

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОЙ РЕАКЦИИ ПРОЦЕССА ВРЕЗАНИЯ
ВЕДУЩЕГО ПОЯСКА НОВОГО ТИПА ПРИ НАГРУЖЕНИИ**
**THE RESEARCH OF THE NEW TYPE DRIVING BELT INITIAL REACTION
OF THE INCISING PROCESS UNDER LOADING**

А.В. Гуськов¹, К.Е. Милевский¹, чл.-корр. РАРАН Е.А. Хмельников², М.С. Хребтова¹

¹ Новосибирский государственный технический университет,

² Нижнетагильский технологический институт

A.V. Guskov, K.E. Milevsky, E.A. Khmelnikov, M.S. Khrebtova

Изменение конструкции ведущего пояска артиллерийского боеприпаса к нарезному оружию — один из актуальных способов повышения технических характеристик артиллерийского снаряда, таких как кучность и дальность выстрела. Исследование условий взаимодействия пары материалов «ведущий поясок — канал ствола» позволяет определить наиболее выгодные условия с точки зрения эффективного применения артиллерийского снаряда и обосновать работоспособность предлагаемой конструкции.

Ключевые слова: ведущий поясок нового типа, артиллерийский снаряд, нагружение.

Changing the artillery ammunition driving belt design for a rifled weapon is one of the most important ways to improve the technical characteristics of an artillery projectile, such as accuracy and firing range. Investigation of the conditions for the interaction of a material pair "driving belt — barrel bore" makes it possible to determine the most favorable conditions for the optimal artillery projectile design and to substantiate the efficiency of the proposed design.

Keywords: driving belt of a new type, artillery shell, loading.

В настоящее время весьма актуален вопрос поиска способов повышения технических характеристик (точность, дальность и т.д.) артиллерийского снаряда при уменьшении его себестоимости. Одним из таких способов является изменение конструкции ведущего пояска (ВП) [1].

Использование современных мощных систем артиллерийских орудий приводит к увеличению скорости снаряда за счет повышения энергетических параметров пороховых зарядов. Условия, создаваемые этими зарядами, а именно — высокие рабочие давления пороховых газов и высокие скорости скольжения артиллерийских снарядов (АС) внутри канала ствола (КС), приводят к тому, что материал ведущего пояска (ВП) подвергается экстремальным воздействиям

при выстреле. Традиционная конструкция ведущего пояска уже не соответствует предъявляемым к нему требованиям.

С целью повышения технических характеристик АС (таких как кучность и дальность выстрела) предлагается использовать конструкцию АС с ВП, выполненным из материала корпуса и являющимся конструктивной частью корпуса — ведущий поясок нового типа (ВПНТ) [1–6]. Это подразумевает замену материала ВП с применяемой штатно меди на сталь.

При исследовании процесса врезания ВПНТ в нарезы КС можно руководствоваться двумя различными подходами. Первый заключается в анализе физических процессов, протекающих при взаимодействии ВП с каналом ствола. Это

определение первичной реакции, остаточной деформации корпуса АС, коэффициентов трения, скольжения, металлография и т.д.

Второй заключается в оценке энергетических процессов на начальных этапах выстрела АС, то есть, определение доли выделяемой энергии на процесс формирования профиля ведущего пояска как по затратам энергии, так и по времени.

При выстреле АС общая энергия E вырабатывается при сгорании порохового заряда [7–9]. В дальнейшем она расходуется на следующие процессы:

- формирование профиля ВП, E_{ϕ} ;
- скольжение АС по КС, $E_{ск}$;
- кинетическая энергия АС, $E_{движ}$;
- откат орудия, $E_{отката}$.

Описанное соотношение можно выразить следующим образом:

$$E = E_{\phi} + E_{ск} + E_{движ} + E_{отката} \quad (1)$$

При анализе формулы (1) использованы допущения о том, что E от выстрела к выстрелу для снарядов одного калибра остаётся постоянной (пороховой заряд одинаков), как и откат для одного и того же орудия ($E_{отката}$). Тогда для обеспечения максимальной и постоянной от выстрела к выстрелу энергии $E_{движ}$, которая обеспечивает дальность полёта АС и его кучность, необходимо выполнить следующее условие:

$$E_{движ} = E - E_{ВП\ min} - E_{отката} = \text{const},$$

где $E_{ВП\ min} = E_{\phi\ min} + E_{ск\ min}$ — минимальная энергия, затрачиваемая на работу ВП, которая складывается из минимальных E_{ϕ} и $E_{ск}$.

Это означает, что для достижения максимальной эффективности АС в целом E_{ϕ} и $E_{ск}$ также должны по возможности быть минимальны и постоянны от выстрела к выстрелу при условии соблюдения конструкцией ВП всех предъявляемых к нему требований, например, таких как обеспечение обтюрации и центрирование в КС.

Процесс формирования профиля ВП при взаимодействии его с каналом ствола характерен интенсивным ускорением процесса нагружения и значительным течением материала, которое зависит от геометрии ведущего пояска. Классическая конструкция, включающая медный ВП в канавке типа «ласточкин хвост», подразумевает перенос

материала с одного торца на другой в процессе продавливания, как показано на рис. 1, а.

Деформация сопровождается высокотемпературной деформацией и скольжением материала ВП по поверхности канала ствола, что при определенных условиях вызывает его омеднение, поскольку приповерхностный слой ВП нагревается до температуры плавления [10].

Более того, величина реакции ВП при врезании в нарезы КС определяет воздействие на корпус АС и должна учитываться при расчете его прочности. Это критически важно для снарядов с ведущими поясками, установленными в канавках, так как в указанных областях толщина корпуса минимальна.

В то же время, предлагаемая конструкция ВПНТ, которая имеет вид нескольких кольцевых выступов на корпусе АС, разделенных между собой канавками, обеспечивает меньшие деформации за счет управляемой деформации. Схема взаимодействия показана на рис. 1, б.

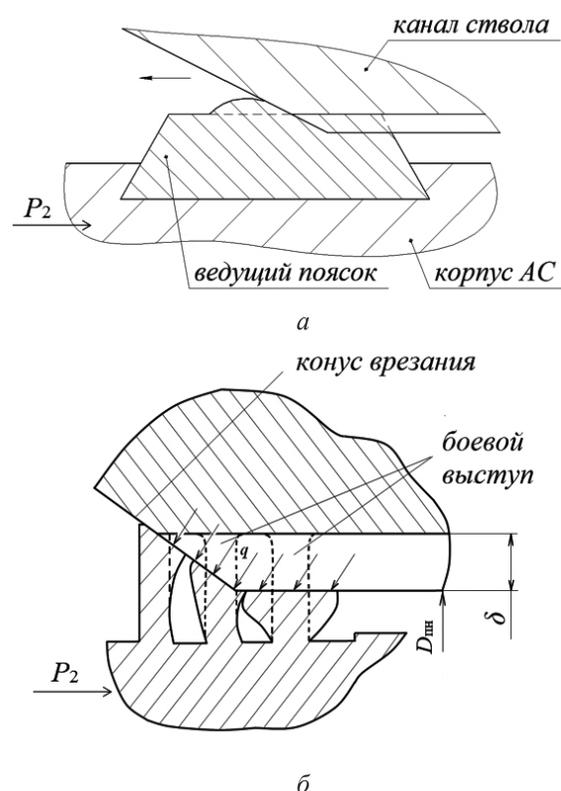


Рис. 1. Конструкции ведущих поясков:
 а — типовой ведущий поясок,
 б — ведущий поясок нового типа;
 D_{mn} — диаметр канала ствола по полю нарезов,
 P_2 — усилие продавливания, q — усилие деформации,
 δ — высота полей нарезов

В данной работе представлено исследование процесса нагружения ведущего пояска нового типа, проанализированы полученные результаты.

Для исследования пластической деформации материала ВП при врезании (формирование впадины между выступами) использовался экспериментальный метод двухосного сжатия, основанный на ступенчатой деформации прямоугольного выступа ведущего пояска нового типа пуансоном с рабочей поверхностью, соответствующей нарезку канала ствола артиллерийской системы.

Были исследованы несколько образцов, имеющих вид фрагментов корпусов артиллерийских снарядов с ВПНТ и выполненных из материала корпуса. На рис. 2 показана сервогидрав-

лическая испытательная система Instron 8801, на которой осуществлялись измерения, а также пуансон, имитирующий нарез канала ствола.

Особенностями указанной системы является то, что она способна выдавать нагрузку до 100 кН, а рабочий ход поршня составляет около 75 мм.

В ходе работ производилось нагружение установленных в оправку образцов, причем нагрузка прикладывалась статически с незначительной скоростью хода. С целью сопоставления полученных результатов и измерения геометрических размеров отпечатков пуансона, нагрузки на каждый опыт давались разные с одновременной записью усилия реакции образца ведущего пояска.

На рис. 3 показаны примеры исследуемых образцов после проведения работ. Пуансон последовательно внедрялся в образец на заданную глубину, производился замер возникающих при этом усилий.

При этом образец 1 представляет собой единственный кольцевой выступ ВПНТ, а образцы 2 и 3 — ВПНТ, максимально приближенный к предлагаемому и состоящий из нескольких кольцевых выступов, разделенных канавками. Указаны характеристики образцов ВП: высота выступа h , мм; толщина выступа c , мм.

Геометрические характеристики выступов образцов разнятся, однако материал, из которых они выполнены, соответствует материалу типовых артиллерийских снарядов.

Кроме того, внешние диаметральные размеры ВП образцов и ширина ВП соответствовали существующим типовым ВП, выполненным из меди на типовых корпусах АС.

После обработки полученных в ходе исследования результатов получена зависимость удельного давления на ВП, $q = F/S$, кН/мм², где F — измеренная сила, с которой осуществлялось продавливание, кН, S — площадь полученного отпечатка, к которому прикладывалась сила, мм², от глубины внедрения пуансона h , мм.

Как показывает зависимость на рис. 4, величина удельного давления в единичном кольцевом выступе ВПНТ намного меньше, чем для ВПНТ из пяти кольцевых выступов. При этом нагрузка растет практически в линейной зависимости от глубины внедрения пуансона. Установлено, что для глубины внедрения $h = 1,5$ мм удельное



а



б

Рис. 2. Материальное обеспечение измерений: а — сервогидравлическая испытательная система Instron 8801 с установленным в неё приспособлением для проведения испытаний; б — пуансон

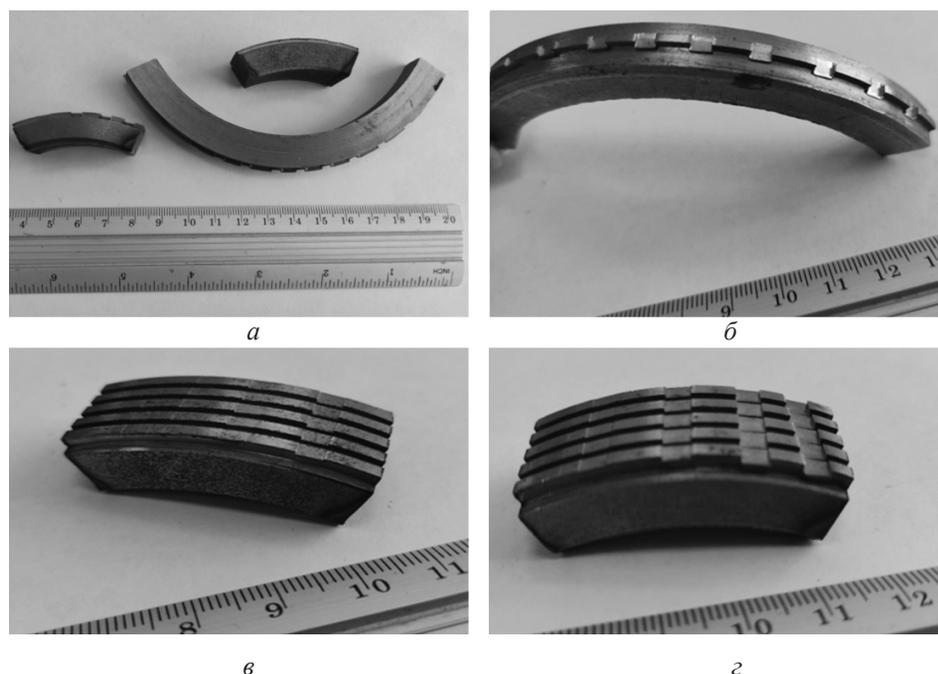


Рис. 3. Образцы корпусов артиллерийского снаряда с ведущим пояском нового типа после нагружения: а — вертикальная проекция всех образцов; б — образец 1 ($h = 1,5$ мм, $c = 1,9$ мм); в — образец 2 ($h = 1,7$ мм, $c = 2,3$ мм); г — образец 3 ($h = 2,1$ мм, $c = 2,2$ мм)

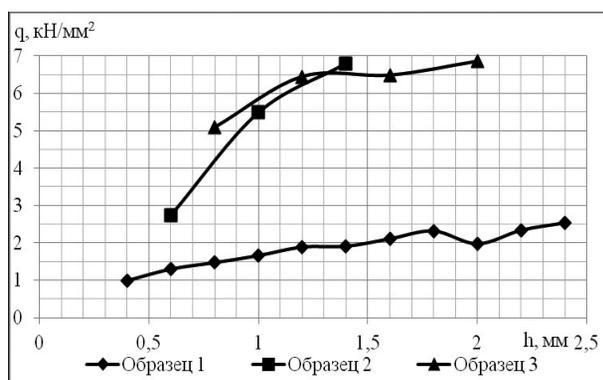


Рис. 4. Зависимость удельного давления в ведущем пояске нового типа, q , кН/мм², от глубины внедрения пуансона, h , мм

давление в исследуемых образцах ВП составляло около 6,5 кН/мм².

Информация, представленная на рис. 4, подтверждает, что усилие реакции единичного кольцевого выступа ВПНТ намного меньше, чем реакция ВП с полным набором выступов.

Следует отметить соизмеримость величин удельных контактных давлений первичной реакции ВП под полем нареза для исследуемых материалов.

Вид зависимости величины удельного давления от степени деформации при двухосном

сжатии показан на рис. 5 и свидетельствует о трех участках при формировании боевого выступа:

– участок А — период выбора зазоров на установке и упруго-пластическая деформация материала пояска в диапазоне изменения ϵ от 0 до 0,15;

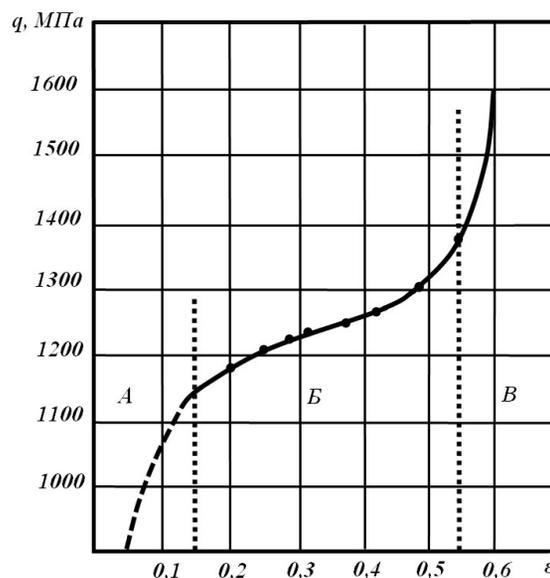


Рис. 5. Зависимость удельного давления двухосного сжатия от степени деформации типового материала ведущего пояска $q = f(\epsilon)$

– участок *B* — формирование боевого выступа пояска при ε от 0,15 до 0,55;

– участок *B* — при $\varepsilon > 0,55$ деформация сжатия материала ВП по дну и полю нареза со значительным ростом удельного давления.

Значительное увеличение удельного давления на участке *B* подтвердило необходимость ограничения коэффициента деформации материала ведущего пояска при проектировании ВПНТ ($\varepsilon \leq 0,55$).

В связи с этим, на следующем этапе исследований выполнена серия экспериментов для установления зависимости удельного давления $q = f(\varepsilon)$ от степени относительной деформации для конструкции ВП нового типа.

В данном случае:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - y_i}{h_0}, \quad (2)$$

где h_0 — исходная величина (высота выступа); y_i — текущая глубина внедрения.

Величина степени деформации ε материала выступа однозначно определяет один из основных параметров ВПНТ — высоту выступа, так как $h = y_{\max} / \varepsilon$.

Максимальная величина y_i соответствует высоте нареза артиллерийской системы ($y_{\max} = \Delta$).

Поэтому исследовать влияние степени деформации ε на важный показатель работоспособности ведущего пояска нового типа — удельное контактное давление — необходимо в широком диапазоне изменения ширины и высоты единичного выступа.

Эксперименты по двухосному сжатию проведены на образцах с размерами единичного выступа шириной c от 1,4 до 2,0 мм и высотой h от 1,8 до 3,6 мм (таблица). Величина удельного давления q согласно методике определялась как отношение усилия на пуансоне к фактической площади контакта.

Зависимости $q = f(\varepsilon)$ подобны для исследованных кольцевых образцов ВПНТ с единичным выступом и соответствуют зависимостям удельного давления от степени относительной деформации для типовых ведущих поясков (рис. 6).

Испытано 5 серий образцов ВПНТ с различным соотношением h/c единичного выступа (более 30 образцов). Точность оценки контактного давления составляет $\pm 8\%$ при изменении предела текучести σ_{02} материала С60 от 350 до 440 МПа.

Таблица

**Параметры единичного выступа образцов ВПНТ
для процесса двухосного сжатия и результаты эксперимента**

№ образца	Толщина выступа, c , мм	Высота выступа, h , мм	Удельное давление, q , МПа	Относительная степень деформации, ε , %	№ образца	Толщина выступа, c , мм	Высота выступа, h , мм	Удельное давление, q , МПа	Относительная степень деформации, ε , %
141	1,20	2,23	1260	32	171	1,60	2,00	1250	30
142			1280	38	172			1350	40
143			1430	47	173			1420	50
144			1480	51	174			1670	60
145			1570	60	175			1850	70
146			1760	63	221			1400	46
147			2170	72	222			1570	50
					223	1,66	2,30	1770	55
131	1,59	1,58	1290	35	431	2,14	1,88	1310	31
132			1470	40	432			1380	41
133			1520	47	433			1460	45
134			1730	57	434			1640	47
135			1860	63	435			1730	54
136			2080	72	436			1890	60
								437	1850
				438	1960	75			

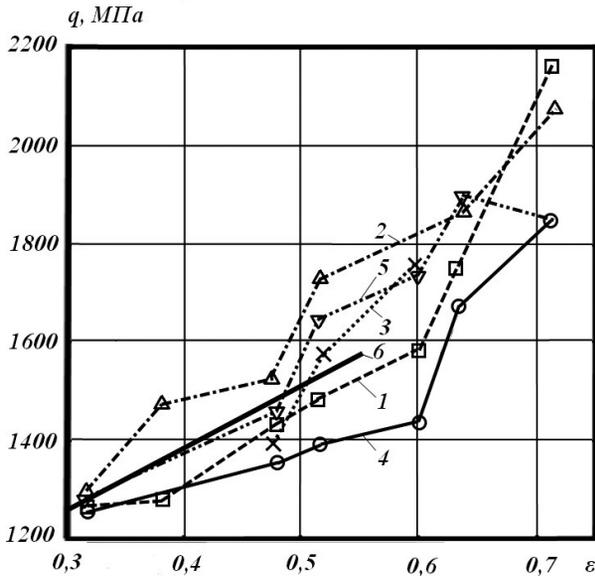


Рис. 6. Зависимость удельного давления в диапазоне степени деформации $0,3 \leq \epsilon \leq 0,7$ для образцов с различной геометрией единичного выступа: 1 — серия $c = 1,20$; $h = 2,23$; 2 — серия $c = 1,59$; $h = 1,58$; 3 — серия $c = 1,66$; $h = 2,30$; 4 — серия $c = 1,60$; $h = 2,00$; 5 — серия $c = 2,14$; $h = 1,88$; 6 — зависимость $q = f(\epsilon)$

По результатам статистической обработки экспериментов в выделенном диапазоне изменения степени деформации ($0,30 < \epsilon \leq 0,55$) проведена аппроксимация удельного давления от степени деформации для участка Б:

$$q = 1500\epsilon + 825.$$

На основании экспериментальных зависимостей проведен анализ величины работы двухосного сжатия, характеризующий энергетические затраты на пластическое деформирование материала ведущего пояска (формирование отпечатка поля нареза) исследуемых образцов. Величина работы двухосного сжатия единичного выступа A_c около 96 Дж.

Можно сделать вывод о том, что геометрические параметры ведущего пояска нового типа и удельное давление, необходимое для формирования боевого выступа, связаны между собой одним из основных параметров нарезной части канала ствола орудия — глубиной нареза Δ .

На третьем этапе проведены эксперименты по двухосному сжатию единичного выступа ведущего пояска на корпусах осколочно-фугасного

снаряда (ОФС) калибра 122 мм. По результатам опытов построена зависимость усилия от глубины внедрения нареза: $P = f(y)$.

При обработке результатов получена зависимость удельного контактного давления от степени деформации $q = f(\epsilon)$ (рис. 7).

Вид кривой $q = f(\epsilon)$ свидетельствует о наличии в процессе двухосного сжатия участка Б, на котором величина удельного давления линейно зависит от степени деформации и соответствует зависимости (2).

На этом участке увеличение величины удельного давления незначительно по отношению к участкам А и В.

Увеличение площади контакта «нарез КС — выступ ВП» происходит за счет свободного перемещения смещаемого объема $V_c = V'_c + V''_c$ с пластически деформируемого материала пояска вдоль нареза, как по направлению движения снаряда V'_c , так и в противоположную сторону V''_c (одностороннее удлинение отпечатка $c'(c'')$ от поля нареза) в процессе сжатия, что определяет линейный характер возрастания удельного давления на участке Б (рис. 8).

При заглублении рабочей части пуансона в материал ВП усилие деформирования возрастает. Повышение удельного давления сопротивления материала пластическому течению к моменту завершения формирования впадины (с учетом величины форсирования) по отношению к удельному давлению при $\epsilon = 0,5$ составляет 1,23 раза.

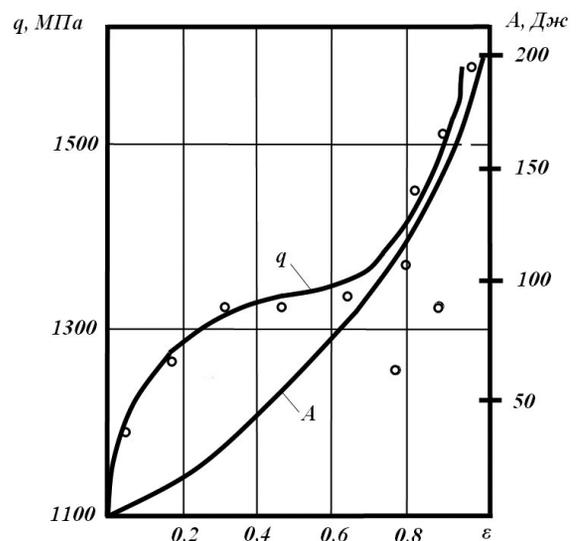


Рис. 7. Зависимости $q = f(\epsilon)$ и $A = f(\epsilon)$, полученные на АС с ВПНТ

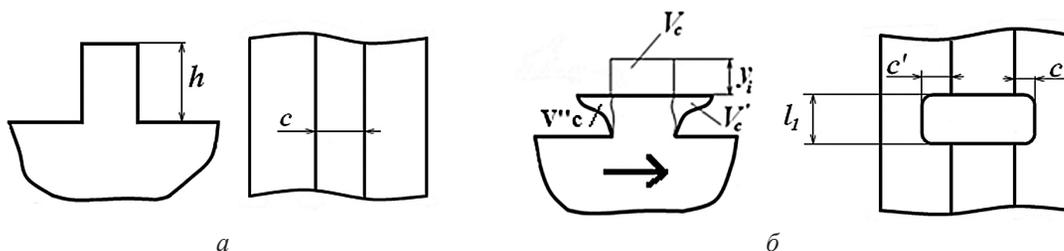


Рис. 8. Геометрические параметры единичного выступа до и после двухосного сжатия до деформации (а) и после деформации (б):

h — высота выступа; c — ширина выступа; V_c — смещаемый объём материала выступа;
 V'_c (V''_c) — объём, затрачиваемый на одностороннее удлинение отпечатка, сформированного полем нареза;
 l_1 — ширина поля нареза; c' (c'') — величина одностороннего удлинения отпечатка нареза; y_1 — величина углубления поля нареза

По зависимости $q = f(\varepsilon)$ (участок Б) определяется диапазон минимальных величин удельных давлений при степени деформации ε приблизительно равной 0,55 (завершение формирования боевого выступа ВП) и соответствующий этому диапазону давлений вариант профиля ВПНТ (высота h и ширина c единичного выступа, а также расстояние между выступами) (рис. 8, а).

Для участка Б (рис. 5) величина работы осадки А определяется линейной зависимостью:

$$A = K\varepsilon,$$

где ε — степень деформации материала;

K — экспериментальный коэффициент.

На рис. 7 также показана зависимость удельной работы осадки А от величины относительно заглупления пуансона.

Анализ зависимости удельного давления от степени деформации $q = f(\varepsilon)$ позволил определить границы интервала участка с линейным возрастанием удельного давления. Удельное давление деформирования зависит от соотношения размеров — высоты к ширине h/c , и материала выступа. На этом основании определены геометрические параметры выступа при степени деформации ε от 0,50 до 0,55.

Выводы

Таким образом, предложено два подхода к исследованию процесса функционирования ведущего пояска: энергетический и конструкционный.

Проведенный анализ процесса выстрела показал, что для обеспечения дальности полёта необходимо, чтобы энергия движения была по-

стоянной. Основным элементом, влияющим на колебание затрат энергии на движение $E_{\text{движ}}$ от выстрела к выстрелу являются геометрические параметры ведущего пояска (например, допуск на диаметральный размер) и механизм пластического деформирования при формировании боевых выступов.

В зависимости от геометрических размеров конкретного ВП, установленного на АС, варьируются затраты на пластическое деформирование ВП, а в дальнейшем и затраты на скольжение АС по КС.

На текущий момент не установлены предельные минимальные геометрические параметры ведущего пояска и его материал, отвечающие всем предъявляемым к нему требованиям. В частности, не установлена величина форсирования ВП, которая отвечает за оптимальное давление форсирования, обеспечивающее начальное движение снаряда в канале ствола.

Кроме того, технология изготовления традиционного ВП путём запрессовки медной кольцевой заготовки в профилированный паз предусматривает некоторую погрешность в диаметральных и продольных размерах ВП, погрешность в осесимметричности АС в целом и т.д. Эти величины ограничиваются допусками при конструировании снаряда.

Решение об использовании материала корпуса для ВПНТ, который может быть сформирован одной технологической операцией одновременно с иными радиальными поверхностями АС, обеспечивает большую степень постоянства размеров и, как следствие, аналогичное постоянство затрат энергии на деформацию. Затраты энергии на формирование боевых выступов ВП сводятся к минимуму.

Указанные недостатки типовой конструкции обуславливают то, что энергия, затраченная на деформацию типового ВП при выстреле, меняется от снаряда к снаряду в большей степени, чем при использовании ВПНТ [2], что и приводит к увеличению рассеивания по дальности полёта АС.

Кучность стрельбы при фиксированной энергии пороховых газов зависит от осесимметричности АС (способностью следовать траектории). Значит, ВПНТ за счет конструкции и технологии изготовления (единство установочных и базирующих баз) способен повысить и кучность полёта артиллерийских снарядов.

Переход от медного ВП к ВПНТ привел к изменению физики процесса деформирования — за счет уменьшения пути перемещения деформируемого материала стало возможным использовать менее пластичный материал, чем медь.

Анализ процесса деформации выступа ВПНТ при врезании в нарезы КС позволил выделить несколько этапов изменения величины удельного давления при двухосном сжатии: ε от 0 до 0,15 соответствует периоду выбора зазоров на установке (q меняется от 0 до 1150 МПа), ε от 0,15 до 0,55 — формированию боевого выступа ВП (q меняется от 1150 до 1380 МПа), $\varepsilon > 0,55$ — деформация сжатия материала ВП по дну и полю нареза со значительным ростом удельного давления (q выше 1380 МПа).

Для обеспечения достаточной для работы ВП степени пластической деформации коэффициент деформации материала ведущего пояса при проектировании ВПНТ должен соответствовать условию $\varepsilon \leq 0,55$.

Литература

1. Экспериментально-теоретические исследования быстропротекающих процессов: коллектив. моногр. / И.А. Балаганский, Л.А. Мерзиевский, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, В.В. Андреев, Ю.О. Поляков, А.В. Виноградов; под ред. А.В. Гуськова. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 262 с.

2. Гуськов А.В. Ведущий пояс, обеспечивающий повышенную точность стрельбы / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, М.С. Хребтова // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного

вооружения: сб. науч. ст. по материалам 2 Всерос. науч.-практ. конф. — Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2015. С. 56–61.

3. Бабкин А.В. Средства поражения и боеприпасы: Учебник / 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.

4. Guskov A.V. The forcing pressure stabilization during shot / A.V. Guskov, K.E. Milevsky, M.S. Khrebtova // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1709: Current Issues of Continuum mechanics and Celestial Mechanics: 10 All-Russian scientific conference (CICMCM), Tomsk, 18–20 Nov. 2020. Art. 012013 (8 p.). DOI: 10.1088/1742-6596/1709/1/012013.

5. Гуськов А.В. Исследование, разработка, проектирование высокоточных боеприпасов: отчет о НИР / исполн.: А.В. Гуськов, А.В. Виноградов, И.А. Балаганский, К.Е. Милевский, М.С. Хребтова, Ю.О. Поляков; рук. А.В. Гуськов. — Новосибирск. 2020. 60 с. № ГР АААА-Б20-220012490141-4.

6. Квашнёв А.А. Исследование нагрева ведущих поясков внутри канала ствола / А.А. Квашнёв, М.С. Хребтова // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб.–4 дек. 2020 г. — Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2020. Ч. 9. С. 140–143. ISBN 978-5-7782-4297-5.

7. Захаренков В.Ф. Баллистическое проектирование орудий и импульсных метательных установок. Учебное пособие / Балт. Гос. Техн. Ун-т СПб. 2000. 142 с.

8. Ермолаев С.И. Внешняя баллистика / С.И. Ермолаев, Л.Б. Комаров, Е.В. Чурбанов — Л.: Военно-морская академия кораблестроения и вооружения им. Крылова. 1958. 718 с.

9. Гуськов А.В. Исследование распределения температуры в материале ведущего устройства при высокоскоростном разгоне / А.В. Гуськов, М.С. Хребтова, К.Е. Милевский, К.М. Зубашевский // 35 Сибирский теплофизический семинар, посвящ. 75-летию заслуж. деятеля науки РФ В.И. Терехова: Всерос. конф. с элементами науч. шк. для молодых ученых. — Новосибирск. 2019. С. 304.

11. Орлов Б.В. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий / Б.В. Орлов, Э.К. Ларман, В.Г. Маликов. — Москва: Машиностроение. 1976. 432 с.