

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТВОЛА ПОЛИГОНАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ВОЛОЧЕНИЕМ НА ПОДВИЖНОЙ ОПРАВКЕ В ГЛАДКОЙ КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ****Розов Ю. Г.**

Ствол стрелкового оружия требует особой тщательности при проектировании и изготовлении, в особенности при профилировании внутренней полости, так называемого канала ствола. Изготовление стволов методами пластической деформации в настоящее время достаточно актуально. Однако традиционные аналитические методы анализа не позволяют получить точные расчеты основных параметров технологических процессов изготовления стволов. В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов процесса формообразования внутренней поверхности ствольной заготовки полигонального профиля волочением в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску.

Ствол стрілецької зброї вимагає особливої ретельності при проектуванні і виготовленні, особливо при профілізації внутрішньої порожнини, так званого каналу ствола. Виготовлення стволів методами пластичної деформації в даний час досить актуально. Проте традиційні аналітичні методи аналізу не дозволяють отримати точні розрахунки основних параметрів технологічних процесів виготовлення стволів. У даній роботі представлені результати комп'ютерного моделювання за допомогою методу кінцевих елементів процесу формоутворення внутрішньої поверхні ствольної заготовки полігонального профілю волочінням в гладкій конічній матриці з фіксацією (центруванням) заготовки по калібруючому поясочку.

The barrel of small-arms requires the special care during designing and making, especially at profiling of internal cavity so-called the bore of the barrel. Making of barrels by the methods of plastic deformation presently sufficiently actual. However, the traditional analytical methods of analysis do not allow to get the exact calculations of basic parameters of technological processes of making of barrels. In this work the results of computer design of process of forming of internal surface of barrel blank of polygonal profile are presented by dragging in a smooth conical matrix with fixing (centring) of blank on a calibrating string-course, by the method of eventual elements.

Розов Ю. Г.

канд. техн. наук, доц. ХНТУ  
[rozovu@mail.ru](mailto:rozovu@mail.ru);

ХНТУ – Херсонский национальный технический университет, г. Херсон.

УДК 621.777

Розов Ю. Г.

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТВОЛА ПОЛИГОНАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ВОЛОЧЕНИЕМ НА ПОДВИЖНОЙ ОПРАВКЕ В ГЛАДКОЙ КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ**

Ствол стрелкового оружия – это самая важная и ответственная деталь, непосредственно в которой, за счет тепловой энергии от сгорания порохового заряда, определяются параметры внутренней баллистики: линейная и угловая скорость пули при ее движении в канале ствола, направление и начальная скорость пули в момент ее 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).

Полигональная нарезка – это нарезка, которая в поперечном сечении ствола имеет форму одной из геометрических фигур. Наибольшее распространение получили стволы с шестиугольной нарезкой (рис. 1). В настоящее время применена в пистолете «Глок», пистолете-пулемете «Эльф» конструкции КБ СТ (Украина), пистолете-пулемете «Каштан» (Российская Федерация) и др.

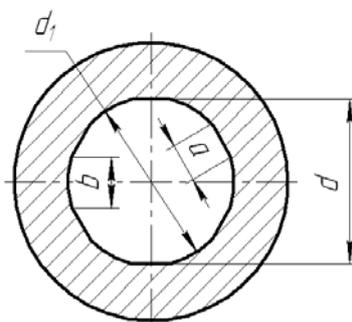


Рис. 1. Схема полигональной нарезки

Получить профиль ствола полигонального типа можно волочением через гладкую коническую матрицу ствольной заготовки на профильной подвижной оправке (рис. 2).

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 [1, 2, 3 и др.].

Полученные результаты для определения напряжения волочения отличаются по форме из-за принятых при выводе допущений, в частности различий в учете сил трения и упрощений математического характера. Следует отметить, что принимаемые при анализе допущения 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, расчеты пригодны для определения энергосиловых параметров в первом приближении и, как правило, дают завышенные на 10...20 % значения усилия и работы деформации [4].

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

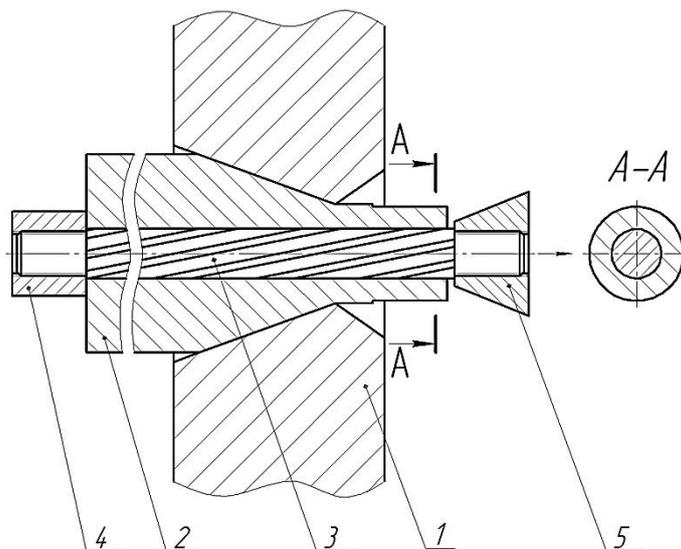


Рис. 2. Схема процесса прессования-волочения через гладкую коническую матрицу:  
1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – оправка с профилем; 4 – задний упор; 5 – захват

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 фиксации (центрированием) заготовки по калибрующему пояску с использованием методов численного моделирования.

В данной работе эти задачи решались с помощью пакета прикладных программ Deform-3D, основанного на использовании метода конечных элементов (МКЭ) [5].

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 принимали абсолютно жёстким.

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

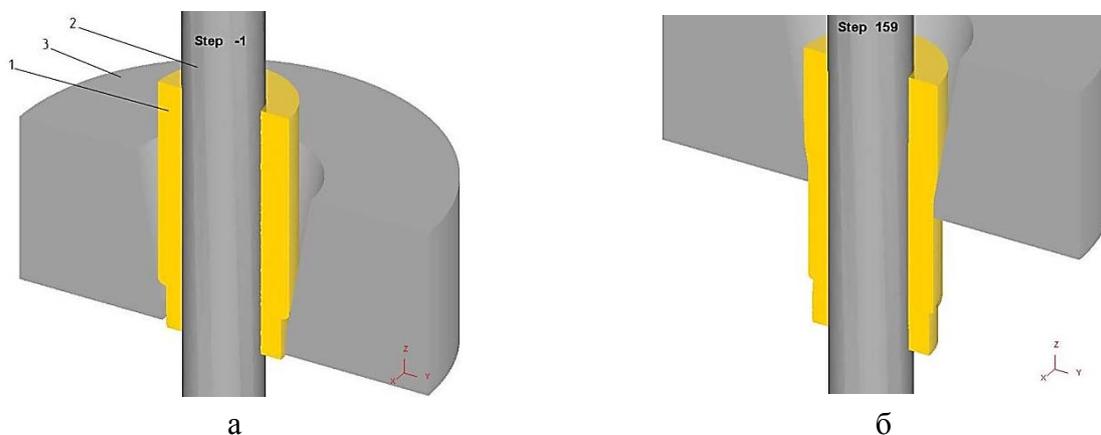


Рис. 3. Расчетная схема процесса:

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

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 дорожками, формируется внутренняя поверхность канала ствола, при незначительном относительном удлинении заготовки в осевом направлении.

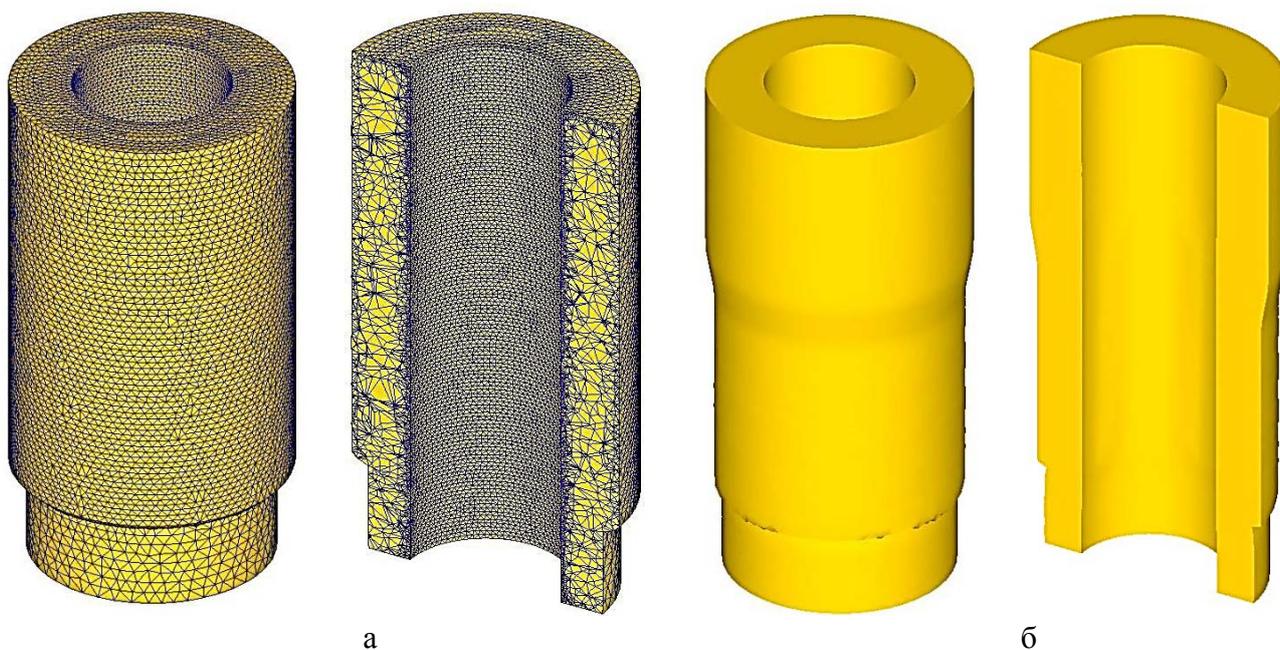


Рис. 4. Формообразование полигонального профиля канала ствола волочением (обжатием) в гладкой конической матрице:

а – заготовка с КЭ сеткой; б – деталь после деформации

Компьютерным моделированием были определены параметры напряженно-деформированного состояния 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).

На рис. 5 показано распределение использования ресурса пластичности  $\psi$ , в объеме деформированного металла. В сечении канала ствола видно насколько возрастает использование ресурса пластичности в местах формирования полигональных дорожек, где  $\psi = 0,7-0,75$ .

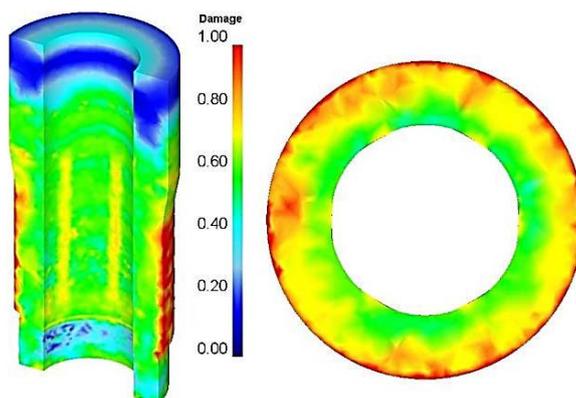


Рис. 5. Распределение использования ресурса пластичности  $\psi_i$ , в объеме деформированного металла

Максимальное значение использования ресурса пластичности  $\psi$  составило приблизительно 0,95 и сосредоточено на внешней поверхности детали при выходе с матрицы. Таким образом, моделирование показывает возможность реализовать процесс формирования полигонального профиля канала ствола методом холодной пластической деформации без разрушений.

Распределение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  (рис. 6) показывает проработку структуры материала после деформирования, по отношению к исходному состоянию.

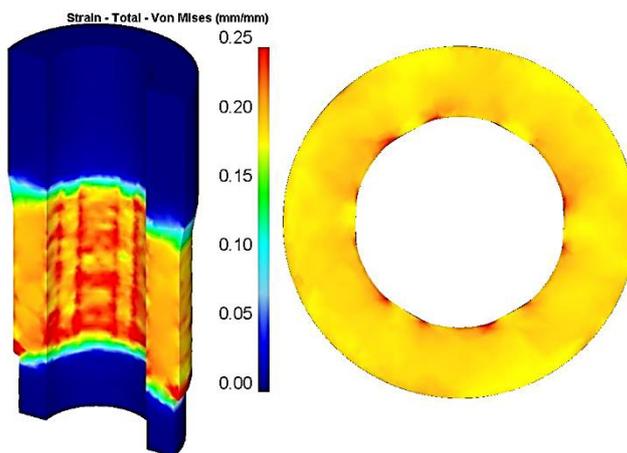


Рис. 6. Распределение интенсивности деформации  $\varepsilon_i$

Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , представленное на рис. 7, указывает на благоприятный характер напряженного состояния: наибольшего значения интенсивность напряжений достигает в поверхностных слоях, образуя упрочненный «каркас» препятствующий пружинению ствола после выхода из конического участка матрицы. Максимальное значение  $\sigma_i$  в очаге деформации составило 703 МПа.

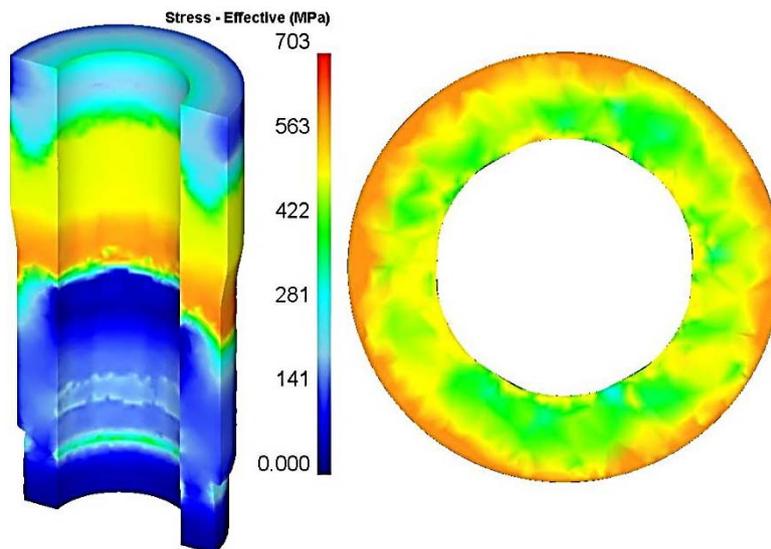


Рис. 7. Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$

Распределение нормальных контактных напряжений на поверхности заготовки в месте ее контакта с инструментом показано на рис. 8. Максимальные значения нормальных напряжений на инструменте достигают 1000 МПа на конической поверхности матрицы и 900 МПа – на оправке.

Распределение скорости деформации показано на рис. 9. При начальной скорости 5 мм/с матрицы относительно неподвижной заготовки с оправкой, максимальная скорость течения деформируемого металла составила 1,22 мм/с.

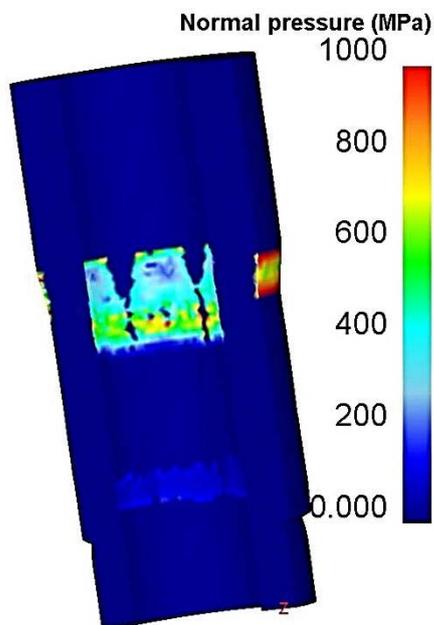


Рис. 8. Распределение нормальных напряжений на контактных поверхностях заготовки с инструментом

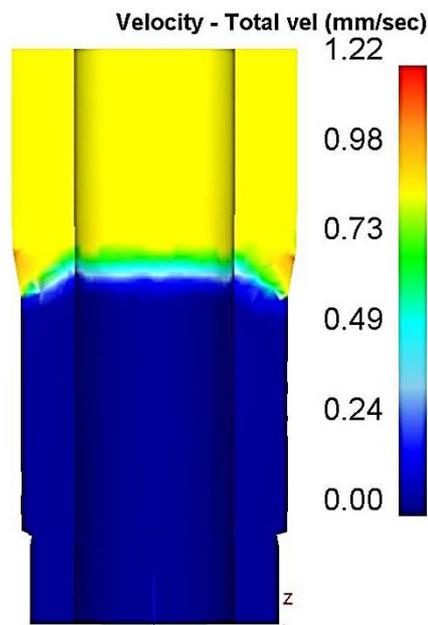


Рис. 9. Распределение скорости деформации

Расчетная зависимость усилия волочения от перемещения матрицы показана на рис. 10, при этом максимальное значение усилия процесса составило 25,7 кН.

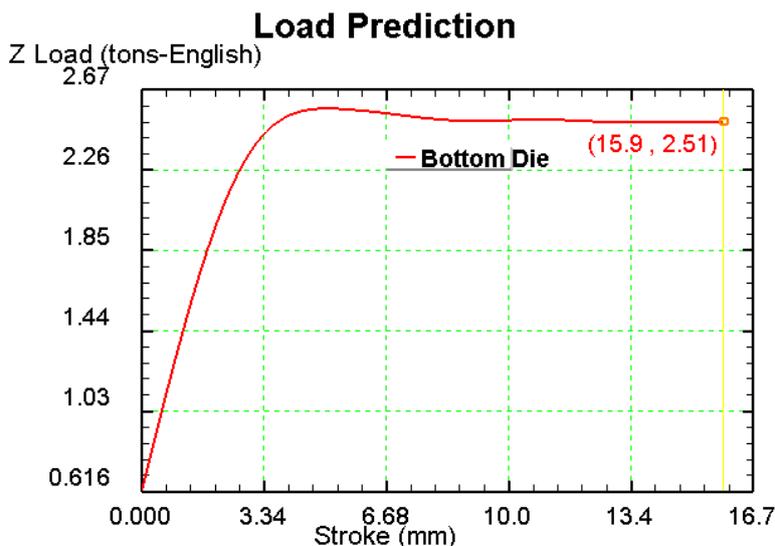


Рис. 10. Зависимость усилия обжатия от перемещения пуансона

Рассмотрим формирование полигонального профиля в процессе волочения ствольной заготовки на подвижной оправке. Формирование профиля в поперечных сечениях ствольной заготовки будем оценивать по изменению расстояний между плоскостью дорожки на оправке и внутренней поверхностью заготовки.

На рис. 11, 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. 11, 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. 11, г).

Следует отметить, что указанные 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.

## ВЫВОДЫ

С целью повышения точности анализа процесса формообразования внутренней поверхности ствольной заготовки полигонального профиля волочением в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску, проведено компьютерное моделирование процесса с помощью пакета прикладных программ Deform-3D, основанного на использовании метода конечных элементов.

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).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geleji A. *Bildsame Formung der Vtalle in Rechnung und Versuch* / A. Geleji // Akademie Verlag. – Berlin, 1960. – 754 s.
2. Губкин С. И. *Пластическая деформация металлов. Т. III* / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – 360 с.
3. Перлин Л. И. *Теория волочения* / Л. И. Перлин, М. З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
4. Данченко В. Н. *Теория процессов обработки металлов давлением* / В. Н. Данченко, В. О. Гринкевич, О. М. Головкин. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 369 с.
5. *Deform<sup>tm</sup> 3D. Version 6.1 User's Manual* Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 420 s.

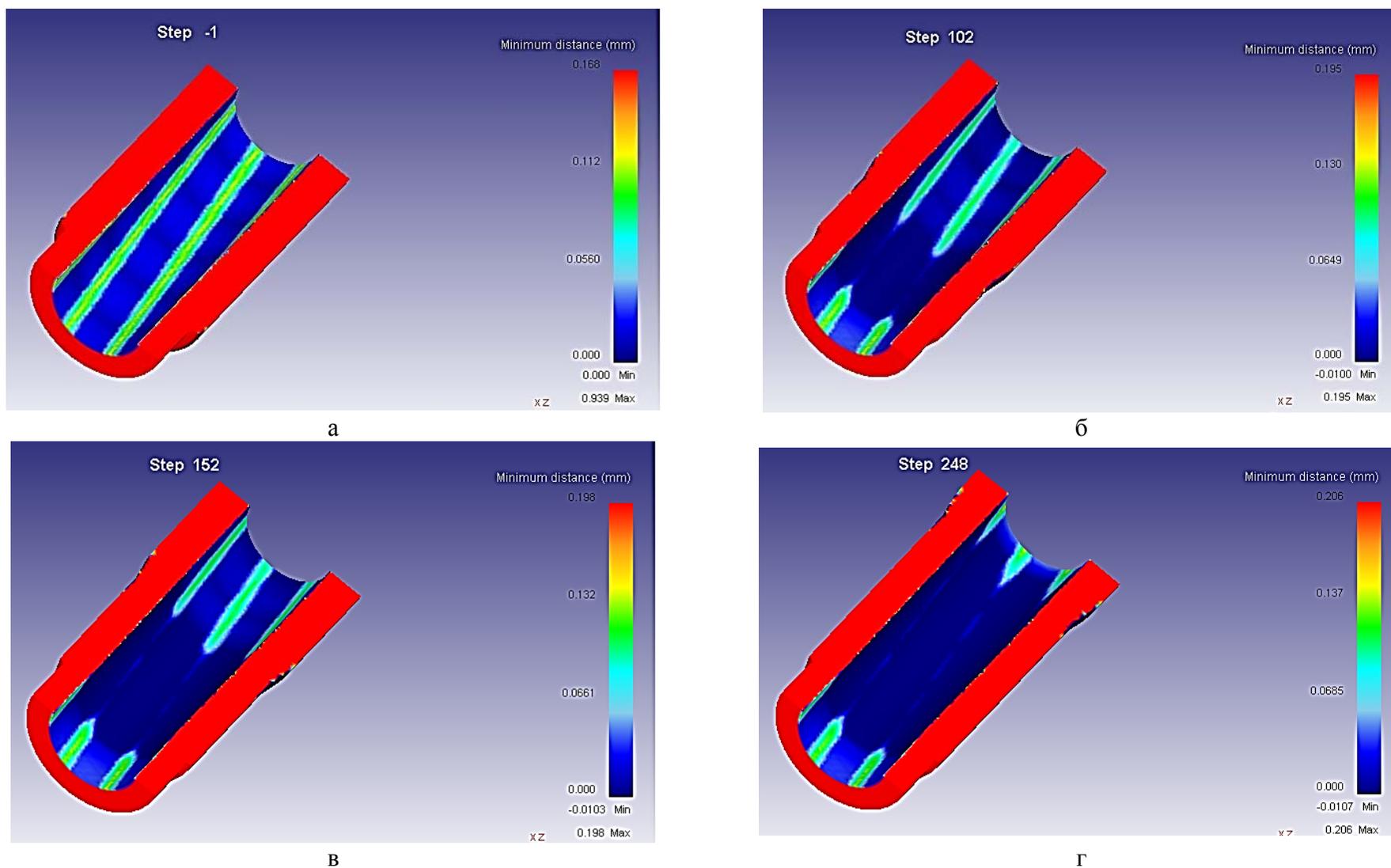


Рис. 11. Изменение максимального расстояния между плоскостью полигона оправки и поверхностью ствольного отверстия в процессе волочения:

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