

*Показана можливість використання подовжнього згинання як економічного способу безривчакового профілювання заготовок. Для реалізації даного способу запропонована технологія спареного штампування поковок рим-болтів і розроблена компоновка штампного інструменту. Виконане дослідне штампування поковок рим-болтів по базовій і новій технологіях на свинцевих фізичних моделях заготовок. Порівняння результатів штампування поковки по двох варіантах виявило підвищення техніко-економічних показників нової технології*

*Ключові слова: спарене штампування, безривчакове профілювання, поковка, рим-болт, подовжнє згинання, викривлення торців*

*Показана возможность использования продольного изгиба в качестве экономичного способа безручьевого профилирования заготовок. Для реализации данного способа предложена технология спаренной штамповки поковок рим-болтов и разработана компоновка штампного инструмента. Выполнена опытная штамповка поковок рим-болтов по базовой и новой технологиям на свинцовых физических моделях заготовок. Сравнение результатов штамповки поковки по двум вариантам выявило повышение технико-экономических показателей новой технологии*

*Ключевые слова: спаренная штамповка, безручьевое профилирование, поковка, рим-болт, продольный изгиб, искажение торцов*

УДК 621.73

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72063

# РАЗРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СПАРЕННОЙ ШТАМПОВКИ ИЗ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБОМ

**В. В. Кухарь**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: kvv.mariupol@gmail.com

**В. А. Бурко**

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра охраны труда и окружающей среды\*\*

E-mail: burko@gmail.com

**А. Г. Присяжный**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: andrejprisyazhnyj@yandex.ru

**Е. Ю. Балалаева**

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра информатики\*\*

E-mail: balalaevaeu@gmail.com

**Н. Н. Нагнибеда**

Кафедра металлургии черных металлов\*\*

E-mail: fox7941@gmail.com

\*Кафедра обработки металлов давлением\*\*

\*\*ГВУЗ «Приазовский государственный

технический университет»

ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500

## 1. Введение

Спаренную или многоступенчатую горячую объемную штамповку поковок применяют в крупносерийном производстве для снижения расхода металла на единицу продукции. Случаи использования спаренной штамповки в мелкосерийном производстве весьма ограничены из-за неоправданного увеличения расходов на дорогостоящий штамповый инструмент и необходимости использования штамповочного оборудования большей мощности. Предварительное профилирование заготовок при объемной штамповке позволяет снизить энергосиловые затраты и повысить стойкость штампов, однако для большинства поковок, штампуемых малыми партиями, отсутствуют рациональные профилирующие операции.

Такие ответственные детали как «рим-болт» изготавливают по различным технологиям с учетом адаптации к установленному в цехе оборудованию. Производство сопровождается высокими расходными коэффициента-

ми. Несмотря на известные промышленные стандарты (межгосударственный стандарт ГОСТ 4751 «Рим-болты. Технические условия», европейские стандарты ISO 3266, DIN 580, PN 82472, DIN 444, индийский стандарт IS 4190), имеются сведения о различных конструкциях изделий «рим-болт», что определяется условиями их эксплуатации и изготовления. Рим-болты могут быть различными по форме и размерам, их различают по диаметру кольца, размерам резьбовой части, а также по виду крепления между ними, кроме того, регламентируется их твердость. Малые и средние партии поковок рим-болтов различных конструкций штампуют без предварительного профилирования, исключая усложнение инструмента, что вызывает нежелательную макроструктуру поковок с перерезыванием волокон, повышение энергопотребления и расхода основного материала. Поэтому разработка рациональной профилирующей операции при штамповке ответственных поковок рим-болтов представляет актуальную задачу для повышения технико-экономических показателей их мелкосерийного производства.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Деталь «рым-болт» работает на растяжение и срез, в кольцевой части детали при нагрузке возникают напряжения изгиба, резьба детали испытывает напряжения среза. При вкручивании детали в такелажное приспособление при помощи рычага, продеваемого в кольцо, она работает на кручение.

Размеры рымов выбирают, руководствуясь справочными данными [1, 2], в зависимости от вида выполняемых такелажных работ, массы транспортируемого груза, схемы закрепления и величины нагрузок. Их грузоподъемность изменяется в широком диапазоне (от 40 кг до 20 т) и зависит от расположения петли (угла её наклона) по отношению к пальцу приспособления. Обычно поковки рым-болтов изготавливают из углеродистых конструкционных сталей марок 20, 25 или 45 по ГОСТ 1050, допускается применение легированных сталей.

Для эксплуатации рымов в условиях повышенной влажности (в портах, на судах и т. п.) их подвергают оцинковке [3]. При изучении условий разрушения оцинкованной детали поддержки высоковольтного провода, установлено, что кроме неблагоприятных внешних факторов (значительных переменных нагрузок, коррозии), существенное влияние на поломку оказала некачественная структура используемой катаной стали [3]. Очевидно, что для улучшения макро- и микроструктуры стальных изделий их изготовление следует вести объемной штамповкой с формированием требуемого направления волокна на предварительных профилирующих операциях.

В источнике [4] приведены способы производства рым-болтов в полевых условиях, включающие кузнечную сварку элементов изделия. Данные способы предназначены только для ручнойковки рымов в сельском хозяйстве и не рекомендуются промышленными стандартами, т. к. их прочность, а, соответственно, и безопасность людей не гарантируются.

Изготовление поковок в подкладных открытых штампах осуществляют на ковочных молотах (КМ), кривошипных горячештампочных прессах (КГШП), гидравлических прессах (ГП) и винтовых фрикционных прессах (ВФП). Экономически это оправдано при серийном или мелкосерийном производстве поковок. В работе [5] приведен подкладной штамповый инструмент для штамповки поковок относительно простых форм за один переход. Выполненные с привлечением конечно-элементного моделирования исследования позволили выявить неблагоприятные термодинамические нагрузки, приводящие к разрушению штампов. При штамповке поковок более сложных конфигураций требуется применение предварительного профилирования или заготовок, изготовленных в заготовительных подкладных штампах [6, 7]. В качестве подкладного профилирующего инструмента применяют сменные кольца, накладки, а для высоколегированных сталей и цветных металлов и их сплавов существенное значение приобретает обеспечение требуемого термического режима штамповки.

Известны случаи, когда перед предварительной и окончательной штамповкой используют ковочные операции, такие как плочение, протяжка или подкатка [8]. Реализация технологии с большим чис-

лом переходов сопровождается увеличением ширины штампового пространства, а, следовательно, и использованием энергоёмкого оборудования большей мощности. Выполнение каждого перехода отдельно для группы поковок требует нескольких подогревов металла и увеличивает не утилизируемые отходы металла с угаром. Для штамповки поковок рым-болтов в штампах горизонтально-ковочных машин (ГКМ) необходимо обеспечить набор утолщений в посадочных ручьях, формовку, прошивку, а в некоторых случаях и гибку «ушка» (специальная форма изделия) движением бокового ползуна. Сложные и материалоемкие штампы, а также особенности кинематики работы ГКМ, оправдывают их использование только при крупносерийном и массовом производстве.

Групповую или многоштучную штамповку внедряют для повышения коэффициентов использования материала, т. к. технологические потери металла распределяются на несколько изделий, штампуемых из одной заготовки [9]. При многоштучной штамповке мелких поковок на штампе размещают от 4 до 10 изделий цепочкой друг за другом. Использование стандартной вставки позволяет расположить на ней две линии фигур с окончательными размерами. После износа фигур первой линии переходят на штамповку поковок во второй линии.

Спаренная штамповка является разновидностью многоштучной штамповки, при этом известно успешное применение спаренных заготовок в области электрогидравлической [10] и листовой [11, 12] штамповки. Целью спаренной штамповки также является повышение показателей использования металла заготовки [13]. При горячей объемной штамповке из спаренной заготовки проектирование предварительных ручьев ведут с точки зрения рационального расположения поковок на гравюре штампа в зависимости от конфигурации заготовки или полуфабриката [14, 15]. Использование данных принципов позволяет выбрать вариант штамповки из заготовки простой формы или с предварительным профилированием. Для осуществления проектирования привлекают эффективные численные или инженерные методы. Поковки в спаренной заготовке располагают параллельно, последовательно или под углом друг к другу [16, 17]. При штамповке поковок с изогнутой осью осуществляют предварительное профилирование заготовок (на ковочных вальцах [17]) или симметрично komponуют поковки для возможности использования заготовки простой формы. Проведенный анализ показывает, что технологический вариант спаренной штамповки поковок с прямолинейной осью из предварительно изогнутой и спрофилированной заготовки ранее не рассматривали.

Следовательно, для совершенствования технологии изготовления поковок рымов необходимо применение экономных профилирующих операций перед окончательной штамповкой. Данные операции должны быть выполнимы на основном штамповочном оборудовании и не увеличивать энерго- и материалоемкость штампуемых изделий. В качестве таких профилирующих операций перспективным выглядит использование безручьевого технологического подготки заготовок, концепция реализации которых изложена в работе [18]. На основе принципа максимума свободных поверхностей при безручьевом профилировании

предложены технологические процессы штамповки круглых в плане поковок из заготовки, профилированной осадкой плоскими плитами [19], и производство изделий с заостренным концом способом продольного разрыва заготовки на две поковки [20].

Для достижения энергоресурсосбережения допускается пересмотр технологического решения с переходом от изготовления за один ход пресса единичной поковки к спаренной или многоштучной штамповке. Совмещение технологических приемов безручьевого профилирования и спаренной штамповки позволит достигнуть положительных результатов по существенному повышению эффективности использования материала. В указанной работе [12] предложены оптимизирующие алгоритмы, адаптированные под САЕ-систему и помогающие выбрать тип штамповки, рассчитать заготовку для спаренной штамповки из полосы. Подобный анализ успешно применен для достижения экономии материала и повышения качества изделий из сплошных и трубных заготовок [21, 22]. При использовании безручьевых технологий требуют уточнения параметры, определяющие область применения профилирующих операций. К данным параметрам относят не только характеристики структуры металла, но и показатели формы и размеров профилированных заготовок, гарантирующие получение поковок высокого качества, величины которых требуют уточнения для каждой безручьевого операции и конкретного типа поковки.

Для повышения технико-экономических показателей штамповки поковки рым-болта предложено новое технологическое решение, включающее предварительное безручьево профилирование относительно высокой заготовки (на две поковки) продольным изгибом с дальнейшей штамповкой в двояном штампе. Продольный изгиб в технологиях штамповки традиционно воспринимают как негативное явление, которое исключают при предварительной осадке заготовок, а в процессе штамповки обеспечивают условия предотвращающие образование дефекта «зажим» в поковках [23]. Продольный изгиб совмещает в себе за один ход пресса три технологических операции: сбив окалины, гибку и перераспределение металла, близкое к конфигурации штамповочного ручья.

Таким образом, проблема разработки новой технологии штамповки поковок типа «рым-болт» с целью повышения коэффициента использования металла является перспективной. Научно-практический интерес представляет адаптация технологии штамповки малых партий изделий на основе безручьевого продольного изгиба заготовок под существующее оборудование, с исключением установки более мощного или дополнительного профилирующего оборудования в цехе. Оценка эффективности новой технологии требует проведения исследования геометрических показателей, инженерного анализа, выполнения проектировочных работ и опытной штамповки изделий с проведением сравнения технико-экономических показателей точности штамповки по базовому и новому вариантам, что ранее не проводилось.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка технологии штамповки поковки «рым-болт» с предварительным

профилированием, выполняемом на основном штамповочном оборудовании, для повышения технико-экономических показателей производимой продукции.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- провести инженерный анализ поковки и выбрать экономичный способ получения профилированной заготовки для штамповки поковки рым-болта;
- проанализировать формообразование торцевых участков и разработать методики расчета их искажения при профилировании продольным изгибом для учета величины смятия на стадии проектирования технологий кузнечно-штамповочного производства;
- разработать конструкцию штампового инструмента и произвести опытную штамповку поковки «рым-болт» с использованием новых технологических решений;
- сравнить технико-экономические показатели штамповки поковок по базовой и новой технологии.

### 4. Материалы и методы исследований: оборудование, методики, анализ и обоснование предварительного профилирования заготовки продольным изгибом для спаренной штамповки

Разработку осуществляли относительно поковки рым-болта, штампуемого в подкладных штампах на винтовом фрикционном прессе номинальной силой 6,3 МН. Проводили построение эпюры диаметров (расчетной заготовки) и эпюры сечений, т.е. в каждом характерном  $i$ -м сечении поковки находили его площадь  $S_{n,i}$  и площадь двухстороннего облоя  $2S_{об}$  с учетом заполнения магазина. Тогда площадь эпюры в её  $i$ -м сечении:  $S_{э,i} = S_{n,i} + 2S_{об}$ , а соответствующий диаметр:  $d_{э,i} = 1,13\sqrt{S_{э,i}}$ . Эпюра диаметров, построенная для поковки «рым-болт» (рис. 1, а), приведена на рис. 1, б. Для построения эпюры сечений выбирали масштабный коэффициент  $M=20$ , тогда высота сечений  $h_{э,i} = S_{э,i} / M$ . Эпюра сечений приведена на рис. 1, в. Эскиз гравюры действующего штампа изображен на рис. 2.

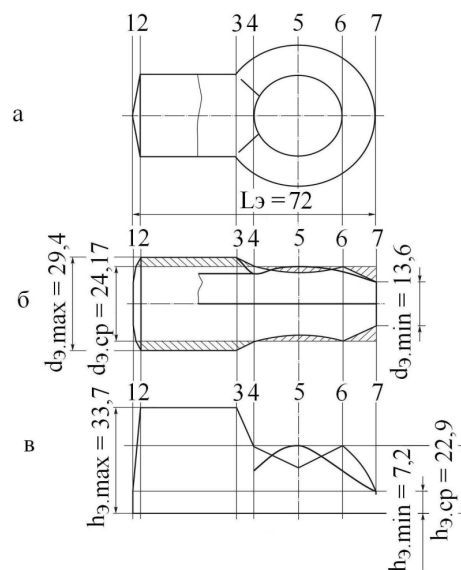


Рис. 1. Инженерный анализ поковки «рым-болт»: а – эскиз поковки; б – эпюра диаметров; в – эпюра сечений

По базовой технологии штамповку ведут из заготовки с диаметром, не меньшим максимального диаметра эюры:  $D_0 \geq D_{э, \max}$ . Т.е. размеры заготовки: начальный диаметр  $D_0 = 30$  мм ( $\varnothing 30$  ГОСТ 2590), начальная высота  $H_0 = 72$  мм. При порезке заготовок из унифицированной штанги проката длиной 6000 мм коэффициент расхода металла, рассчитанный согласно рекомендациям [6], составляет  $K_p = 0,98$ . Объем заготовки (без учета угара, при прочих равных условиях, а также с учетом прогнозируемого физического моделирования штамповки на свинцовых заготовках без нагрева):  $V_{заг} = 50868$  мм<sup>3</sup>. Объем эюры диаметров на одну поковку:  $V_э = 32948$  мм<sup>3</sup>. Масса стальной заготовки (принимая плотность стали  $\rho = 7860$  кг/м<sup>3</sup>):  $M_{заг} = 0,4$  кг. Норма расхода металла [6, 18]:  $N_p = M_{заг} / K_p = 0,399 / 0,98 = 0,408$  кг. Коэффициент выхода годного поковок [11]:  $K_v = M_{п} / M_{заг} = 0,190 / 0,4 = 0,475$ . Коэффициент использования металла поковки по норме расхода [11]:  $K_{ин} = M_{п} / N_p = 0,190 / 0,408 = 0,466$ . Объем дополнительного металла заготовки:  $V_{доп} = V_{заг} - V_э = 50868 - 32948 = 17920$  мм<sup>3</sup>. Масса дополнительного объема (перерасход металла) заготовки:  $M_{доп} = 0,141$  кг.

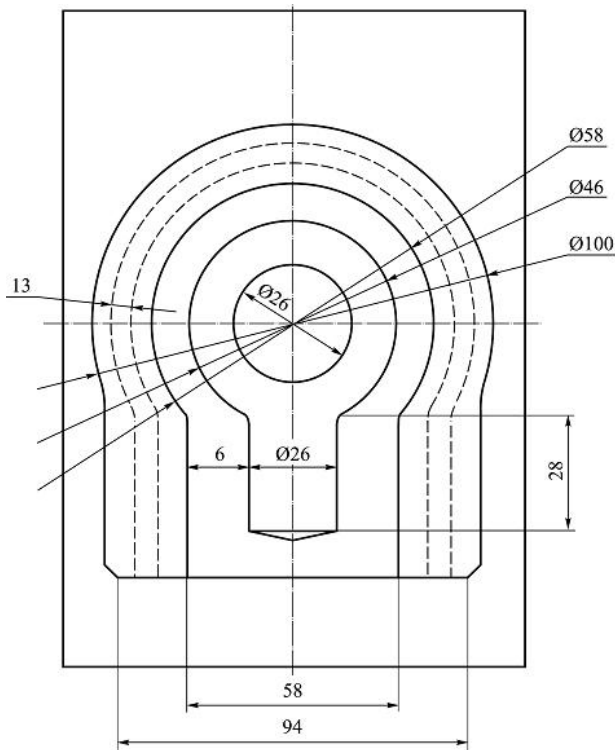


Рис. 2. Эскиз гравюры штампа для штамповки поковки «рым-болт»

Для повышения технико-экономических показателей предложено технологическое решение, включающее предварительное безручьевое профилирование относительно высокой заготовки (на две поковки) продольным изгибом с дальнейшей штамповкой в сдвоенном штампе. В результате продольного изгиба заготовка изгибается с перераспределением металла, при котором в центральной части происходит набор утолщения. Развертка профилированной заготовки для спаренной штамповки поковок «рым-болт» наиболее соответствует эюре диаметров сдвоенной поковки (рис. 3).

Длина развертки и объем расчетной заготовки (эюры диаметров сдвоенной поковки с облоем) для спаренной штамповки:  $L_{э2} = 144$  мм и  $2V_э = 65896$  мм<sup>3</sup>. Средняя площадь эюры:  $S_{э, \text{ср}} = 2V_э / L_{э2} = 65896 / 144 = 457,6$  мм<sup>2</sup>. Средний и максимальный диаметры эюры:  $D_{э, \text{ср}} = 24,17$  мм и  $D_{э, \text{max}} = 29,4$  мм. По данным показателям производство поковки требует применения протяжного (или пережимного) ручья. Коэффициент подкатки:  $K_{по} = (D_{э, \text{max}} / D_{э, \text{ср}})^2 = 1,49$ . На прессовом оборудовании, исключая применение подкатных и пережимных ручьев, данный коэффициент подкатки  $K_{по}$  получить невозможно. Вычисленные диаметры эюры и коэффициент подкатки соответствуют базовому случаю штамповки одной поковки из одной заготовки, т.е. подтверждают необходимость профилирования.

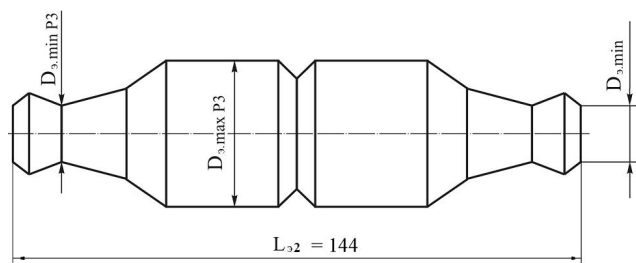


Рис. 3. Эскиз формы развертки расчетной заготовки для спаренной штамповки двух поковок «рым-болт»

Для экспериментальных исследований в лабораторных условиях использовали свинцовые заготовки. При комнатной температуре в свинце имеют место процессы, подобные процессам рекристаллизации в стальных заготовках при высоких температурах [24]. Кривые упрочнения свинца и стали при горячей деформации имеют подобные характеристики, а добавка к свинцу легирующих элементов (таких как сурьма, цинк и др.) позволяет получить составы, физически моделирующие деформацию определенных марок сталей [25]. Использование свинца, как моделирующего материала, весьма распространено.

### 5. Разработка метода учета искажения торцов профилированной заготовки при дальнейшей штамповке

С привлечением метода планирования эксперимента получены регрессионные зависимости геометрических характеристик искажения торцов от отношения исходной высоты ( $L_0$ ) к диаметру ( $D_0$ ) заготовки и условной степени осадки  $\epsilon_y = (L_0 - H_k) / L_0$  (где  $H_k$  – конечная высота заготовки). Общий вид полинома, описывающего регрессионные зависимости критериев формоизменения от влияющих факторов при продольном изгибе заготовок круглого поперечного сечения:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (1)$$

где  $Y$  – контролируемые критерии формоизменения  $a$ ,  $b$  и  $c$  (рис. 4);  $X_2 = (\epsilon_y - 0,34) / 0,2$  – кодированное значение фактора, характеризующего влияние условной степени деформации при продольном изгибе.

Для заготовок круглого сечения кодированные значения фактора относительной высоты в интервалах  $m_0 = 4,0 - 5,0$  и  $m_0 = 5,0 - 6,0$  составляют  $X_1 = (m_0 - 4,5) / 0,5$



и  $X_1 = (m_0 - 5,5) / 0,5$  соответственно. Величина  $m_0 = L_0 / D_0$  – относительная высота заготовки.

В результате проведения экспериментов и выполненных расчетов получены количественные оценки коэффициентов уравнений (1) для различных критериев формоизменения  $Y$ , представленные в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов уравнения регрессии (1) для расчета критериев формоизменения заготовок круглого поперечного сечения

Y	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>12</sub>	Y	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>12</sub>
m <sub>0</sub> =4,0–5,0					m <sub>0</sub> =5,0–6,0				
(a/D <sub>0</sub> )·100	25,53	16,03	19,93	11,43	(a/D <sub>0</sub> )·100	54,9	13,35	34,2	2,85
(b/D <sub>0</sub> )·100	70,63	-14,9	-2,13	-7,63	(b/D <sub>0</sub> )·100	43,98	-11,8	-7,32	2,43
(c/D <sub>0</sub> )·100	54,08	23,07	18,58	4,57	(c/D <sub>0</sub> )·100	85,95	8,8	19,2	-3,95

Данные уравнения регрессии использовали для рассмотрения двух основных задач:

**Задача 1** – учет смятия торцов при дальнейшей штамповке профилированной заготовки в штамповочном ручье, в котором смятые торцевые участки размещают в крайних элементах или отростковых полостях гравюры.

**Задача 2** – учет смятия торцов при производстве изделий с изогнутой осью, когда после продольного изгиба торцевые участки пластической деформации не подвергаются.

Поясним выбор данных задач:

**Задача 1.** Чем выше отношение  $m_0$  при продольном изгибе заготовок, тем большая поверхность торца отрывается от плоскости осадочной плиты и наблюдается меньшее смятие торцевых участков. При дальнейшей штамповке профилированной заготовки в ручье для производства изогнутых поковок, в котором смятые торцевые участки размещают в крайних элементах или отростках гравюры, необходима проверка заполнения данных полостей металлом. Такую проверку при освоении новой технологии выполняют проведением опытной штамповки или, в случае возможности наиболее полного учета условий деформирования, конечно-элементным моделированием течения металла. Отметим, что данные мероприятия увеличивают общую материалоемкость продукции и трудоемкость проектирования, а поэтому требуют разработки альтернативной инженерной методики.

**Задача 2.** При производстве изделий с изогнутой осью, когда после продольного изгиба торцевые участки пластической деформации не подвергают, необходимо сопоставление размеров смятия с размерами допустимых отклонений или припусками на дальнейшую механическую обработку изделия.

**Задача 1.** Рассмотрим вариант размещения изогнутой профилированной заготовки в гравюре штампа для штамповки поковок с изогнутой осью (рис. 4, а). При смятии торцевого участка на величину  $b$  необходимо увеличить длину отростков профилированной заготовки, т. е. увеличить длину развертки профилированной заготовки на  $\Delta L$  (рис. 4, б) для заполнения углов штампа (УШ) (рис. 4, а). Рассматриваемое смятие образовано смещением части объема, при неизменной величине общего объема металла на участке отростка. Выступающий за пределы гравюры металл

вытесняется в облой на следующем штамповочном переходе.

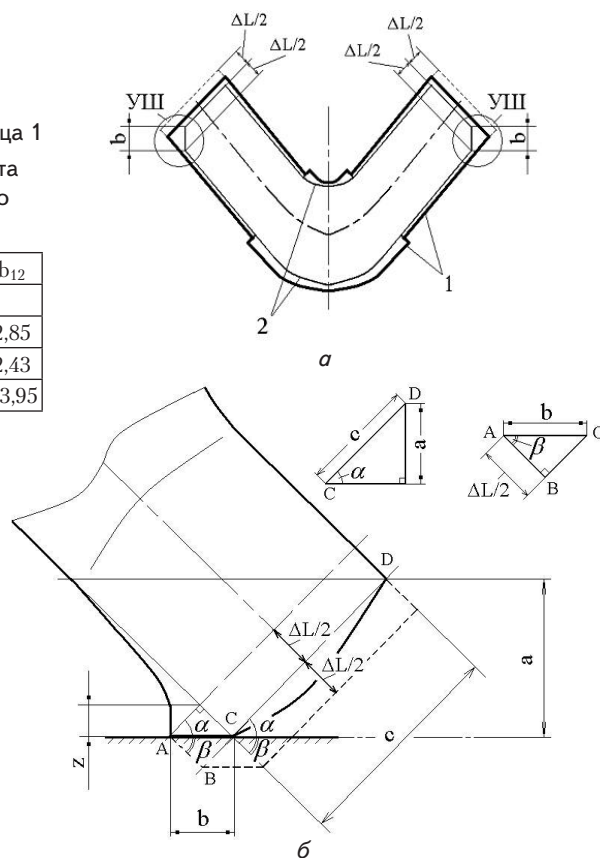


Рис. 4. К учету искажения торцов заготовки, профилированной продольным изгибом, при дальнейшей штамповке: а – размещение поковки в гравюре штампа; б – схема к расчету увеличения длины развертки профилированной заготовки; 1 – контуры ручья; 2 – контуры заготовки

Из треугольника  $ABC$  (рис. 4, б) находим:  $\Delta L / 2 = b \cdot \cos \beta$ , причем угол  $\beta = (90^\circ - \alpha)$ . Исходя из геометрических соотношений по рис. 4, б, по известным величинам  $a$  и  $c$  [26], нетрудно вычислить:  $\alpha = \arcsin(a / c)$ .

Тогда окончательно получим:

$$\Delta L = 2 \cdot b \cdot \cos \left[ 90^\circ - \arcsin \left( \frac{a}{c} \right) \right]. \tag{2}$$

При известной длине эпюры диаметров ( $L_e$ ) уточненное укорочение оси заготовки ( $\delta$ ), профилируемой продольным изгибом:

$$\delta = 1 - \frac{L_e + \Delta L}{L_0} = \frac{L_k + \Delta L}{L_0}. \tag{3}$$

Учитывая, что  $D_0 = 1,08 \cdot \sqrt[3]{(V_e + \Delta V_e) / m_0}$ , где  $V_e$  и  $\Delta V_e$  – объем эпюры диаметров и дополнительный объем, связанный с приращением длины профилированной заготовки на  $\Delta L$ , выражение (3) представим в виде:

$$\delta = 1 - 0,926 \frac{L_e + \Delta L}{m_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_e + \Delta V_e}{m_0}}}. \tag{4}$$

При этом

$$(L_e + \Delta L) = L_e \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_e} \right),$$

а также

$$(V_e + \Delta V_e) = V_e \left( 1 + \frac{\Delta V_e}{V_e} \right) = V_e \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_e} \right).$$

Вычислим начальное расчетное значение отношения  $m_{0,0}$ , при котором для заданных  $V_e$  и  $L_e$  величина  $\delta = 0$ . Тогда, из выражения (4), после преобразований получим:

$$m_{0,0} = 0,891 \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_e} \right) \sqrt{\frac{L_e^3}{V_e}}, \quad (5)$$

или, учитывая, что  $L_e = L_0(1 - \delta)$ , при  $\delta = 0$  запишем:

$$m_{0,0} = 0,891 \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) \sqrt{\frac{L_e^3}{V_e}}. \quad (6)$$

Тогда, используя уравнение (2), запишем уточненное выражение для вычисления относительной высоты цилиндрической заготовки:

$$m_0^* > 0,891 \left[ 1 + \frac{2 \cdot b \cdot \cos \left[ 90^\circ - \arcsin \left( \frac{a}{c} \right) \right]}{m_0 \cdot D_0} \right] \sqrt{\frac{L_e^3}{V_e}}. \quad (7)$$

Учитывая, что параметры  $a = a(m_0; \epsilon_y)$ ,  $b = b(m_0; \epsilon_y)$  и  $c = c(m_0; \epsilon_y)$  представляют собой функции, определяемые регрессионными уравнениями (1), то выражение (7) является трансцендентным неравенством. При инженерном рассмотрении в указанные функции в качестве  $m_0$  подставляют значение, вычисленное по уравнению (5).

**Задача 2.** Рассмотрим вариант, когда профилированная заготовка в области торцов не подвергается дальнейшей пластической деформации. В данном случае величина смятия  $b$  не должна превышать суммы гипотенуз треугольников NMG и MKF (рис. 5), катетами в которых являются припуски на механическую обработку (и/или величины допускаемых отклонений):  $\Pi/2$  – односторонний припуск (допуск),  $\Pi_k$  – концевой припуск (допуск). Запишем:

$$b \leq (x_1 + x_2). \quad (8)$$

Односторонние смятия вычислим как

$$p = b \cdot \cos \alpha; \quad q = b \cdot \sin \alpha, \quad (9)$$

при этом угол  $\alpha$ , как и для предыдущего случая,  $\alpha = \arcsin(a/c)$ .

Величины  $x_1$  и  $x_2$  находим в виде соотношений (рис. 5):

$$x_1 = \frac{\Pi/2}{\cos \alpha} \quad \text{и} \quad x_2 = \frac{\Pi_k}{\sin \alpha}. \quad (10)$$

Учитывая, что  $\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$ , окончательно запишем:

$$x_1 = \frac{\Pi/2}{\sqrt{1 - (a/c)^2}} \quad \text{и} \quad x_2 = \frac{\Pi_k}{(a/c)}. \quad (11)$$

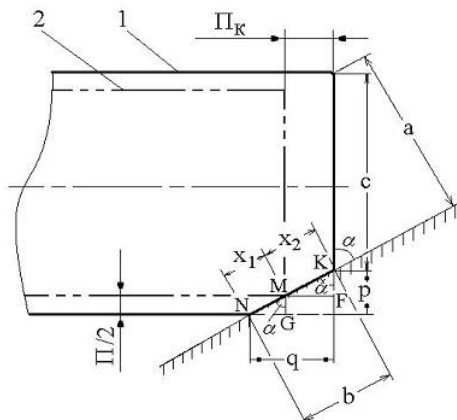


Рис. 5. К учету искажения торцов заготовок при финишной операции профилирования продольным изгибом: 1 – контур поковки; 2 – контур детали

Тогда условие (8) принимает вид:

$$b \leq \left[ \frac{\Pi/2}{\sqrt{1 - (a/c)^2}} + \frac{\Pi_k}{(a/c)} \right]. \quad (12)$$

Величины  $\Pi$  и  $\Pi_k$  устанавливаются соответствующими стандартами, а параметры  $a = a(m_0; \epsilon_y)$ ,  $b = b(m_0; \epsilon_y)$  и  $c = c(m_0; \epsilon_y)$  вычисляются из уравнений регрессии (1).

### 6. Экспериментальная штамповка из заготовки, профилированной продольным изгибом, и обсуждение результатов исследования

Разработанная методика применена при расчете переходов размеров заготовки для парной штамповки поковки «рым-болт» и при промышленном освоении технологии производства поковки «скоба» в условиях кузнечно-прессового цеха ПАО «ММК им. Ильича» (Украина, г. Мариуполь). Величины технико-экономических показателей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение техникоэкономических показателей точности штамповки по базовому и новому варианту

Показатель	Базовый процесс	Разработанный процесс	% от базового
$K_p$	0,98	0,994	101,4
$K_b$	0,475	0,599	121,1
$K_{шт}$	0,466	0,596	127,9
$M_{заг}, \text{кг}$	0,4	0,317	79,3
$N_p, \text{кг}$	0,408	0,319	78,2
$M_{дон}, \text{кг}$	0,141	0,058	58,9

Согласно принципам безручьевого профилирования заготовок продольным изгибом, по предложенной технологии отрезанную заготовку осаживают с потерей устойчивости, профилированный полуфабрикат

кантуют на бок и укладывают в ручей для штамповки одновременно двух поволок из одной заготовки. Для расчета отношения длины спаренной заготовки на две поковки ( $L_0$ ) к диаметру ( $D_0$ ) и степени условной деформации ( $\epsilon_y$ ) при продольном изгибе предварительно проводили вычисления по формуле (6). В начальном случае принимали  $\Delta L=0$ , тогда  $m_{0,0}^*=5,998$ , т. е.  $m_0 > 5,998$ . Выполняя компоновку штампа с расположением двух поволок под углом  $\phi$ , из геометрических соотношений установили, что  $\phi \geq 48^\circ$  (рис. 6). Для поведения расчетов предварительно принимали  $m_0=6,0$ . Для данного соотношения центральный угол получит требуемое значение  $\phi=48^\circ$  при  $\epsilon_y=40\%$ .

Плита для осаживания

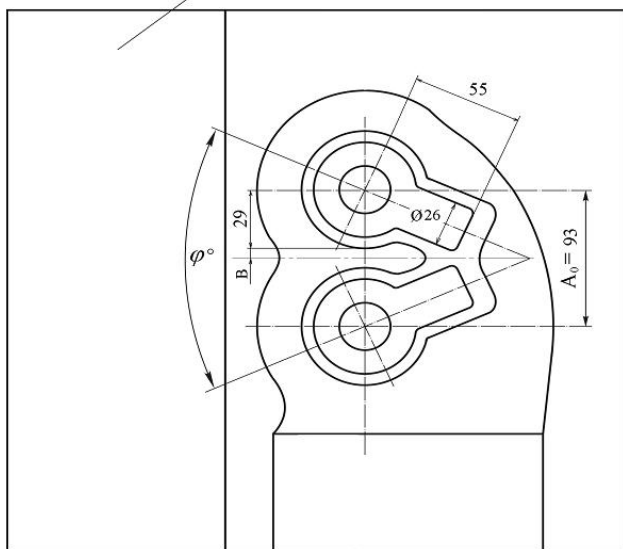


Рис. 6. Эскиз компоновки штампа для спаренной штамповки поволок «рым-болт» с профилированием заготовок продольным изгибом

Макропоказатели формоизменения при заданных технологических параметрах профилирования [27, 28]:  $K=D_{\text{э, max}}/D_{\text{э, min ПЗ}}=1,126$ ,  $k_1=D_{\text{э, min ПЗ}}/D_0=1,041$ ,  $k_2=D_{\text{э, max}}/D_0=1,171$ . Диаметр заготовки выбирали из условия выполнимости набора металлавместе максимального диаметра  $D_{\text{э, max}}$ . Предварительно:  $D_0^*=D_{\text{э, max}}/k_2=29,4/1,171=25,1$  мм. С некоторым запасом принимали  $D_0=26$  мм ( $\text{Ø} 26$  ГОСТ 2590). В сечениях, соответствующих минимальному диаметру эпюры, набор металла превысит требуемую величину:  $D_{\text{э, min ПЗ}}=k_1 \cdot D_0=1,041 \times 26=27,06$  мм. Тогда расчетная минимально достаточная длина исходной заготовки:  $L_0=m_0 \cdot D_0^*=6 \times 25,1=150,6$  мм. Расчетный объем эпюры диаметров (расчетной заготовки) на две поковки:  $V_{\text{э2}}=79917$  мм<sup>3</sup>.

При продольном изгибе пластичных заготовок имеет место искажение торцевых участков, что требует увеличения длины заготовки. Величину  $\Delta L$  вычисляли, согласно результатам источников [27, 28]:  $\Delta L=5,2$  мм. Откуда (по приведенной выше формуле (6)):

$$m_{0,0}=0,891 \left( 1 + \frac{5,2}{144} \right) \sqrt{\frac{144^3}{79917}}=5,643.$$

Окончательно принимали длину заготовки:  $L_0=D_0 \cdot m_{0,0} + \Delta L=152$  мм. Уточненное отношение  $m_0=152/26=5,85$ . Следовательно, соблюдено условие

[27]:  $(m_0=5,85) > (m_{0,0}=5,643)$ . Требуемое укорочение оси заготовки:  $\delta=[(152-144)/152] \times 100\%=5,3\%$ . Уточняли:  $\epsilon_y=0,39$  (39%). При заданных величинах  $m_0$  и  $\epsilon_y$  центральный угол:  $\phi=54 > 48^\circ$ . Конечная высота, до которой необходимо осадить заготовку при продольном изгибе:  $H_k=L_0(1-\epsilon_y)=152(1-0,39)=93$  мм.

Для варианта спаренной штамповки из изогнутой заготовки, компоновка штампа для которого приведена на рис. 6, вычисляли:  $K_p=0,994$ . Объем заготовки на две поковки по окончательным размерам:  $V_{\text{зар2}}=80660$  мм<sup>3</sup>, т. е. на одну поковку  $V_{\text{зар1}}=40330$  мм<sup>3</sup>. Масса стальной заготовки: на две поковки  $M_{\text{зар2}}=0,634$  кг, на одну поковку  $M_{\text{зар1}}=0,317$  кг. Норма расхода:  $N_p=0,317/0,994=0,319$ , а также  $K_p=0,19/0,317=0,599$ ,  $K_{\text{ин}}=0,19/0,319=0,596$ . Дополнительный (компенсирующий) объем металла:  $V_{\text{доп}}=V_{\text{зар}}-V_{\text{э}}=40330-32948=7382$  мм<sup>3</sup>. Масса дополнительного объема (перерасхода металла) заготовки:  $M_{\text{доп}}=0,058$  кг. Результаты сравнения технико-экономических показателей точности для базового и нового варианта штамповки сведены в табл. 2.

Для подтверждения преимуществ усовершенствованной технологии проводили сравнение вариантов штамповки в подкладных штампах по базовому (рис. 7) и по новому (рис. 8) варианту. Для оценки штампуемости «рым-болтов» по усовершенствованной технологии профилированный полуфабрикат (рис. 8, б) помещали в существующий штамп после предварительного распиливания по осевому поперечному сечению (рис. 8, в, г). В обоих случаях гравюру штампа смазывали индустриальным маслом.

При штамповке по базовой технологии наблюдается значительный облой в области кольцевой части «рым-болта». При штамповке из профилированной заготовки количество образовавшегося облоя меньше, чем по базовому варианту (рис. 8). Кроме того, наблюдается более равномерное его распределение по периметру поковки, причем в области перехода стержневой в кольцевую часть облой минимален (рис. 8, е и рис. 9), что связано с особенностями формы полуфабриката.



а



б

Рис. 7. Штамповка поковки «рым-болт» по базовой технологии: а – заготовка ( $\text{Ø} 30 \times 72$  мм) в штампе; б – поковка с облоем в штампе



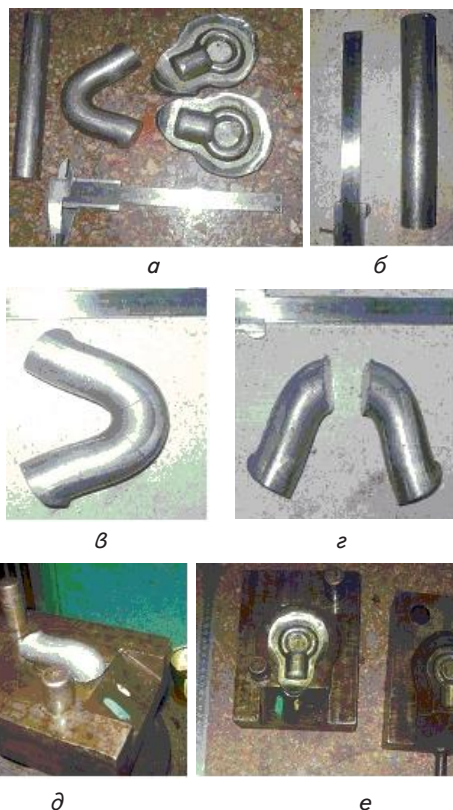


Рис. 8. Штамповка поковки «рым-болт» по усовершенствованной технологии: а – последовательность переходов; б – исходная заготовка на две поковки (Ø26×152 мм); в – профилированная заготовка; г – заготовка после разделения; д – укладка заготовки в штамп; е – отштампованная поковка с облоем на штампе



Рис. 9. Сравнение поковок с облоем, отштампованных с профилированием заготовки продольным изгибом (слева) и по базовому варианту (справа)

Сравнение объемов и масс заготовок показало, что предлагаемая технология позволяет достичь экономии металла до 21,7 %.

## 7. Выводы

1. Выполнено развитие способов безручьевого профилирования, а именно продольного изгиба заготовок, применительно к технологиям штамповки на винтовых фрикционных прессах. Показана возможность использования продольного изгиба в качестве экономичного способа профилирования заготовок, обеспечивающего замену пережимных и подкатных ручьев перед штамповкой поковок рым-болтов, при

этом разработана технология спаренной штамповки данных поковок.

2. На основе теории планирования эксперимента получены уравнения регрессии для расчета критериев формоизменения заготовок круглого поперечного сечения при продольном изгибе, применимые для выполнения имитационного моделирования, проектирования переходов штамповки поковок типовой конфигурации и других многовариантных задач. Уравнения линейной регрессии с учетом взаимодействия факторов представляют собой зависимости геометрических характеристик искажения торцевых участков при продольном изгибе заготовок от отношения их исходной высоты к диаметру и условной степени осадки.

Анализ данных регрессионных моделей показывает, что фактор условной степени осадки является на 20...60 % более существенным, чем фактор относительной высоты заготовки с точки зрения влияния на искажение торца (отрыва его части и подъема над осадочной плитой – параметр  $(a/D_0)$ ). Этот факт особенно важно брать во внимание при проектировочных расчетах, когда профилированную заготовку необходимо размещать в штамповочном ручье. На протяженность контакта опорной части торца заготовки с осадочной плитой  $(b/D_0)$  оказывает влияние главным образом относительная высота заготовки, поэтому, при необходимости соблюдения требований параллельности торцов профилированной заготовки, её отношение высоты к диаметру следует выбирать как можно меньшим. Влияние двух входных переменных ( $m_0$  и  $\epsilon_y$ ) на протяженность поднятой части торца заготовки, не контактирующей с осадочной плитой  $(c/D_0)$ , является неоднозначным и зависит от относительной высоты заготовки. При  $m_0=4,0...5,0$  данная входная переменная оказывает на 19 % большее влияние на протяженность поднятой части торца заготовки, чем условная степень осадки. При  $m_0=5,0...6,0$  условная степень осадки является на 54 % более существенным фактором, чем относительная высота заготовки. При проектировании технологических решений следует учитывать, что части торцов заготовки, не контактирующие с осадочными плитами, не являются плоскими.

3. Для предложенного технологического варианта изготовления поковок рым-болтов разработана компоновка штампа. Установлено, что профилированный полуфабрикат приобретет требуемую форму при степени осадки цилиндрической заготовки до  $\epsilon_y=39\%$ , при этом центральный угол между сдвоенными поковками составит  $54^\circ$ , что учтено в конструкции штампа.

4. Произведена опытная штамповка поковок рым-болтов по базовой и новой технологиям на свинцовых физических моделях заготовок. При этом установлено, что предложенное технологическое решение обеспечивает экономию металла на уровне 21,7 %.

5. Сравнение результатов штамповки поковки «рым-болт» по двум вариантам выявило повышение технико-экономических показателей новой технологии, а именно: коэффициента расхода металла при порезке – на 1,4 %, коэффициента выхода годных поковок – на 21,1 %, коэффициента использования металла поковки по норме расхода – на 27,9 %.



## Литература

1. Грузоподъемность рым-болтов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://coroma.ru/stati/gruzopodemnost-rym-boltov.htm>
2. Eye Bolt. Forged Eye Bolt Warning and Application Instruction [Electronic resource]. – ASC Industries, Ltd. – Available at: <http://www.ascindustries.com/portals/0/pdf/EyeBolts.PDF>
3. Ferro, A. C. Fracture of a galvanized steel U-bolt stirrup of an overhead electric transport line [Text] / A. C. Ferro, L. Calado // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 1 – P. 249–256. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.034
4. Stokes, J. B. Agricultural engineering in development: intermediate blacksmithing: a training manual [Text] / J. B. Stokes. – Rome: Food & Agriculture Org., 1992. – Vol. 88/2. – P. 61.
5. Magalhaes, F. de C. Suscetibilidade a Fadiga Termica de Matrizes Fechadas Para Forjamento a Quente [Text] / F. de C. Magalhaes, R. B. Figueiredo, M. T. P. Aguilar, A. E. de M. Pertence, H. B. Campos, P. R. Cetlin // Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineracao. – 2014. – Vol. 11, Issue 2. – P. 131–137. doi: 10.4322/tmm.2014.020
6. Шевчук, С. А. Штамповка деталей арматуры в мелкосерийном производстве [Текст] / С. А. Шевчук, О. А. Шевчук, А. Э. Артеc, В. В. Третьюхин // Арматуростроение. – 2006. – № 4(43). – С. 72–74.
7. Анищенко, А. С. Исследование горячей деформации стальных и титановых заготовок с применением теплоизолирующих прокладок [Текст] / А. С. Анищенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: технічні науки. – 2013. – Вип. 27. – С. 56–64.
8. Skubisz, P. Design of Controlled Processing Conditions for Drop Forgings Made of Microalloy Steel Grades for Mining Industry [Text] / P. Skubisz, A. Zak, M. Burdek, L. Lisiecki, P. Micek // Archives of Metallurgy and Materials. – 2015. – Vol. 60, Issue 1. – P. 445–453. doi: 10.1515/amm-2015-0073
9. Todic, V. Design and Economic Justification of Group Blanks Application [Text] / V. Todic, J. Tepic, M. Kostelac, D. Lukic, M. Milosevic // Metalurgija. – 2012. – Vol. 51, Issue 2. – P. 269–272.
10. Patel, C. Dual Electromagnetic Forming Using Single Uniform Pressure Coil [Text] / C. Patel, S. D. Kore // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 611-612. – P. 723–730. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.611-612.723
11. Скрипачев, А. В. Спаренная штамповка наружных панелей дверей легковых автомобилей [Текст] / А. В. Скрипачев, Д. Б. Костюхин // Кузнечно-штамповочное производство: Обработка материалов давлением. – 2004. – № 5. – С. 29–32.
12. Nye, T. J. Stamping strip layout for optimal raw material utilization [Text] / T. J. Nye // Journal of Manufacturing Systems (J MANUF SYST). – 2000. – Vol. 19, Issue 4. – P. 239–248. doi: 10.1016/s0278-6125(01)80003-0
13. Костин, Д. А. Обеспечение эффективности производства металлопродукции [Текст] / Д. А. Костин, А. Ю. Спиридонова // Молодой ученый. – 2015. – № 21 (101). – С. 4–7.
14. Yanhui, Y. Optimization of preform shapes by RSM and FEM to improve deformation homogeneity in aerospace forgings [Text] / Y. Yanhui, L. Dong, H. Ziyan, L. Zijian // Chinese Journal of Aeronautics. – 2010. – Vol. 23, Issue 2. – P. 260–267. doi: 10.1016/s1000-9361(09)60214-4
15. Tang Y.-C. Preform tool shape optimization and redesign based on neural network response surface methodology [Text] / Y.-C. Tang, X.-H. Zhou, J. Chen // Finite Elements in Analysis and Design. – 2008. – Vol. 44, Issue 8. – P. 462–471. doi: 10.1016/j.finel.2008.01.007
16. Милевская, Т. В. Исследование процесса горячей объемной штамповки медицинского инструмента в программном комплексе QForm на примере технологии точной горячей объемной штамповки левой полустворки зубных щипцов ШЦ–13. Общие рекомендации по выбору оборудования [Текст] / Т. В. Милевская // Наука и образование. – 2011. – Эл. № ФС 77–30596. – 9 с. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/218118.html>
17. Лопатин, М. А. Сравнительный анализ технологии штамповки поковок с изогнутой осью моделирования в программе QFORM 3D [Текст] / М. А. Лопатин // Наука и образование. – 2007. – Эл. № ФС 77–48211. – 22 с. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/64925.html>
18. Кухарь, В. В. Направления реализации бесштампового профилирования заготовок на прессах [Текст] / В. В. Кухарь // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 173–179.
19. Kukhar, V. V. Die-Forging of Copper Forgings with Preliminary Forming of Work-Piece Barrel Profile [Text] / V. V. Kukhar, V. A. Burko, O. V. Vasylevskyi, R. S. Nikolenko // HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR). – 2015. – Vol. 14. – Available at: [http://ijtir.hctl.org/vol14/IJTIR\\_Article\\_201504002.pdf](http://ijtir.hctl.org/vol14/IJTIR_Article_201504002.pdf)
20. Kukhar, V. V. Producing of elongated forgings with sharpened end by rupture with local heating of the workpiece method [Text] / V. V. Kukhar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 6. – P. 122–132. – Available at: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/MMI-6/016-Kukhar.pdf>
21. Shapoval A. N. Development of the unit for multi-stage vibration drawing of metal product / Shapoval A. N., Shapoval A. A. // Tsvetnye Metally. – 2002. – Vol. 4. – P. 77–82.
22. Orlov, G. A. Features of the cold-rolling of tubes on tandem mills with a four-high stand [Text] / G. A. Orlov // Metallurgist. – 2013. – Vol. 57, Issue 7-8. – P. 600–605. doi: 10.1007/s11015-013-9776-z
23. Dziubinska, A. Limiting Phenomena in New Forming Process for Two-Rib Plates [Text] / A. Dziubinska, A. Gontarz // Metalurgija. – 2015. – Vol. 54, Issue 3. – P. 555–558.

24. Pertence, A. E. M. Analysis of a new model material for the physical simulation of metal forming [Text] / A. E. M. Pertence, P. R. Cetlin // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 84, Issue 1-3. – P. 261–267. doi: 10.1016/s0924-0136(98)00228-3
25. Shlomchack, G. G. Rheologically similarity of metals and alloys [Text] / G. G. Shlomchack, I. Mamuzic, F. Vodopivec // Journal of Materials Processing Technology. – 1994. – Vol. 40, Issue 3-4. – P. 315–325. doi: 10.1016/0924-0136(94)90458-8
26. Кухарь, В. В. Формоизменение при профилировании продольным изгибом заготовок с различной формой поперечного сечения [Текст] / В. В. Кухарь // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. – 2010. – № 60. – С. 169–173. – Режим доступу: <http://visnyk-mmii.kpi.ua/images/stories/pdf/60/169-173.pdf>
27. Кухарь, В. В. Методика учета смятия торцевых участков заготовок при проектировании технологий на основе продольного изгиба [Текст]: сб. науч. тр. / В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 4 (33). – С. 91–94.

