

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПОДВИЖНОЙ ОПРАВКЕ В ГЛАДКОЙ КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

УДК 621.777

## БАРДАЧЁВ Юрий Николаевич

д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники, ректор Херсонского национального технического университета.

**Научные интересы:** автоматизированное управление организационными и социально-экономическими системами.

## РОЗОВ Юрий Георгиевич

д.т.н., доцент, первый проректор Херсонского национального технического университета.

**Научные интересы:** разработка и исследование ресурсосберегающих технологий в области обработки металлов давлением; общие вопросы методологии высшего образования.

### ВВЕДЕНИЕ

Для получения полых длинномерных изделий методами, основанными на холодном пластическом деформировании металлов, большой интерес представляет использование трубчатых заготовок. К очевидным преимуществам процессов формовки деталей из трубчатых заготовок можно отнести: высокую экономическую эффективность, возможность механизации и автоматизации, получение деталей с заданными точностью и физико-механическими свойствами и т. д.

Одной из важных задач механики деформируемого твердого тела является исследование напряженно-деформированного состояния материалов при формообразовании прецизионных трубчатых заготовок с заданным внутренним профилем.

Особое значение эти задачи приобретают в современном оружейном производстве, где в настоящее время широко используются методы пластического деформирования при изготовлении такой сложной и ответственной детали с повышенными эксплуатационными свойствами, как ствол стрелкового оружия.

Производство стрелкового оружия влечёт за собой необходимость комплексного решения многих сложных научно-технических задач, в основном конструкторского и технологического характера. При этом наиболее трудной задачей является – проектирование и изготовление ствола, как самой важной и ответственной детали оружия. Изготовление канала ствола является самой трудоёмкой и ответственной операцией в технологии производства стрелкового оружия, определяющей его баллистические и служебные характеристики [1-3].

Ствол стрелкового оружия – это самая важная и ответственная деталь, непосредственно в которой, за счёт тепловой энергии от сгорания порохового заряда, определяются параметры внутренней баллистики: линейная и угловая скорость пули при её движении в канале ствола, направление и начальная скорость пули в момент её вылета из ствола. Поэтому ствол требует особой тщательности при проектировании и изготовлении.

Каналы стволов (внутренние полости стволов) по своему строению примерно одинаковы и отличаются лишь патронником, количеством и формой нарезов, или дорожек (полигонов).

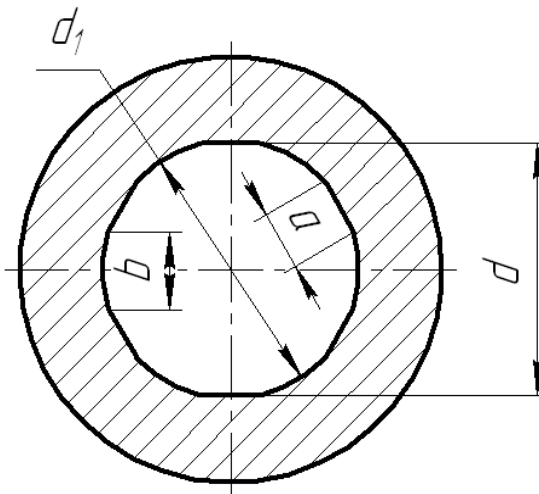


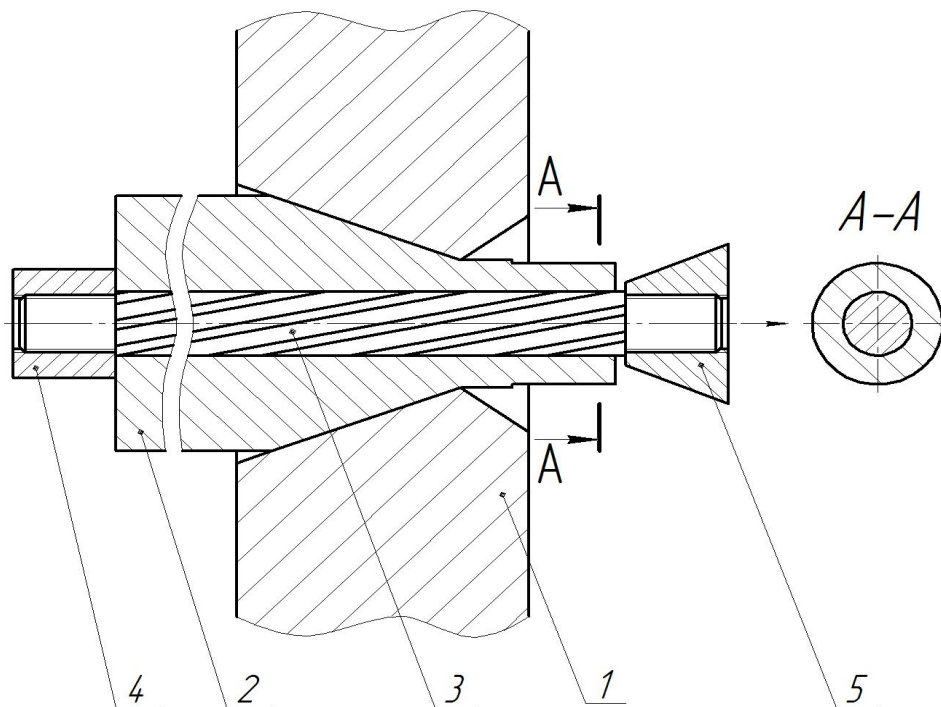
Рисунок 1 – Схема полигонального профиля

Полигональный профиль в поперечном сечении ствола имеет форму одной из геометрических фигур. Наибольшее распространение получили стволы с про-

филем правильного шестиугольника (рис. 1). В настоящее время в стрелковом оружии нового поколения конструкторы ведущих оружейных фирм в своих новых моделях отдают предпочтение этому виду профиля поперечного сечения, который применён в пистолете «Глок» (Австрия) [4], пистолете-пулемёте «Эльф» конструкции КБ СТ (Украина) [5], пистолете-пулемёте «Каштан» (Российская Федерация) [6] и др.

Таким образом, преимущества полигонального профиля стволов в настоящее время общеизвестны и приняты к использованию, как в стрелковом оружии, так и в артиллерии [7].

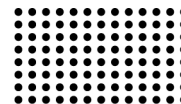
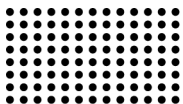
Получить профиль ствола полигонального типа можно обжатием в гладкой конической матрице ствольной заготовки на профильной подвижной оправке (рис. 2).



1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – оправка с профилем; 4 – задний упор; 5 – захват  
Рисунок 2 – Схема процесса обжатия в гладкой конической матрице

Задача определения тянущего усилия при волочении трубы на подвижной оправке решалась многими исследователями: в Германии – Е. Зибелем, А. Гелеи, в СССР – П.Т. Емельяненко, Л.Е. Альшевским, С.И. Губкиным, И.Л. Перлиным [8-10].

Полученные результаты для определения напряжения волочения отличаются по форме из-за принятых при выводе допущений, в частности различий в учёте сил трения и упрощений математического характера. Следует отметить, что принимаемые при анализе до-



пушения в одних случаях не соответствуют статическим граничным условиям, в других – геометрическим условиям (принятые в качестве главных плоскости в действительности не являются таковыми). Кроме того, ввиду принятых в приведенных работах допущений, расчёты пригодны для определения энергосиловых параметров в первом приближении и, как правило, дают завышенные на 10...20% значения усилия и работы деформации [11].

Современные компьютерные методы моделирования позволяют с высокой точностью определять энергосиловые параметры, анализировать напряжённо-деформированное состояние (НДС) процесса и, самое главное, оценить точность изготовления профиля, то есть степень отклонения профиля детали от профиля оправки.

**Целью работы** является проведение анализа напряжённо-деформированного состояния заготовок при формообразовании внутренней поверхности ствола полигонального профиля волочением на подвижной оправке в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску без ограничения и с односторонним ограничением течения металла по длине с использованием методов численного моделирования.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Развитие методов численного решения краевых задач математической физики с использованием возможностей современной вычислительной техники вызвало бурный рост компьютерных методов моделирования и решения упомянутых выше задач без существенных упрощений и допущений. На сегодня именно они являются основным инструментом исследования процессов и операций обработки металлов давлением, оттеснив на второй план традиционные в недалеком прошлом «аналитические» методы. Последние из них сейчас чаще всего используются на предварительной стадии создания компьютерной модели и оценки некоторых её параметров.

Метод конечных элементов (МКЭ) – основной метод современной вычислительной математики, лежащий в основе подавляющего большинства современных программных комплексов, предназначенных для

выполнения расчётов инженерных конструкций на ЭВМ.

МКЭ позволяет практически полностью автоматизировать расчёт механических систем, хотя, как правило, требует выполнения значительно большего числа вычислительных операций по сравнению с классическими методами механики деформируемого твёрдого тела, но вполне преодолимых, благодаря современной персональной вычислительной технике, что способствует широкому внедрению МКЭ в практику инженерных расчётов.

В данной работе эти задачи решались с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D, основанного на использовании МКЭ [12].

Моделирование проводилось для обжатия в конической матрице с различными рабочими углами с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску без ограничения (сталь 30ХН2МФА), с одно- (сталь 30ХН2МФА и сталь 10) и двухсторонним (сталь 30ХН2МФА) ограничением течения металла по длине.

Ниже приведены результаты моделирования процесса обжатия в конической матрице без ограничения течения металла по длине.

Были приняты следующие исходные данные:

- Материал заготовки – сталь 30ХН2МФА
- Наружный диаметр заготовки – 16 мм.
- Внутренний диаметр – 9,02 мм.
- Площадь поперечного сечения оправки – 62,91 мм<sup>2</sup>.
- Диаметр матрицы – 15 мм.
- Рабочий угол матрицы – 10°.
- Степень деформации – 0,072.

При моделировании исходные механические свойства для стали 30ХН2МФА задавались следующими: модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона 0,3, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 490$  МПа.

Диаграмму истинных напряжений описывали, как функцию:

$$\sigma_S = \sigma_S \left( \varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_S$  – интенсивность напряжений,

$\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций,

$\dot{\varepsilon}$  – скорость деформаций,  
 $T$  – температура.  
 Трение учитывали на контактных поверхностях инструмента и задавали коэффициент трения  $\mu=0,08$ . Деформирующий инструмент – абсолютно жёсткий.

На рис. 3 представлена расчётная схема процесса. В исходном положении (рис. 3, а) заготовка 1 вместе с оправкой 2 устанавливаются неподвижно в матрице 3, которая перемещается вверх относительно оправки с заготовкой (рис. 3, б).

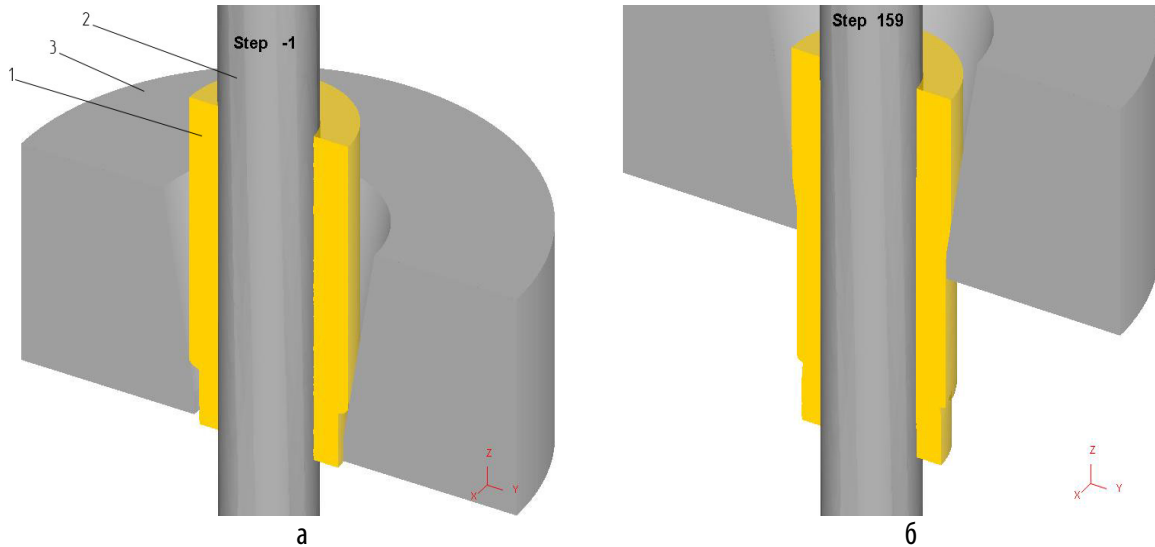


Рисунок 3 – Расчётная схема процесса: а – исходное положение; б – в момент установившейся стадии

Исходная заготовка с разбивкой конечно-элементной сетки по поверхностям и в разрезе показана на рис. 4, а. Для повышения точности описания геометрии внутренней поверхности было сделано сгуще-

ние конечно-элементной сетки на внутренней поверхности. Деформированная заготовка в поверхности и в разрезе показана рис. 4, б.

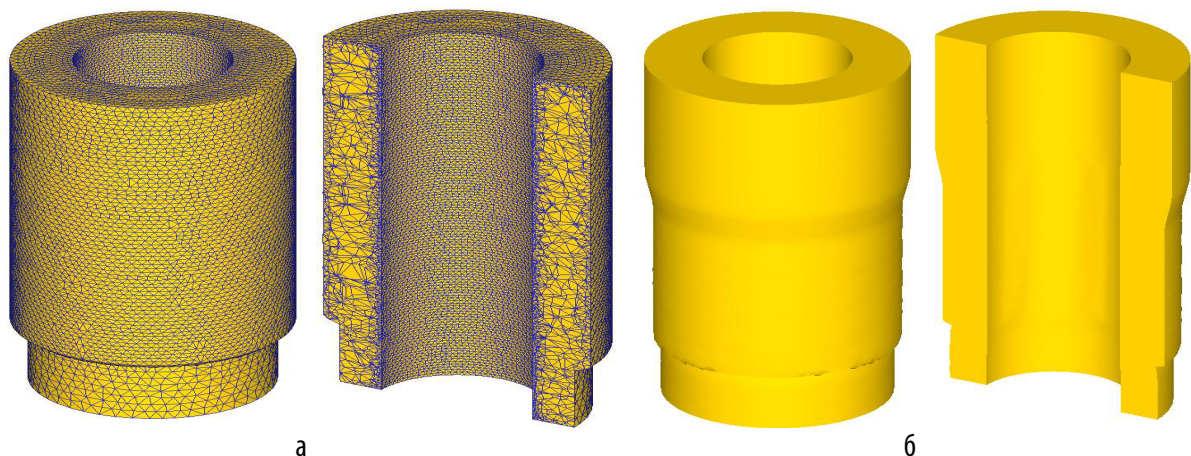


Рисунок 4 – Формообразование полигонального профиля канала ствола волочением (обжатием) в гладкой конической матрице: а – заготовка с КЭ сеткой; б – деталь после деформации

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате моделирования была установлена возможность получения профильной поверхности на

внутренней поверхности ствольной заготовки. За счет пластической деформации, вследствие обжатия по оправке с винтообразными полигональными дорожка-

ми, формується внутрішня поверхня каналу ствола, при незначительному відносному удлинненні заготовки в осевому напрямку.

На рис. 5, а, показано розподіл використання ресурсу пластичності  $\psi$ , в об'ємі деформованого металу. В сеченні каналу ствола видно наскільки зростає використання ресурсу пластичності в місцях формування полігональних дорожок, де  $\psi = 0,7 - 0,75$ .

Максимальне значення використання ресурсу пластичності  $\psi$  склало приблизно 0,95 і зосереджено на зовнішній поверхні деталі при виході з матриці. Таким чином, моделювання показує можливість реалізувати процес формування

полігонального профілю каналу ствола методом холодної пластичної деформації без руйнувань.

Розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  (рис. 5, б) показує проработку структури матеріалу після деформування, по відношенню до вихідного стану.

Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , представлений на рис. 5, в, вказує на сприятливий характер напруженого стану: найбільшого значення інтенсивність напружень досягає в поверхневих шарах, утворюючи упрочнений «каркас» перешкоди пружиненню ствола після виходу з конічного ділянки матриці. Максимальне значення  $\sigma_i$  в очагах деформації склало 703 МПа.

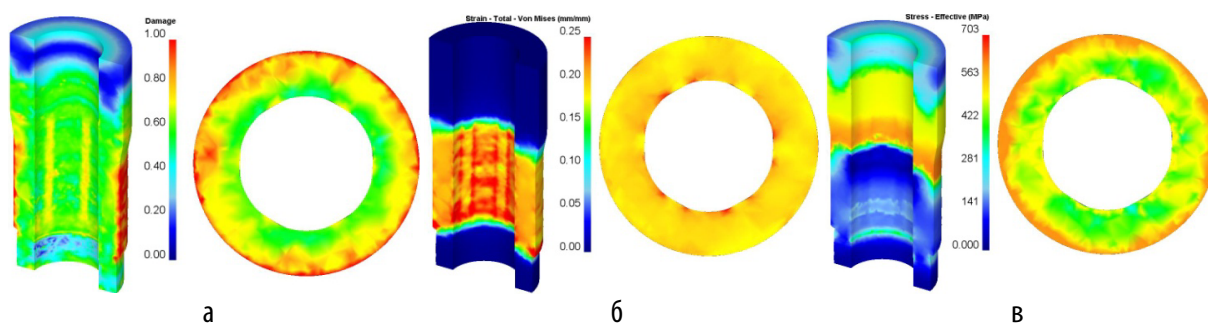


Рисунок 5 – Результати комп'ютерного моделювання:

а – розподіл використання ресурсу пластичності  $\psi$ , в об'ємі деформованого металу; б – розподіл інтенсивності деформації  $\epsilon_i$ ; в – розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$

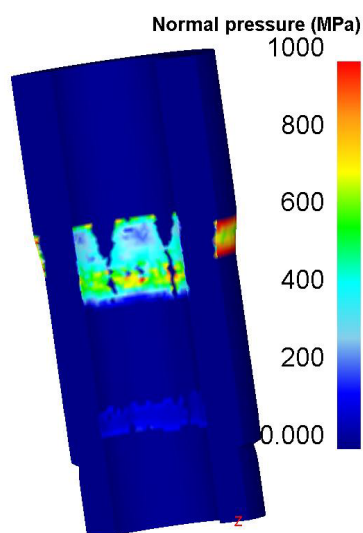


Рисунок 6 – Розподіл нормальних напружень на контактних поверхностях заготовки з інструментом

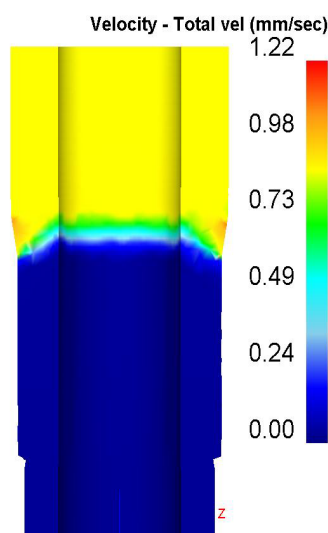


Рисунок 7 – Розподіл швидкості деформації

Распределение нормальных контактных напряжений на поверхности заготовки в месте её контакта с инструментом показано на рис. 6. Максимальные значения нормальных напряжений на инструменте достигают 1000 МПа на конической поверхности матрицы и 900 МПа – на оправке.

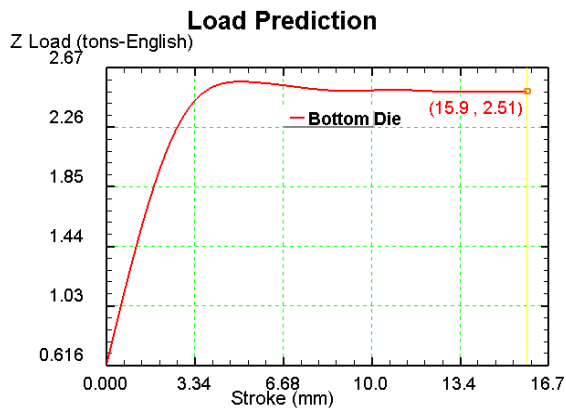


Рисунок 8 – Зависимость усилия обжатия от перемещения пуансона

Распределение скорости деформации показано на рис. 7. При начальной скорости 5 мм/с матрицы относительно неподвижной заготовки с оправкой, максимальная скорость течения деформируемого металла составила 1,22 мм/с.

Расчётная зависимость усилия волочения от перемещения матрицы показана на рис. 8, максимальное значение усилия процесса составило 25.7 кН.

Формирование профиля в поперечных сечениях ствольной заготовки оценивалось по изменению расстояний между плоскостью дорожки на оправке и внутренней поверхностью заготовки.

На рис. 9, а показано исходное положение заготовки и оправки, когда расстояние между ними максимально (наибольшее расстояние в середине дорожки). По мере прохождения конического участка матрицы это расстояние уменьшается (рис. 9, б, в) и в заключении незаполненный зазор остается только у переднего конца, где находилась центрирующая проточка, а также у заднего конца, не прошедшего конический участок матрицы (рис. 9, г)

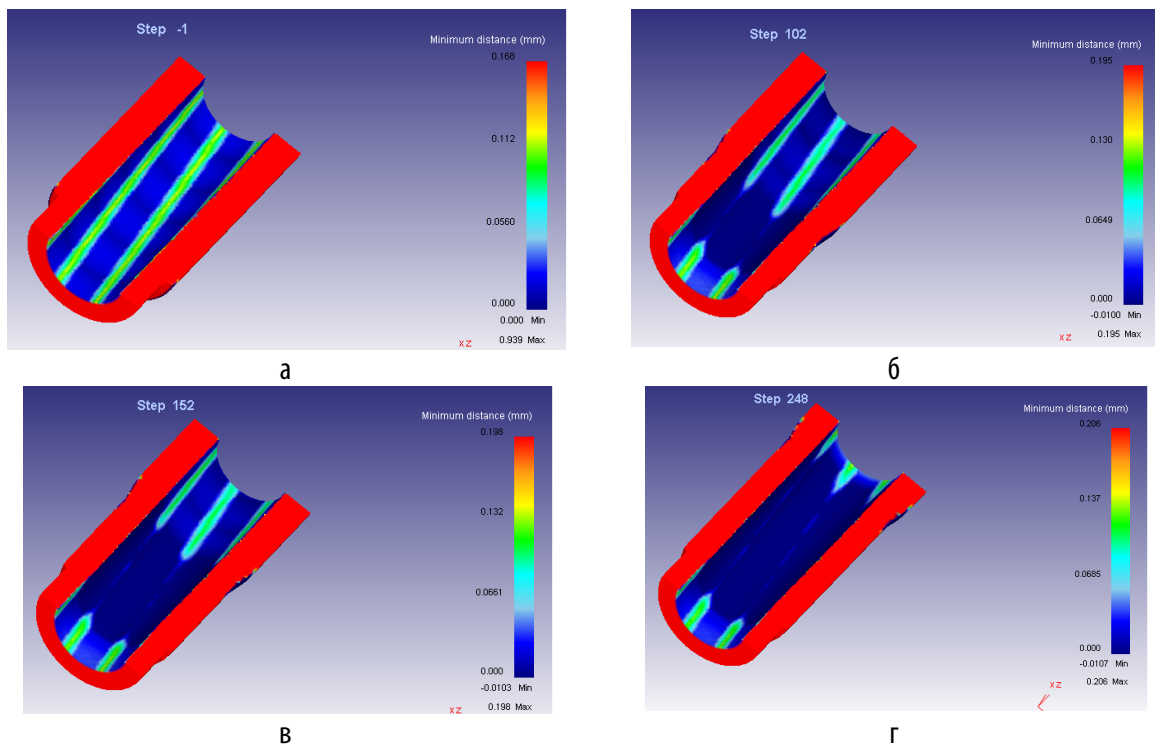
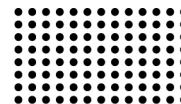
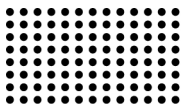


Рисунок 9 – Изменение максимального расстояния между плоскостью полигона оправки и поверхностью ствольного отверстия в процессе волочения: а – внешний вид заготовки до обжатия; б – заготовка после обжатия на 1/3 длины; в – заготовка после обжатия на 2/3 длины; г – заготовка после полного обжатия



Следует отметить, что указные зазоры несколько не влияют на качество полуфабриката ствола, так как в этих местах он подлежит механической обработке – у переднего конца для образования защитного от забоев углубления, а у заднего – для расточки под патронник.

Как указывалось выше, с целью выяснения, как будет влиять на формирование полигональных дорожек ограничение течения металла в осевом направлении, было проведено компьютерное моделирование обжатия ствольной заготовки в гладкой конической матрице с указанным ограничением. Ограничение осевого перемещения металла достигалось путём закрепления концов заготовки на оправке. Наружный радиус заготовки при этом был меньше, чем в предыдущем случае и определялся из условия, чтобы уменьшение площади поперечного сечения по наружному диаметру равнялось уменьшению площади по внутреннему диаметру, необходимого для формирования полигональных дорожек. Следует отметить, что в этом модельном эксперименте длина заготовок была только в пределах, необходимых для достижения установившегося режима деформирования.

Результаты анализа показали приемлемость использования предложенного способа для изготовления ствола с профилем полигонального типа обжатием ствольной заготовки с профильной оправкой в гладкой конической матрице без ограничения течения металла по длине заготовки и с односторонним ограничением. Рекомендованные значения рабочих углов конической матрицы при обжатии трубчатой заготовки в указанных процессах лежат в диапазоне  $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$ . При этом с уменьшением рабочего угла конической матрицы в месте деформирования улучшается заполнение профиля, однако возрастает технологическое усилие, что продиктовано увеличением контактной поверхности и ростом влияния сил трения. При больших значениях угла, происходит значительный рост сдвиговых деформаций у наружной поверхности заготовки, где интенсивность деформаций достигает критических значений (использование ресурса пластичности достигает 1). Например, при углах конусности матрицы  $25^{\circ} \dots 45^{\circ}$ , компьютерный эксперимент показывает разрушение на внешней поверхности трубчатой детали. При углах конусности менее  $10^{\circ}$ , при незначительном улучшении

заполнения профиля (менее 5%), резко возрастает усилие деформирования.

Двухстороннее ограничение течения деформируемого металла в осевом направлении при формообразовании внутренней поверхности ствола полигонального типа обжатием в гладкой конической матрице приводит к улучшению заполнения профиля в месте деформирования. Однако в этом случае, даже при степени деформации меньше одного процента, перед матрицей происходит выпучивание материала исходной заготовки, что может привести к потере устойчивости длинных заготовок. В конце хода при деформировании избыточного материала наблюдается обратное течение металла, что приводит к смещению заготовки по оправке в её сформированной части и потере размеров полигональных дорожек.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований и полученных результатов необходимо сделать следующие выводы:

1. С целью повышения точности анализа процесса формообразования внутренней поверхности ствольной заготовки полигонального профиля волочением в гладкой конической матрице, проведено компьютерное моделирование процесса обжатия с различными рабочими углами матрицы с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску без ограничения, с одно- и двухсторонним ограничением течения металла по длине, с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D, основанного на использовании метода конечных элементов.

2. Компьютерным моделированием определены параметры НДС в очаге деформации, использование ресурса пластичности, конечная геометрия изделия, распределение удельных усилий на поверхности контакта заготовки с инструментом, а также зависимость усилия волочения от перемещения металла в матрице (волоке).

3. Для использования на практике, рекомендуемая схема обжатия ствольной заготовки на подвижной оправке в гладкой конической матрице – деформирование с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску без ограничения и с односторонним ограничением течения металла по длине. Рекомендуемое значение рабочего угла матрицы для обеих схем деформирования –  $10^{\circ}$ .

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Tuktanov A.G. Tehnologija proizvodstva strelkovo-pushechnogo i artilerijskogo oruzhija /A.G. Tuktanov. – M.: Mashinostroenie, 2007. – 375 s.
2. Babak F.K. Osnovy strelkovogo oruzhija /F.K. Babak. – SPb.: Izd-vo «Poligon», 2003. – 252 s.
3. Kreknin L.T. Proizvodstvo avtomaticheskogo oruzhija: Ch.1 /L.T. Kreknin. – Izhevsk, 2004. – 238 s.
4. Pistolety-pulemjoty GLOCK-17 i drugie (Avstrija) [Elektronnyj resurs], URL: <http://www.arms.ru/Guns/pistmin/glock.htm>.
5. AEK-919K, pistol-pulemnot «Kashtan» [Elektronnyj resurs], URL: <http://www.arms-expo.ru/049056049055124052054054057.html>.
6. Pasechnik S. Pistol-pulemnot «Elf-2» /S. Pasechnik //Ohot i oruzhie. – 2000. – #6. – S.6-7.
7. Stebljuk V.I. Perspektivi vikoristannja u artilerii stvoliv z poligonal'nim profilem /V.I. Stebljuk, Ju.G. Rozov, D.B. Shkarluta, O.V. Holjavik //Problemi ekspluatacii i rozvitku raketno-artilerijs'kogo ozbroennja vijs'kovo-mors'kih sil zbrojnih sil Ukraini: zb. dopovidej II naukovoi konferencii, 5-7 zhovt. 2011 r., Sevastopol', Ukraina. – S.19-22.
8. Geleji A. Bildsame Formung der Vttalle in Rechnung und Versuch. Akademie Verlag, Berlin, 1960. – 754 s.
9. Gubkin S.I. Plasticheskaja deformacija metallov, t.III. – M.: «METALLURGIJZDAT», 1961. – 360 s.
10. Perlin L.I., Ermanok M.Z. Teorija volochenija. – M.: «METALLURGIJA», 1971. – 448 s.
11. Danchenko V.N., Grinkevich V.O., Golovko O.M. Teorija processov obrabotki metallov davleniem. – Dnepropetrovsk: «POROGI», 2008. – 369 s.
12. DEFORM™ 3D. Version 6.1 User's Manual Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 420 p.

**Рецензент:** *д.т.н., проф. Марсанов В.В.,  
Херсонский национальный технический университет.*