

УДК 621.77.01

Ю. Г. РОЗОВ, канд. техн. наук, доц., ХНТУ, Херсон

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

В работе предложен и реализован способ получения длинномерной трубчатой заготовки (ствольной заготовки) из короткой заготовки методом гидроэкструзии на подвижной гладкой оправке в среде высокого гидростатического давления. Предложены новые технологии получения прецизионной толстостенной трубчатой заготовки с внутренними винтовыми канавками на примере изготовления нарезного ствола с полигональным профилем, включающие: двухпроходный процесс; прессование-волочение. Впервые разработана методика определения НДС стволов стрелкового оружия с нарезной внутренней поверхностью разной формы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, оправка, гидроэкструзия, гидростатическое давление, обжатие, волочение, коническая матрица, продольная стойкость, прочность.

Введение. 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 (СО). Технология их изготовления предусматривает две стадии:

1. Получение глубокого отверстия с указанными геометрическими параметрами внутренней поверхности.
2. Получение на внутренней поверхности профильных элементов.

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].

При профилировании канала ствола методами, основанными на холодном пластическом деформировании металла, не всегда обеспечивается желаемое качество канала, а методы профилирования не являются универсальными и имеют ряд существенных недостатков.

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.

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 напряжённо-деформированного состояния (НДС) всестороннего неравномерного сжатия при деформации в среде высокого гидростатического давления или гидропрессование (гидроэкструзию).

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].

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, спроектирована и изготовлена оснастка и реализован процесс гидроэкструзии ствольных заготовок на гладкой подвижной оправке [3]. 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, за счёт исключения из технологического процесса методов получения заготовок на специальном оборудовании.

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

- двухпроходной процесс, основанный на обжати ствольной заготовки по профильной оправке неприводными роликами [4];

- 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 [5].

Для формирования полигонального профиля внутренней поверхности ствольной заготовки методом обжатия неприводными роликами создавалась роликовая волока (замкнутый калибр), через которую проталкивалась ствольная заготовка с профильной оправкой. Процесс осуществляется за два прохода, так как ввиду неизбежного наличия зазора между роликами (валками), при однократном проходе получается огранка заготовки, для устранения которой требуется дополнительный второй проход с предварительным поворотом полуфабриката после первого прохода на 45° (рис. 1).

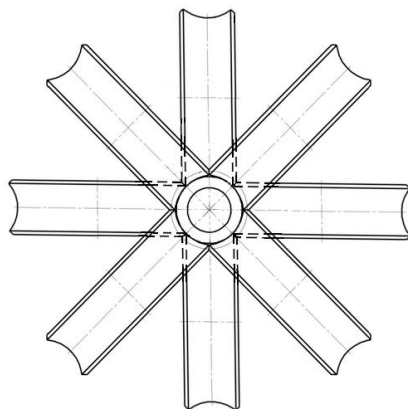


Рис.1 – Схема обжатия ствольной заготовки между роликами

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. 2), с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D, основанного на использовании МКЭ.

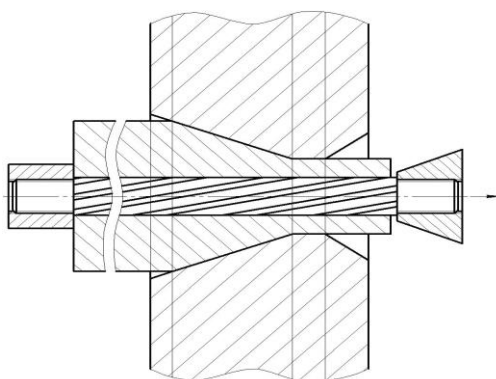


Рис.2 – Схема обжатия ствольной заготовки в конической матрице

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 10^0 .

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.

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

$$P_{\Sigma}^{кр} = \frac{\pi^3 E}{64(\nu_1 l)^2} \left[D^4 - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{плц}(1)}}{\sigma_{\text{плц}}^{сп}} (D^4 - d^4) \right], \quad (1)$$

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

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

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

l – длина составного стержня;

ν_l – коэффициент приведения длины стержней;

d – диаметр оправки (внутренний диаметр трубчатой заготовки);

D – наружный диаметр трубчатой заготовки

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:

$$P_{\Sigma(\text{III})}^{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E}{4(\nu_l l)^2} \left[D^4 - \frac{d^3}{D^3} \frac{\sigma_{\text{III}(1)}}{\sigma_{\text{III}}^{\text{сп}}} (D^4 - d^4) \right] \frac{\left[\frac{D^2}{16} (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) - e^2 (\alpha - \sin \alpha) \right]}{D(D-2e)}, \quad (2)$$

где:

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

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

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

Результаты анализа, проведенные расчёты и натурные эксперименты подтвердили тот факт, что при обжатии 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 [6].

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 из короткого полого толстостенного полуфабриката гидропрессованием на подвижной гладкой оправке в среде высоких гидростатических давлений;

- профилирование внутренней полости трубчатой заготовки обжатием ствольной заготовки с профильной подвижной оправкой в гладкой конической матрице и неприводными роликами.

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.

Список 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. «Обработка материалов давлением». Сборник научных трудов. №1 (34) – 2013. С.18–22. (Краматорск, Донбасская государственная машиностроительная академия). 3. *Розов Ю.Г.* Проектирование оснастки и технологии изготовления ствольных заготовок методом гидроэкструзии на гладкой подвижной оправке. «Обработка материалов давлением». Сборник научных трудов. №2 (35) – 2013. С. 106–109. (Краматорск, Донбасская государственная машиностроительная академия). 4. *Стеблюк В.І., Орлюк М.В., Розов Ю.Г., Шкарлута Д.Б.,* Напружено-деформований стан заготовки при внутрішньому профілюванні волочінням неприводними роликами. Доповідь XII Міжнародної науково–практичної конференції «Прогресивна техніка і технологія – 2011», 20–24 червня 2011 р. Київ – Севастополь, Україна. 5. *Розов Ю.Г.* Конечно–элементная модель волочения трубчатой заготовки на профильной оправке в конической матрице. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. –№ 3. (Магнитогорск, Россия, Магнитогорский государственный технический университет, 2013 г.). 6. *Розов Ю.Г., Стеблюк В.І., Сидоренко Ю.М., Шкарлута Д.Б.* Оценка влияния профиля канала ствола на прочность СО // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно–технический журнал. – 2012. – №1. – С. 35–39.

Bibliography (transliterated): 1. *Tuktanov A.G.* Tehnologija proizvodstva strelkovo–pushechnogo i artillerijskogo oruzhija A.G.Tuktanov – Moscow: Mashinostroenie, 2007. – 375 P. 2. *Rozov Ju.G.*

Konechno–jelementnoe modelirovanie processa izgotovlenija stvol'nyh zagotovok gidrojekstruziej v srede vysokih gidrostaticeskikh davlenij. «Obrabotka materialov davleniem». Sbornik nauchnyh trudov. No1 (34) – 2013. P.18–22. (Kramatorsk, Donbasskaja gosudarstvennaja mashinostroitel'naja akademyja). 3. Rozov Ju.G. Proektirovanie osnastki i tehnologii izgotovlenija stvol'nyh zagotovok metodom gidroekstruzii na gladkoj podvizhnoj opravke. «Obrabotka materialov davleniem». Sbornik nauchnyh trudov. No2 (35) – 2013g. P. 106–109. (Kramatorsk, Donbasskaja gosudarstvennaja mashinostroitel'naja akademyja). 4. Stebljuk V.I., Orljuk M.V., Rozov Ju.G., Shkarluta D.B. Napruzheno–deformovaniy stan zagotovki pri vnutrish'omu profiljuvanni volochinnjam neprivodnymi rolykamy. Dopovid' XII Mizhnarodnoi naukovо–praktynnoi konferencii «Progresivna tehnika i tehnologija – 2011», 20–24 chervnja 2011 – Kiiv – Sevostopol', Ukraina. 5. Rozov Ju.G. Konechno–jelementnaja model' volochenija trubchatoj zagotovki na profil'noj opravke v konicheskoj matrice. Vesnik MGTU im. G.I. Nosova. – 2013. – No3. (Magnitogorsk, Rossija, Magnitogorskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2013). 6. Rozov Ju.G., Stebljuk V.I., Sidorenko Ju.M., Shkarluta D.B. Ocenka vlijanija profilja kanala stvola na prochnost' CO Artillerijskoe i strelkovoe vooruzhenie. Mezhdunarodnyj nauchno–tehničeskij zhurnal. – 2012. – No1 – P. 35–39.

Поступила (received) 21.10.2014

УДК 621.923

И. А. РЯБЕНКОВ, канд. техн. наук, ГП ХМЗ “ФЭД”, Харьков;

Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРЕНИЯ СВЯЗКИ КРУГА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

В работе получены аналитические зависимости для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания на основе отдельного учета энергий “чистого” резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Установлено, что с течением времени обработки в связи с интенсивным трением в зоне резания и увеличением упругих перемещений в технологической системе сила резания увеличивается. Проведен теоретический анализ отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и показана возможность его увеличения.

Ключевые слова: шлифование, резание, трение, шлифовальный круг, сила резания, упругое перемещение, технологическая система, скорость детали

Введение. При изготовлении высокоточных деталей на финишных операциях традиционно широко используются методы обработки свободным абразивом (доводка, полирование и т.д.). Однако в процессе обработки происходит шаржирование абразивных зерен в обрабатываемый материал (в особенности при обработке цветных металлов), что недопустимо. В связи с этим возникает задача применения более прогрессивных методов обработки, исключающих данное явление. Такими методами следует рассматривать шлифование и в ряде случаев финишную лезвийную обработку. Как известно, основным недостатком шлифования является наличие трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом, что приводит к повышению силовой и тепловой напряженности процесса резания, появлению