
7. Высокоскоростные ударные явления / Пер. с англ. В.А. Васильева; Под ред. проф. В.Н. Николаевского. - М.: Мир, 1973. – 533 с.
8. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз, 1962. – 704 с.
9. Газодинамические основы внутренней баллистики / Бетехтин С.А., Винницкий А.М., Горохов М.С. и др. - М.: Оборонгиз, 1957. – 384 с.
10. Нечипорук Н.В., Полищук Е.А., Кобрина Н.В. Экспериментальные исследования параметров инерционного процесса демонтажа элементов снаряжения авиационных боеприпасов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». - 2006. - Вып. №3(29). - С. 5 - 9.