

УДК 621.77.01

Розов Ю. Г.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРОФИЛИРОВАННОЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Толстостенные трубчатые изделия с прецизионными элементами внутреннего профиля (6–8 квалитет, при шероховатости 0,16–0,64 мм) достаточно широко применяются в машиностроении, приборостроении и изделиях специального назначения.

Типовым примером изделий специального назначения могут служить стволы артиллерийского и стрелкового оружия. Технология их изготовления предусматривает две стадии:

1. Получение глубокого отверстия с указанными геометрическими параметрами внутренней поверхности.

2. Получение на внутренней поверхности профильных элементов.

Каждая из них требует нескольких операций и специального оборудования.

Чаще всего канал в заготовке ствола производится по схеме: предварительное сплошное сверление, развёртывание, чистовое развёртывание. В качестве финишных операций, применяют хонингование или протягивание, а в последнее время – электрохимическую обработку [1, 2].

Большой научный и практический интерес представляет совершенствование процессов изготовления оружейных стволов методами пластической деформации по следующим основным причинам:

- в качестве материалов для изготовления стволов используются в основном конструкционные легированные высококачественные стали, такие как 30ХН2ФМА, 50РА и др., т. е. труднодеформируемые материалы;
- необходимость получения исходной длинномерной толстостенной трубчатой заготовки с глубоким отверстием необходимой точности при шероховатости поверхности 0,16–0,32 мм;
- канал оружейного ствола имеет высокую точность размеров и достаточно сложную геометрическую форму профильных элементов, образующих винтовую поверхность;
- эксплуатационные качества (баллистические характеристики) огнестрельного оружия напрямую зависят от качества внутреннего профиля оружейного нарезного ствола.

Однако при изготовлении канала ствола методами, основанными на холодном пластическом деформировании металла, не всегда обеспечивается желаемое качество канала.

В целом существующие методы профилирования ведущей части стволов не являются универсальными и имеют ряд существенных недостатков, среди которых можно выделить следующие:

- высокая трудоёмкость (механическая и электрохимическая обработка);
- необходимость использования сложного дорогостоящего оборудования (шпалерование, радиальная ковка);
- наличие остаточных напряжений в стволе (дорнование);
- загрязнение экологии (электрохимическая обработка) и др.

Таким образом, вопрос создания новых нетрадиционных, высокопроизводительных методов изготовления высококачественных стволов стрелкового оружия (СО), основанных на пластическом деформировании металла, в настоящее время остаётся достаточно актуальным.

Целью работы является развитие существующих и создание новых научно обоснованных, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей, технологических процессов изготовления длинномерных трубчатых ствольных заготовок и стволов СО с оптимальным профилем внутренней поверхности ведущей части канала, основанных на холодном пластическом деформировании металлов.

Разработка новых технологических процессов изготовления прецизионных трубчатых изделий методами холодной пластической деформации и проектирование необходимой для этого технологической оснастки не возможны без тщательного анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) в очаге деформации, определения энергосиловых параметров и прочностных расчётов рабочих инструментов.

Ввиду низкой пластичности ствольных сталей, традиционное холодное выдавливание не обеспечивает необходимой степени деформации без разрушений. Поэтому, для повышения пластичности сталей при холодном формообразовании изделий используют схемы выдавливания в условиях НДС всестороннего неравномерного сжатия при деформации в среде высокого гидростатического давления или гидропрессование (гидроэкструзию).

Рассмотрено получение методом гидроэкструзии длинномерных прецизионных трубчатых заготовок с заданным внутренним профилем:

- длинномерных трубчатых заготовок с глубоким гладким (цилиндрическим) отверстием (ствольных заготовок);
- трубчатых заготовок с образующими профильных элементов, параллельными продольной оси;
- трубчатых заготовок с профильными элементами, образующими винтовую линию.

В результате анализа предложен и рассмотрен перспективный метод получения высокоточных трубчатых изделий с повышенными эксплуатационными свойствами (например, ствольных заготовок) методом гидропрессования на подвижной гладкой оправке [2–4].

Реализованная схема гидропрессования трубчатых заготовок с подвижной оправкой представлена на рис. 1.

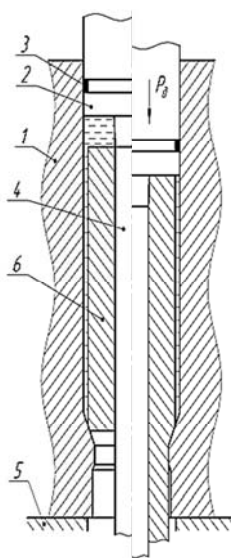


Рис. 1. Схема гидропрессования трубчатых заготовок на оправке

Начальное положение, перед выдавливанием, отображено слева, а в процессе – справа от оси симметрии.

Бандажированный контейнер 1 установлен на плиту 5. Трубчатая заготовка 6 позиционируется фаской на конической кромке матрицы в контейнере. Далее устанавливается оправка 4 и заливается рабочая жидкость. Верхняя коническая часть оправки обеспечивает уплотнение, для исключения протекания жидкости. Сверху оправки устанавливается штамп 2 с уплотнением 3.

К штампу прикладывается усилие P_0 . Во время перемещения штампа 2 сначала коническая часть оправки перекрывает отверстие заготовки, а далее рабочая жидкость в контейнере 1 сжимается, создавая гидростатическое давление на свободную поверхность заготовки. Заготовка вместе с оправкой проходит через отверстие в матрице, в результате получаем необходимый внутренний диаметр и чистоту поверхности заготовки.

Анализ гидропрессования трубчатых заготовок из стали 30ХН2МФА с подвижной гладкой оправкой проводили методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса DEFORMTM-3D.

По результатам компьютерного моделирования было определено НДС изготавливаемых деталей, необходимое гидростатическое давление, которое обеспечит деформирование в холодном состоянии для сталей 30ХН2МФА и 20Х17Н2 без разрушений (соответственно – 750 МПа и 700 МПа), конечную геометрию изделия, распределение удельных усилий на поверхности заготовки в месте контакта с инструментом, а также силовые параметры процесса.

Исходя, из полученных данных компьютерного моделирования был разработан технологический процесс получения ствольной заготовки и спроектирована оснастка для её изготовления путём гидроэкструзии в условиях высоких гидростатических давлений [5]. На основании этого было изготовлено штамповое оборудование и реализован процесс гидроэкструзии ствольных заготовок на гладкой подвижной оправке. Сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными расчётным путём, показало их совместимость в пределах 10 %, что подтвердило адекватность полученных расчётов.

Разработанная технология получения ствольных заготовок позволяет снизить себестоимость изготовления изделий и повысить продуктивность производства стволов СО. Это достигается путём исключения из технологического процесса методов получения заготовок на специальном оборудовании.

По результатам компьютерного моделирования показана возможность получения гидропрессованием на профильной оправке в среде высокого гидростатического давления фасонной внутренней полости трубчатой заготовки с образующими профильных элементов, параллельными продольной оси [6].

В то же время показано, что получить нарезной ствол с полигональным профилем поперечного сечения (рис. 2) методом гидроэкструзии заготовки на профильной оправке при высоком гидростатическом давлении не представляется возможным из-за дополнительной деформации стенок профиля, обусловленной разными скоростями движения оправки и металла полуфабриката в очаге деформации.

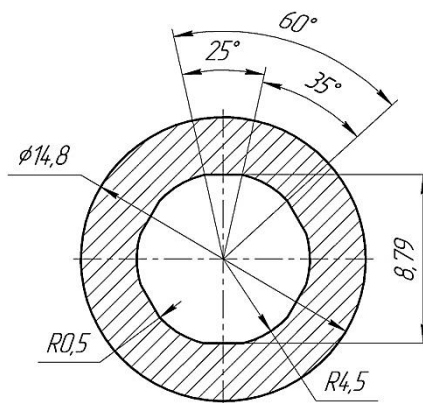


Рис. 2. Поперечное сечение ствола с полигональным профилем

Предложены новые технологии (рис. 3) получения прецизионной толстостенной трубчатой заготовки с внутренними винтовыми канавками на примере изготовления ствола СО с полигональным профилем:

- двухпроходной процесс, основанный на обжатии ствольной заготовки по профильной оправке неприводными роликами (рис. 3, а) [7];
- обжатие ствольной заготовки с профильной оправкой в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску по трём вариантам: без ограничения, с одно- и двухсторонним ограничением течения металла по длине (рис. 3, б) [8].

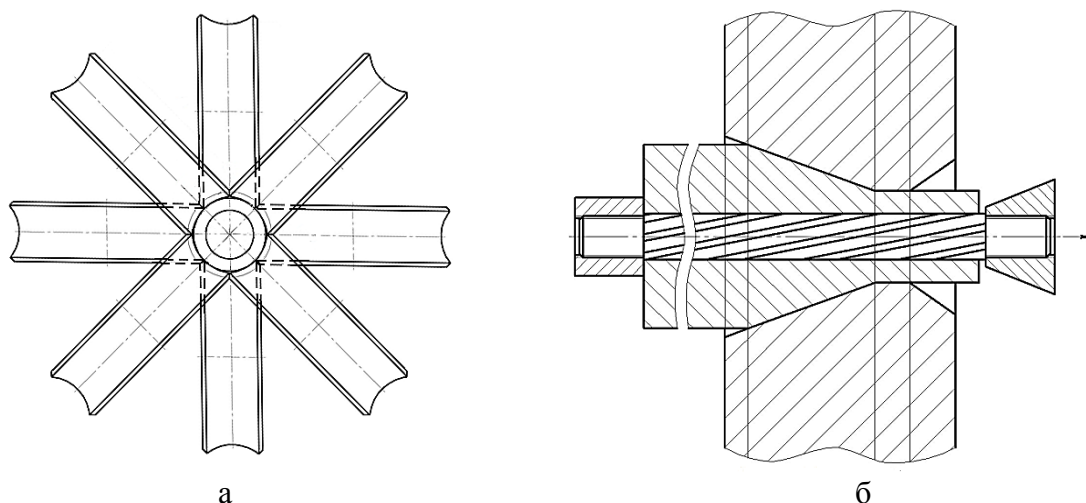


Рис. 3. Схема обжатия ствольной заготовки:
а – между роликами; б – в конической матрице

Для формирования полигонального профиля внутренней поверхности ствольной заготовки, полученной методом гидропрессования в условиях неравноосного всестороннего сжатия, в работе использовался метод её обжатия после отжига на профильной оправке в неприводных роликах (валках). Четырьмя роликами создавалась волока (замкнутый калибр), через которую проталкивалась ствольная заготовка с профильной оправкой.

Данный процесс осуществляется за два прохода, так как ввиду неизбежного наличия зазора между роликами (валками), так называемых, «выпусков» при однократном проходе получается огранка ствольной заготовки, для устранения которой требуется дополнительный второй проход с предварительным поворотом полуфабриката после первого прохода на 45° (рис. 3, а).

Для изучения процесса профилирования внутренней поверхности ствольной заготовки, полученной обжатием по оправке неприводными роликами (валками), определения параметров НДС, усилий на ролики (валки) и крутящих моментов, знание которых необходимо для проектирования технологического устройства, использовался пакет прикладных программ DEFORM^{MT}-3D на основе МКЭ.

Также проведено компьютерное моделирование процесса изготовления ствола с профилем полигонального типа проталкиванием-волочением ствольной заготовки с профильной оправкой через гладкую коническую матрицу (рис. 3, б), с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D, основанного на использовании МКЭ. 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.

Результаты анализа показали приемлемость использования предложенного способа для изготовления ствола с профилем полигонального типа проталкиванием-волочением ствольной заготовки с профильной оправкой через гладкую коническую матрицу без ограничения течения металла по длине заготовки и с односторонним ограничением. Найдено оптимальное значение рабочего угла конической матрицы при обжатии трубчатой заготовки в указанных процессах, которое составило 10° .

Проведенные компьютерное моделирование и натурные эксперименты показали эффективность данных вариантов технологии изготовления стволов СО с полигональным профилем поперечного сечения.

Рассмотрена продольная устойчивость при осевом сжатии составного бруса, состоящего из цилиндрического стержня (оправки), вставленного внутрь цилиндрической трубы (заготовки), в области упругих и пластических деформаций для различных схем деформирования [9].

Рассматривая продольно-поперечный изгиб составного стержня «заготовка-оправка», получена формула для определения силы P_{Σ}^{kp} , при которой происходит потеря продольной устойчивости бруса, состоящего из цилиндрического стержня, вставленного внутрь цилиндрической трубы, в области упругих деформаций:

$$P_{\Sigma}^{kp} = \frac{\pi^3 E}{64(v_l l)^2} \left[D^4 - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{cp}} (D^4 - d^4) \right], \quad (1)$$

где: E – модуль Юнга (принимается $E_1 = E_2 = E$, т. е. материал заготовки и оправки – сталь);

$$\sigma_{\text{ПЦ}}^{cp} = \frac{d^2}{D^2} (\sigma_{\text{ПЦ}(1)} - \sigma_{\text{ПЦ}(2)}) + \sigma_{\text{ПЦ}(2)},$$

$\sigma_{\text{ПЦ}(1)}; \sigma_{\text{ПЦ}(2)}$ – пределы пропорциональности материалов внутреннего стержня и наружной трубы;

l – длина составного стержня;

v_l – коэффициент приведения длины стержней;

d – диаметр оправки (внутренний диаметр трубчатой заготовки);

D – наружный диаметр трубчатой заготовки

Полученная формула отвечает граничным условиям (при $d = 0$; $d = D$ совпадает с формулой Эйлера для определения критической силы для сплошного бруса).

Выражение (1) позволяет вывести формулу для определения гибкости составного бруса. Учитывая аналогию со стержнем сплошного сечения диаметром D , запишем выражение для определения радиуса инерции сечения составного бруса:

$$i = \frac{D}{4} \sqrt{1 - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{cp}} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)}.$$

Тогда гибкость составного бруса может быть определена по формуле:

$$\lambda = \frac{4v_l l}{D \sqrt{1 - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{cp}} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)}}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет определить гибкость бруса, состоящего из цилиндрического стержня, вставленного внутрь цилиндрической трубы, например, с целью сравнения с предельной гибкостью.

По аналогии определена величина критической силы при напряжениях, превышающих предел пропорциональности, т. е. когда в стержнях возникают пластические деформации (гибкость составного бруса меньше предельной), т. е. в области пластических деформаций:

$$P_{\Sigma(nl)}^{kp} = \frac{\pi^2 E}{4(v_l l)^2} \left[D^4 - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{cp}} (D^4 - d^4) \right] \frac{\left[\frac{D^2}{16} (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) - e^2 (\alpha - \sin \alpha) \right]}{D(D - 2e)}, \quad (3)$$

где:

$$e = \frac{1}{2} \left[D - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{cp}} \left(D - d \frac{d^3}{D^3} \right) \right];$$

$$\alpha = 2 \arccos \left[1 - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{cp}} \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \right];$$

$$\alpha = \pi \frac{\alpha^0}{180^0}.$$

Результаты анализа, проведенные расчёты и натурные эксперименты подтвердили тот факт, что при обжатию в конической матрице и неприводными роликами с проталкиванием, при длине ствола, превышающей некоторое критическое значение, возможна потеря продольной устойчивости ствольной заготовки вместе с оправкой в области, как упругих, так и пластических деформаций. Наиболее благоприятным, с точки зрения предотвращения потери осевой (продольной) устойчивости, может быть принято обжатие в роликовой волоке и в конической матрице по схеме волочения.

С помощью современных методов расчёта стволов СО была проведена проверка эффективности новых технологий их изготовления [10, 11].

Впервые разработана методика определения НДС стволов СО с нарезной внутренней поверхностью различной формы, находящихся под воздействием внутреннего статического и динамического нагружения, основанная на использовании МКЭ. Данный расчёт был проведен с использованием компьютерной программы ANSYS.

Проведен расчёт параметров НДС ствола и оболочки пули при их взаимодействии в процессе выстрела. Рассматривалось динамическое взаимодействие пули с внутренней профилированной поверхностью ствола пистолета-пулемёта нарезного и полигонального типа. Анализ был проведен с использованием компьютерной программы ANSYS/LS-DYNA.

ВЫВОДЫ

1. Впервые разработаны и опробованы новые технологии изготовления стволов СО из труднодеформируемых ствольных сталей методами холодного пластического деформирования (две стадии), исключающие недостатки, присущие традиционным способам получения изделий:

- получение длинномерной трубчатой заготовки гидропрессованием на подвижной гладкой оправке в среде высоких гидростатических давлений (получение ствольной заготовки необходимой длины из короткого полого толстостенного полуфабриката);
- профилирование внутренней полости трубчатой заготовки обжатием ствольной заготовки с профильной подвижной оправкой в гладкой конической матрице и неприводными роликами (изготовление ведущего участка ствола с полигональным профилем поперечного сечения).

2. На основании проведенного анализа продольной устойчивости составного бруса, состоящего из цилиндрического стержня (оправка), вставленного внутрь цилиндрической трубы (ствольная заготовка), впервые определены критические значения осевой силы (силы проталкивания), длины составного бруса и благоприятные схемы обжатия в конической матрице и неприводными роликами, с точки зрения предотвращения потери осевой (продольной) устойчивости ствольной заготовки вместе с оправкой. Достоверность полученных аналитических зависимостей подтверждена экспериментально.

3. С целью проверки эффективности новых технологий изготовления стволов СО, разработана уникальная методика определения НДС стволов с нарезной внутренней поверхностью различной формы, находящихся под воздействием внутреннего статического и динамического нагружения. Созданы, конечно-элементные, модели взаимодействия ствола СО с нарезками различной формы и пули при выстреле. Компьютерное моделирование подтвердило преимущества полигонального профиля, с точки зрения динамики и прочности ствола.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туктанов А. Г. *Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия* / А. Г. Туктанов. – М. : Машиностроение, 2007. – 375 с.
2. Розов Ю. Г. *Конечно-элементное моделирование процесса изготовления ствольных заготовок гидроэкструзией в среде высоких гидростатических давлений* / Ю. Г. Розов // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 18–22.*
3. Розов Ю. Г. *Конечно-элементное моделирование процесса изготовления прецизионных трубчатых изделий из стали 20X17H2 гидропрессованием на гладкой оправке. Труды VII Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии», посвящённой 50-летию Карагандинского государственного индустриального университета. Т. 2., 11 – 12 октября 2013 г., – Темиртау. С. 63–68.*
4. Розов Ю. Г. *Аналіз технології виготовлення трубчатих виробів із сталі 20X17H2 гідропресуванням на гладкій оправці* / Ю. Г. Розов, В. В. Піманов, Д. Б. Шкарлута. // *Вісник НТУУ «КПІ». – Машинобудування, 2012. – № 64. – С. 234–238.*

5. Розов Ю. Г. Проектирование оснастки и технологии изготовления ствольных заготовок методом гидроэкструзии на гладкой подвижной оправке. / Ю. Г. Розов // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 2 (35) – С.106-109.

6. Розов Ю. Г. Конечно-элементное моделирование гидроэкструзии прецизионных трубчатых изделий с заданным внутренним профилем. Сборник научных трудов международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2012)», 20-23 мая 2013 г. Евпатория, Украина.

7. Напружено-деформований стан заготовки при внутрішньому профілюванні волочинням неприводними роликками. Доповідь XII Міжнародної науково-практичної конференції «Прогресивна техніка і технологія – 2011» 20 – 24 червня 2011 р / В. І. Стеблюк, М. В. Орлюк, Ю. Г. Розов, Д. Б. Шкарлута. – м. Київ – м. Севастополь, Україна.

8. Розов Ю. Г. Конечно-элементная модель волочения трубчатой заготовки на профильной оправке в конической матрице / Ю. Г. Розов // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – г. Магнитогорск, Россия : Магнитогорский государственный технический университет, 2013. – № 3.

9. Розов Ю. Г. Оценка продольной устойчивости при обжатии трубчатой заготовки на оправке в операциях ОМД. Тезисы докладов IV международной научно-технической конференции «Теоретические и практические проблемы в обработке материалов давлением и качестве специального образования», 14-17 мая 2013 г., Киев, Украина, С. 90–91.

10. Оценка влияния профиля канала ствола на прочность СО / Ю. Г. Розов, В. И. Стеблюк, Ю. М. Сидоренко, Д. Б. Шкарлута // *Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический журнал*. – 2012. – №1. – С. 35–39.

11. Динамическое взаимодействие пули и внутренней поверхности ствола с полигональным профилем / Ю. Г. Розов, В. И. Стеблюк, Ю. М. Сидоренко, Д. Б. Шкарлута // *Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический журнал*. – 2012. – № 2. – С. 31–36.

REFERENCES

1. Tuktanov A. G. *Tehnologija proizvodstva strelkovo-pushechnogo i artillerijskogo oruzhija* / A. G. Tuktanov. – M. : Mashinostroenie, 2007. – 375 s.

2. Rozov Ju. G. *Konechno-jelementnoe modelirovanie processa izgotovlenija stvol'nyh zagotovok gidrojekstuziej v srede vysokih gidrostaticeskikh davlenij* / Ju. G. Rozov // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2013. – № 1 (34). – S. 18–22.

3. Rozov Ju. G. *Konechno-jelementnoe modelirovanie processa izgotovlenija precizionnyh trubchatyh izdelij iz stali 20H17N2 gidroressovaniem na gladkoj opravke*. *Trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauchno-tehnicheskij progress v metallurgii», posvjashhjonnoj 50-letiju Karagan-dinskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. T. 2., 11 – 12 oktjabrja 2013 g., – Temirtau. S. 63–68.

4. Rozov Ju. G. *Analiz tehnologii vigotvlenija trubchatih virobiv iz stali 20H17N2 gidroressuvannjam na gladkij opravci* / Ju. G. Rozov, V. V. Pimanov, D. B. Shkarluta. // *Visnik NTUU «KPI»*. – Mashinobuduvannya, 2012. – № 64. – S. 234–238.

5. Rozov Ju. G. *Proektirovanie osnastki i tehnologii izgotovlenija stvol'nyh zagotovok metodom gidrojekstuzii na gladkoj podvizhnoj opravke*. / Ju. G. Rozov // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2013. – № 2 (35) – S.106-109.

6. Rozov Ju. G. *Konechno-jelementnoe modelirovanie gidrojekstuzii precizionnyh trubchatyh izdelij s zadannym vnutrennim profilem*. *Sbornik nauchnyh trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Intel-lectual'nye sistemy prinjatija reshenij i problemy vychislitel'nogo intellekta (ISDMCI'2012)»*, 20-23 maja 2013 g. Evpatorija, Ukraina.

7. Напружено-деформований стан заготовки при внутрішньому профілюванні волочинням неприводними роликками. Доповідь ХІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Прогресивна техніка і технологія – 2011» 20 – 24 червня 2011 р / В. І. Стеблюк, М. В. Орлюк, Ю. Г. Розов, Д. Б. Шкарлута. – м. Київ – м. Севастополь, Україна.

8. Rozov Ju. G. *Konechno-jelementnaja model' volochenija trubchatoj zagotovki na profil'noj opravke v konicheskoy matrici* / Ju. G. Rozov // *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. – g. Magnitogorsk, Rossiya : Magnito-gorskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet, 2013. – № 3.

9. Rozov Ju. G. *Ocenka prodol'noj ustojchivosti pri obzhatii trubchatoj zagotovki na opravke v ope-racijah OMD*. *Tezisy dokladov IV mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Teoreticheskie i prakti-cheskie problemy v obrabotke materialov davleniem i kachestve special'nogo obrazovanija»*, 14-17 maja 2013 g., Kiev, Ukraina, S. 90–91.

10. *Ocenka vlijanija profilja kanala stvola na prochnost' SO* / Ju. G. Rozov, V. I. Stebljuk, Ju. M. Sidorenko, D. B. Shkarluta // *Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal*. – 2012. – №1. – S. 35–39.

11. *Dinamicheskoe vzaimodejstvie puli i vnutrennej poverhnosti stvola s poligonal'nym profilem* / Ju. G. Rozov, V. I. Stebljuk, Ju. M. Sidorenko, D. B. Shkarluta // *Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal*. – 2012. – № 2. – S. 31–36.

Розов Ю. Г. – канд. техн. наук, доц. ХНТУ

ХНТУ – Херсонский национальный технический университет, г. Херсон.

E-mail: rozovu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2014 г.