

## ЗБРОЯ, ЗАСОБИ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ТА АКТИВНОЇ ОБОРОНИ

УДК 621.891

**В.Г. Писаренко,**  
кандидат технических наук

### ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ИЗНОСА СТВОЛОВ СПОРТИВНОГО И СНАЙПЕРСКОГО ОРУЖИЯ

*Приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния стволов спортивного и снайперского оружия в условиях высокоскоростного трения, указаны пути для оценки износа. Предложена модель накопления трибоповреждений в стволах стрелкового оружия, учитывающая особенности высокоскоростного трения, основанная на термокинетической теории разрушения.*

**Ключевые слова:** износ стволов, трибоповреждения, термокинетическая теория разрушения.

*Наведено результати розрахунків напружено-деформованого стану стволів спортивної та снайперської зброї в умовах швидкісного тертя, намічено шляхи для оцінювання зношування. Запропоновано модель накопичення трибопошкоджень у стволах стрілецької зброї, яка враховує особливості швидкісного тертя і ґрунтується на термокінетичній теорії руйнування.*

**Ключові слова:** зношування стволів, трибопошкодження, термокінетична теорія руйнування.

*The results of computation of the tense-deformed state of sporting and sniper weapon's trunks in the conditions of high-speed friction are presented, ways for an estimation of the throttle are determined. Model of an accumulation of tribo damages in the trunks of rifle weapon is offered, taking into account the features of high-speed friction, based on the thermo-kinetic theory of destruction.*

**Keywords:** deterioration of trunks, tribo damages, thermo kinetic theory of destruction.

Одним из основных критериев предельного состояния спортивного и снайперского оружия является ухудшение точности, оцениваемое степенью группирования точек попадания. Превалирующим фактором, определяющим ухудшение точности стрелкового оружия, и соответственно, его ресурс, являются величина, интенсивность и характера износа канала ствола как в диаметральном, так и осевом направлениях. В данном случае под ресурсом стволов стрелкового оружия понимается количество выстрелов, выполняемых до достижения стволом критерия предельного состояния.

Исследования процессов износа в каналах стволов огнестрельного оружия таких ученых, как: Д.К. Чернов, А.А. Благонравов, В.Е. Слухоцкий, Н.Ф. Дроздов, Ю.В. Чуев, А.Г. Шипунов и многих других, были посвящены в основном артиллерийским стволам и стволам автоматического оружия стреляющего очередями [1, 2].

Износу каналов стволов спортивного и снайперского оружия, стреляющего одиночными выстрелами, внимания было уделено явно недостаточно. Таким образом, проблема повышения ресурса стволов спортивного и снайперского оружия является весьма актуальной и недостаточно изученной.

Под износом ствола понимаются необратимые изменения поверхности канала ствола в результате выстрела. Применительно к спортивному и снайперскому оружию износ канала ствола является результатом его взаимодействия с пулей и пороховым газом, образующимся в результате горения порохового заряда. Износ ствола стрелкового оружия – более широкое понятие, чем просто изменение геометрических размеров и формы канала. Это интегральная характеристика, которая включает и остаточные деформации поверхности, и образование трещин, структурные и химические превращения материала ствола и т.д.

Проблема повышения ресурса стрелкового оружия является сложной комплексной задачей и не может быть решена без основательного исследования факторов, влияющих на ресурс ствола, и их взаимосвязи с геометрическими параметрами системы “ствол-патрон”.

Стволы стрелкового оружия относятся к трибосистемам, работающим в особо сложных условиях. Они подвержены динамическому воздействию высоких давлений, температур и механическому воздействию пули, движущейся с натягом в канале ствола в условиях высокоскоростного трения. К особенностям системы “ствол-патрон” спортивного и снайперского оружия следует отнести и то, что система работает в условиях одиночной стрельбы.

Под факторами, влияющими на протекание процессов износа, понимают изменяющиеся во времени и по длине канала ствола характеристики процессов, воздействующих на приповерхностный слой канала ствола и протекающих в стволе в период выстрела, при горении пороха и скольжении пули по нарезакам.

Ухудшение точности снайперского и спортивного оружия может наступать как из-за диаметального износа канала ствола, когда не обеспечивается необходимая скорость поступательного и вращательного движения пули и, соответственно, устойчивость ее движения по траектории, так и вследствие неравномерного износа по длине ствола, создающего дополнительные динамические воздействия при выходе пули из канала ствола.

Температурное влияние на процессы изнашивания каналов стволов, благодаря профессору Д.К. Чернову, показавшему, что снижение ресурса стволов происходит по причине трещинообразования на поверхности канала, вследствие резких термических изменений в процессе выстрела, изучено основательно. В то же время следует отметить, что исследований влияния на процессы изнашивания трибомеханического воздействия ведущих элементов пуль проведено недостаточно [3, 4, 5].

Целью данной работы является изучение особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего вследствие динамического взаимодействия системы “ствол-пуля” и его влияния на протекание процессов изнашивания стволов спортивного и снайперского оружия.

Можно перечислить ряд основных воздействий, влияющих на напряженно-деформированное состояние ствола стрелкового оружия в процессе выстрела, а именно:

- воздействие сил давления пороховых газов, вызывающих напряжение и деформации в стенках ствола;
- воздействие сил трения пули о поверхность канала ствола и сил давления ведущего элемента на боевые грани нарезов;
- воздействие сил инерции, возникающих вследствие сопротивления повороту пули в процессе врезания.

Учитывая динамический характер воздействий, результаты расчетов напряженно-деформированного состояния, используемые для прочностного анализа и проектирования стволов [2], нельзя использовать для оценки процессов изнашивания системы “ствол-пуля”. Допущения, которые принимаются при прочностных расчетах и сводят задачу к расчету изотропной цилиндрической трубы, подверженной внутреннему статическому давлению, а именно:

- допущение о том, что сила трения о поверхность ствола вызывает пренебрежимо малые осевые напряжения в стенках ствола;
- давление ведущего устройства на боевые грани нарезов вызывает пренебрежимо малые напряжения кручения;
- нагрузки, испытываемые стволом при выстреле, носят статический характер и неприемлемы при анализе влияния напряженно-деформированного состояния на процессы изнашивания.

Еще одной важной особенностью, которую необходимо учитывать при анализе процессов изнашивания стволов, является то, что система “ствол-пуля” является трибосистемой, работающей в условиях высокоскоростного трения.

Авторы исследований, связанных с изучением процессов изнашивания в условиях высокоскоростного трения, отмечают ряд особенностей протекания процессов изнашивания в зоне трения при скоростях скольжения, превышающих 100 м/с. В первую очередь, отмечается явление значительного падения значений коэффициента трения для всех пар трущихся материалов. Среди работ, связанных с экспериментальными исследованиями высокоскоростного трения, можно отметить работу авторов [6], которыми получены значения коэффициентов трения при нагрузках до 150 МПа и скоростях скольжения достигавших 200 м/с. В докладе [7] авторами проведены результаты экспериментальных исследований высокоскоростного трения сталь по стали, которые показывают, что коэффициент трения в данном случае может уменьшаться до значений 0,0001.

Учитывая вышесказанное, характеристики полей напряжений стволов стрелкового оружия должны определяться с учетом динамических эффектов, происходящих в условиях высоких скоростей скольжения, и учитывать изменение коэффициента трения, как функции скорости скольжения.

Исходя из фундаментальности физических законов, положенных в основу термокинетической теории разрушения [8], логично предположить, что процессы накопления трибоповреждений, происходящие при механическом воздействии пули, движущейся с натягом в канале ствола, будут подчиняться основным закономерностям данной теории. Такой подход делает возможным исследование в явном виде совместного влияния на разрушение напряженного состояния и температурных эффектов, которые являются превалирующими факторами,



определяющими процессы накопления трибоповреждений в условиях высоких скоростей скольжения и динамических нагрузок.

Согласно термокинетической теории, скорость накопления повреждений задается соотношением [15]:

$$V_{TP}(x, y, z, t) = \frac{dP(x, y, z, t)}{dt} = \frac{1}{\tau^*} \exp\left(-\frac{U - \gamma \cdot \sigma(x, y, z, t)}{k \cdot T(x, y, z, t)}\right), \quad (1)$$

где  $U$  – энергия активации;

$\tau^*$ ,  $\gamma$  – характеристики материала;

$k$  – постоянная Больцмана;

$\sigma(x, y, z, t)$  – характеристика поля напряжений в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ ;

$T(x, y, z, t)$  – абсолютная температура в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ .

Исходя из вышеприведенного анализа, следует внести некоторые уточнения в зависимость (1), для учета особенностей процессов, происходящих в условиях высокоскоростного трения. А именно, следует обратить внимание на то, что характеристики полей напряжений  $\sigma(x, y, z, t)$  и температур  $T(x, y, z, t)$  должны определяться с учетом динамических эффектов, происходящих в условиях высоких скоростей скольжения, и учитывать изменение коэффициента трения как функции скорости скольжения.

В качестве модели трения можно принять обобщенную модель Кулона-Амонтона с учетом эффекта Штрибека, которая учитывает изменения коэффициента трения от скорости скольжения:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \cdot e^{-\beta v}, \quad (2)$$

где  $\mu_d$  – динамический коэффициент трения;

$\mu_s$  – коэффициент трения покоя;

$v$  – относительная скорость скольжения в точке контакта;

$\beta$  – показатель степени;

С учетом вышесказанного, уравнение (1) можно представить следующим образом:

$$V_{TP}(x, y, z, t) = \frac{dP(x, y, z, t)}{dt} = \frac{1}{\tau^*} \exp\left(-\frac{U - \gamma \cdot \sigma_n(x, y, z, \mu, t)}{k \cdot T_D(x, y, z, \mu, t)}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma_n(x, y, z, \mu, t)$  – характеристика поля напряжений в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$  определенная из динамического анализа;

$T_D(x, y, z, \mu, t)$  – характеристика поля температур в точке с координатами в момент времени определенная из динамического анализа.

Для решения дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии в координатах Лагранжа, целесообразно прибегнуть к численным методам, используя разработанные и хорошо апробированные на сегодня пакеты динамического анализа LS-Dyna, ANSYS Autodyn.

На рис. 1–5 показаны некоторые результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния при движении пули в канале ствола нарезного оружия для различных моментов времени.

Для отдельной оценки степени влияния каждого из факторов на НДС ствола в данной модели рассматривалось напряженно-деформированное состояние, которое возникает при движении пули по каналу ствола под действием давления пороховых газов, без учета давления пороховых газов на стенки ствола. Адекватность расчетной модели оценивалась по результатам контрольных испытаний.

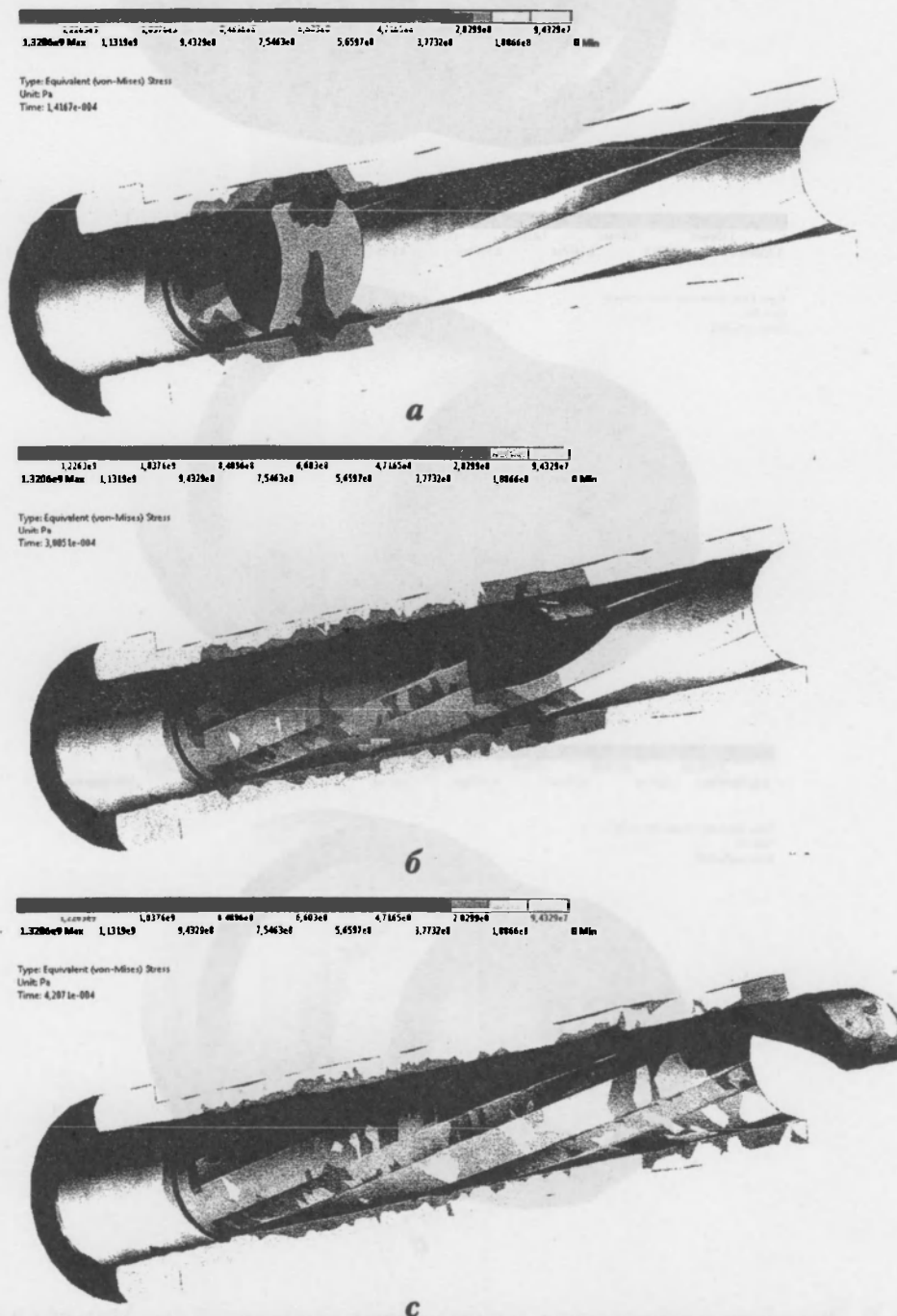
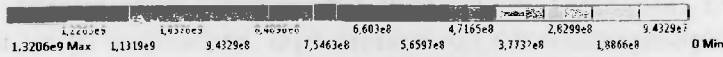
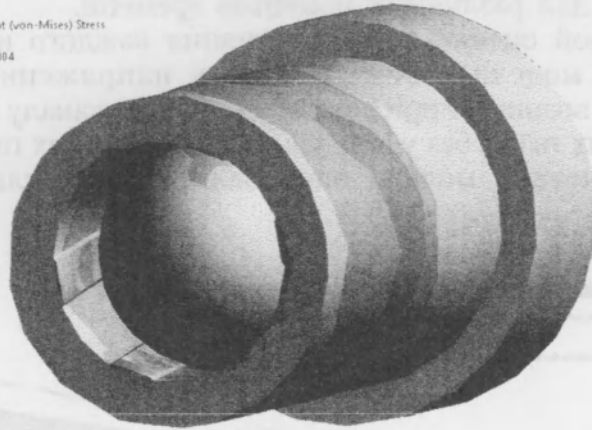


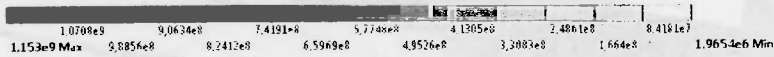
Рис. 1. Эволюция распределения эквивалентных напряжений (по Мизесу) при движении пули по каналу ствола в момент времени, сек: *a* –  $1,42 \cdot 10^{-4}$ ; *b* –  $3,01 \cdot 10^{-4}$ ; *c* –  $4,21 \cdot 10^{-4}$



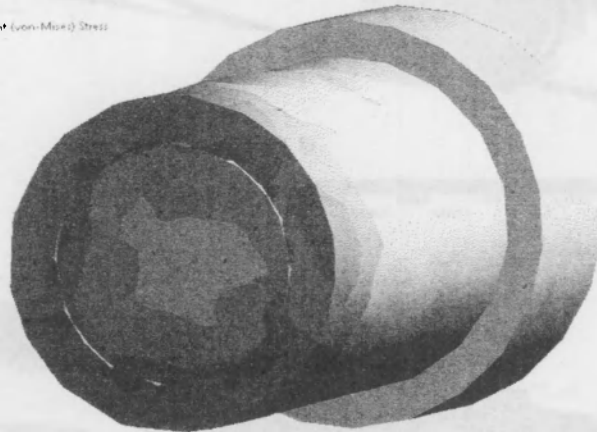
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1.0732e-004



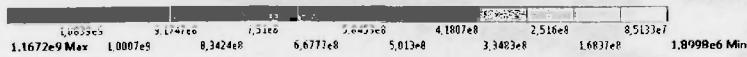
*a*



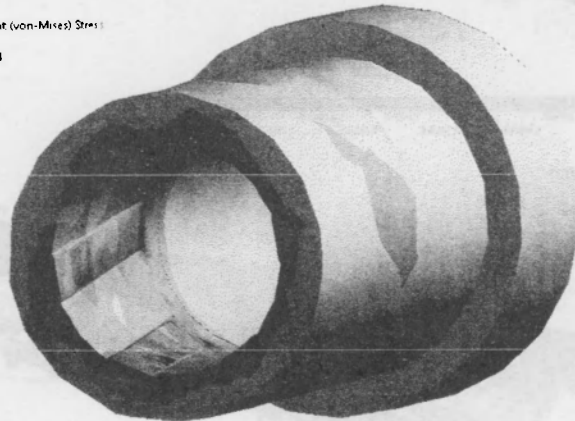
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1.7e-004



*b*

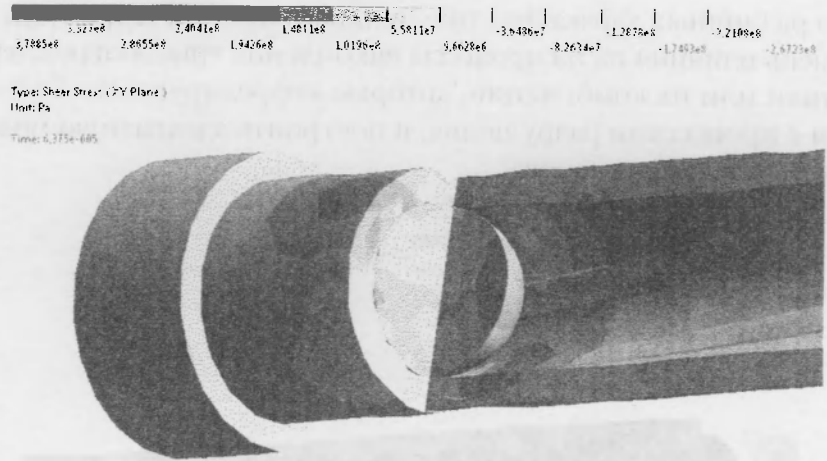


Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 4.25e-004

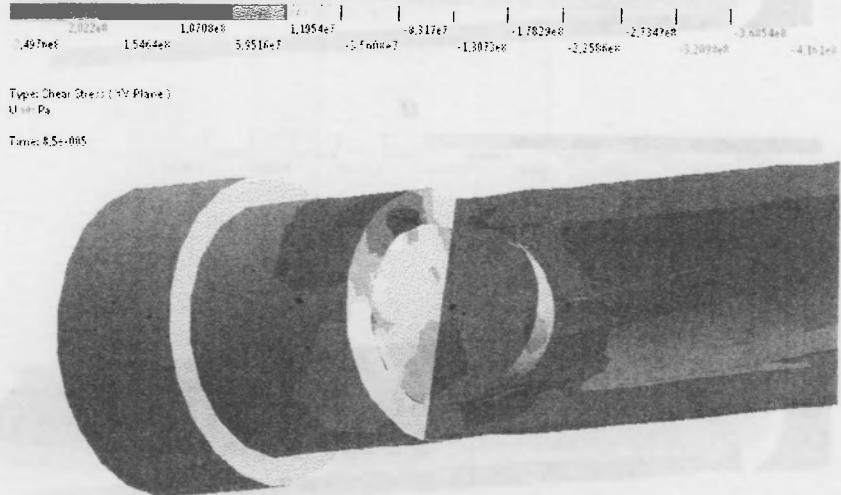


*c*

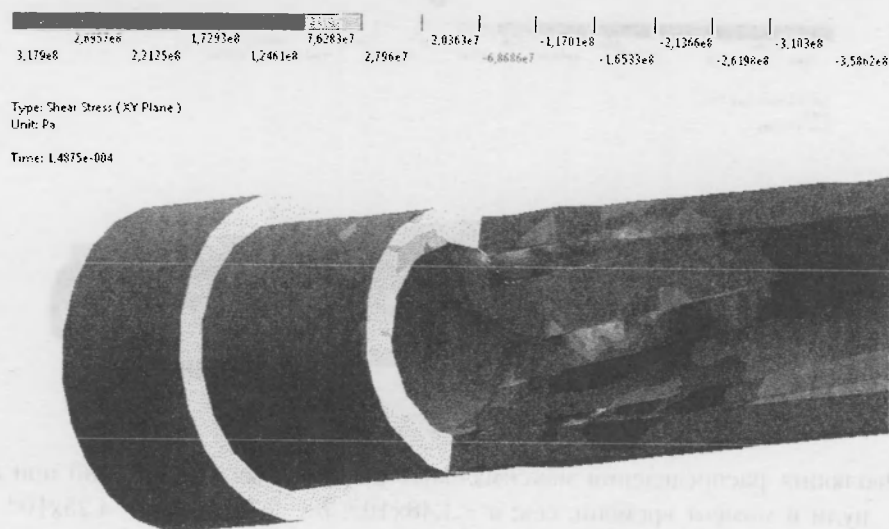
Рис. 2. Еволюція розподілу еквівалентних напружень (по Мізесу) в одному з радіальних сечень каналу ствола при русі пулі в момент часу: сек: *a* –  $1,07 \cdot 10^{-4}$ ; *b* –  $1,7 \cdot 10^{-4}$ ; *c* –  $4,25 \cdot 10^{-4}$



**a**



**b**



**c**

Рис. 3. Распределение касательных напряжений в плоскости XY при движении пули в момент времени, сек: *a* –  $6,37 \cdot 10^{-5}$ ; *b* –  $8,54 \cdot 10^{-5}$ ; *c* –  $1,484 \cdot 10^{-4}$



Анализ различных характеристик поля напряжений  $\sigma_p(x, y, z, \mu, t)$  позволяет оценить степень влияния их на процессы накопления трибоповреждений, выявить характеристики или их комбинации, которые коррелируют наиболее существенным образом с процессами разрушения, и построить адекватную модель накопления трибоповреждений и износа.

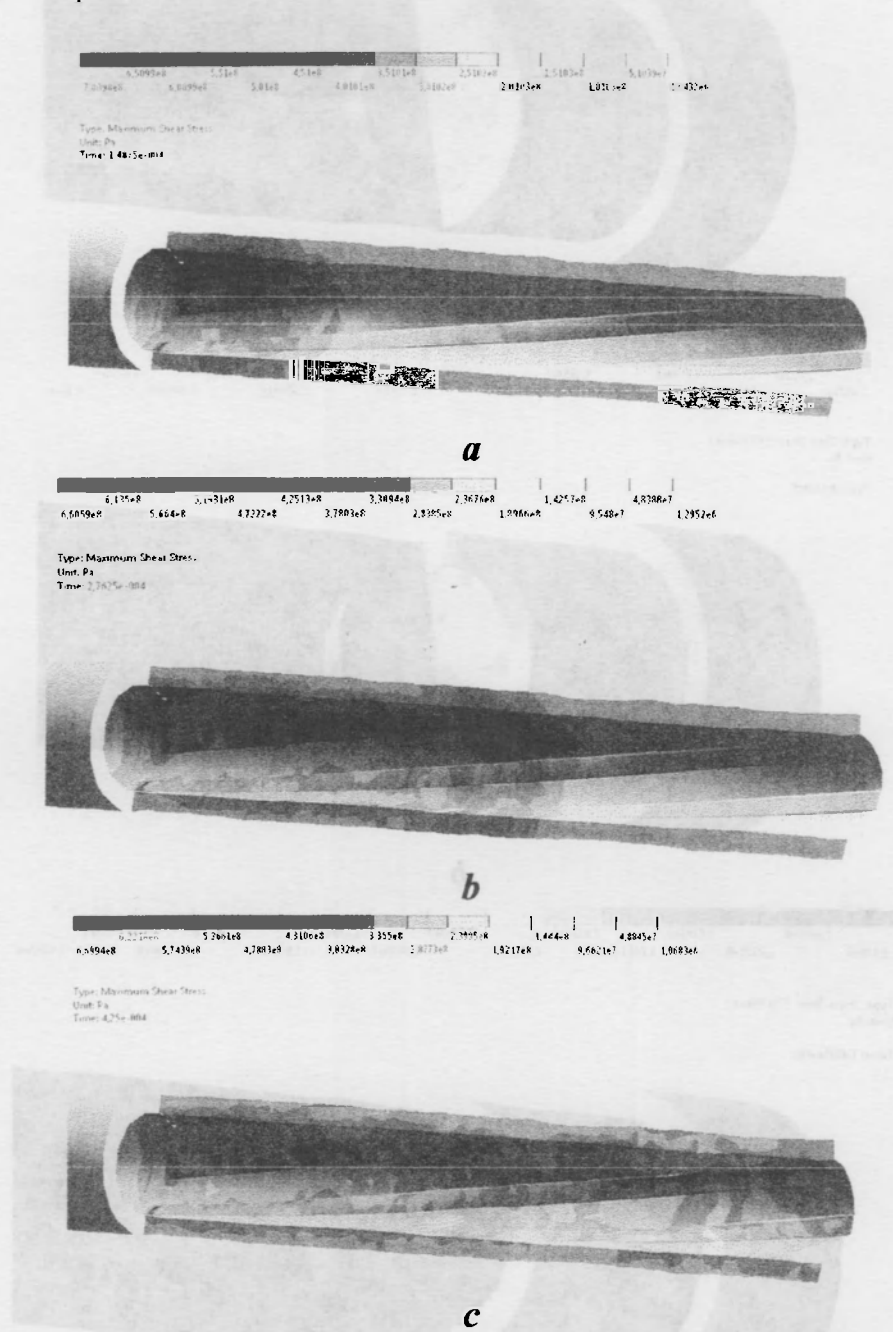


Рис. 4. Эволюция распределения максимальных касательных напряжений при движении пули в момент времени, сек:  $a - 1,48 \times 10^{-4}$ ;  $b - 2,76 \times 10^{-4}$ ;  $c - 4,25 \times 10^{-4}$

Анализ результатов расчета напряженно-деформированного состояния при движении пули по каналу ствола (рис. 1–4) хорошо согласуется с результатами экспериментальных данных, полученными в работе [3], где обращается внимание



на мозаичную картину напряжений в приповерхностном слое ствола. Однако следует отметить, что первопричиной образования мозаичного характера напряжений поверхностного слоя канала ствола является динамический характер взаимодействия пули со стволом, а не частичное оплавление и перенос (“омеднение”) материала оболочки пули на различные участки поверхности канала ствола и изменения вследствие этого коэффициента трения, как предполагали авторы [3]. Появление “омедненных” участков поверхности ствола после выстрела, является следствием мозаичной картины распределений напряжений и деформаций ствола.

Анализ эволюции распределения эквивалентных пластических деформаций канала ствола (рис. 5) показывает, что пластические деформации являются существенным фактором, который необходимо учитывать при оценке износа ствола.

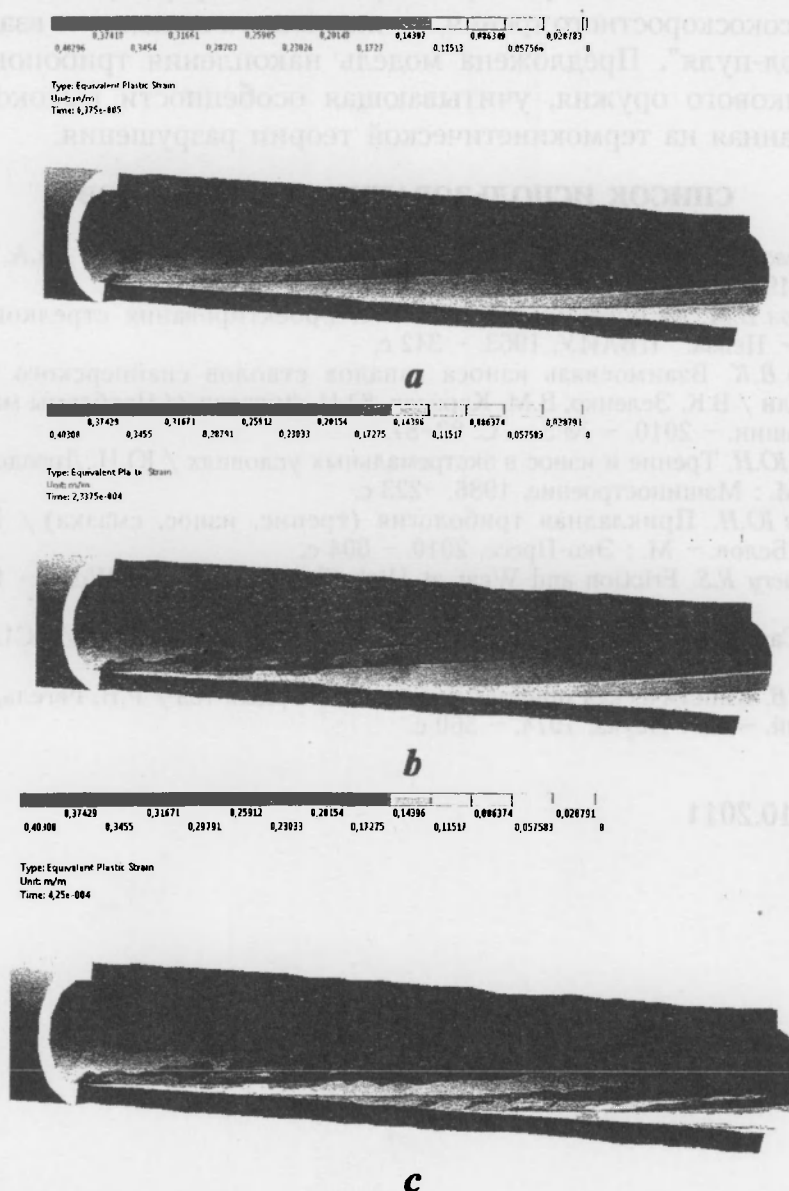


Рис. 5. Эволюция распределения эквивалентных пластических деформаций при движении пули в момент времени, сек:  $a - 6,37 \cdot 10^{-5}$ ;  $b - 2,34 \cdot 10^{-4}$ ;  $c - 4,25 \cdot 10^{-4}$

Характер распределения эквивалентных пластических деформаций (рис. 5) показывает, что максимальные пластические деформации в канале ствола возникают в период врезания пули вследствие существенных касательных напряжений, возникающих за счет сопротивления повороту пули в процессе врезания и во время выхода пули из канала ствола, вследствие больших скоростей поступательного и вращательного движения пули. При выходе пули из канала ствола центробежные силы вызывают существенные тангенциальные напряжения в оболочке. Наиболее существенным пластическим деформациям подвержены грани боевых нарезов ствола, что в значительной мере определяет величины износа ствола и его ресурс.

На основании проведенного анализа намечены пути для оценки износа стволов спортивного и снайперского оружия, показана необходимость учитывать особенности динамического характера напряженно-деформированного состояния в условиях высокоскоростного трения, возникающего вследствие взаимодействия системы "ствол-пуля". Предложена модель накопления трибоповреждений в стволах стрелкового оружия, учитывающая особенности высокоскоростного трения, основанная на термокинетической теории разрушения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Благодаров А.А.* Основы проектирования автоматического оружия / А.А. Благодаров. – М. : Оборонгиз, 1940. – 484 с.
2. *Кириллов В.М.* Основания устройства и проектирования стрелкового оружия / В.М. Кириллов. – Пенза. : ПВАИУ, 1963. – 342 с.
3. *Зеленко В.К.* Взаимосвязь износа каналов стволов снайперского вооружения с конструкцией пули / В.К. Зеленко, В.М. Королев, Ю.Н. Дроздов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 3. – С. 83–87.
4. *Дроздов Ю.Н.* Трение и износ в экстремальных условиях / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М. : Машиностроение, 1986. – 223 с.
5. *Дроздов Ю.Н.* Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. – М. : Эко-Пресс, 2010. – 604 с.
6. *Montgomery R.S.* Friction and Wear at High Sliding Speeds // *Wear*. – 1976. – Т. 36. – P. 275–298.
7. *Lim J.* Cambridge University Internal Report / Michael F. Ashby // CUED, C.-mat. – 1986. – Т. 123.
8. *Регель Р.В.* Кинетическая природа прочности твердых тел / Р.В. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.

Отримано 12.10.2011