

УДК 621.777.24  
DOI: 10.12737/17316

**А.М. Дмитриев**, чл.-кор. РАН,  
**Н.В. Коробова**, д.т.н.,  
**Н.С. Толмачев**, заведующий научно-исследовательской лабораторией  
(Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 3а)  
E-mail: mt-6@yandex.ru

## **Холодное выдавливание конических стаканов с цилиндрической полостью**

*Представлены методика и результаты исследования обратного выдавливания заготовки цилиндрическим пуансоном в конической расширяющейся матрице. Построена модель для определения удельной силы выдавливания. Описан разработанный технологический процесс и приведена конструкция штампа, специализированного на холодное выдавливание.*

**Ключевые слова:** деталь типа стаканов с фланцем; внешняя поверхность расширяющаяся коническая; внутренняя поверхность цилиндрическая; сталь малоуглеродистая; выдавливание холодное двухходовое в одной матрице; штамп для холодного выдавливания.

**A.M. Dmitriev**, m.-cor. RAS,  
**N.V. Korobova**, d.en.s.,  
**N.S. Tolmachev**, head of scientific research laboratory  
(Moscow State Technical University «STANKIN», 127055, Moscow, Vadkovskiy lane, 3a)

## **Cold extrusion of conical cups with cylindrical cavity**

*The method and results of the study of reverse extrusion of billet by cylindrical punch in a conical expanding matrix are described. The mathematical model, which we developed for the determination of specific extrusion force, is described too. The study by statistical method verified the adequacy of the model. This model made possible to assess the resistance of punches and showed the ability to produce deformation of a billet made of low carbon steel without heating. The developed process includes the operation of segmenting of the cylindrical workpieces from bar, heat treatment, lubrication and extrusion of the workpieces. The two-way cold extrusion of a billet is produced in a matrix alternatively by two punches. The design of the stamp is described. The stamp is specialized for reverse extrusion of a billet. In its construction the moving mechanism of action of the two alternately punches in one matrix is used.*

**Keywords:** parts of the type of cup with a flange; outer expanding conical surface; inner cylinder surface; low carbon steel; cold two-way extrusion in single matrix; stamp for cold extrusion.

В машиностроении применяются детали, для которых разработан процесс производства их поковок холодным выдавливанием [1]. Изготовленная штампованная поковка приведена на рис. 1. В МГТУ «СТАНКИН», на протяжении ряда лет проводятся научные исследования, позволяющие разрабатывать технологические процессы холодной объемной штамповки стальных заготовок выдавливанием [2 – 6].

В частности, установлено, что поковки рассматриваемого типа целесообразно штамповать с применением последовательности формоизменяющих операций, показанной на рис. 2.



**Рис. 1. Поковка, изготовленная холодным выдавливанием**  
(материал – сталь 20 (ГОСТ 1050-74))

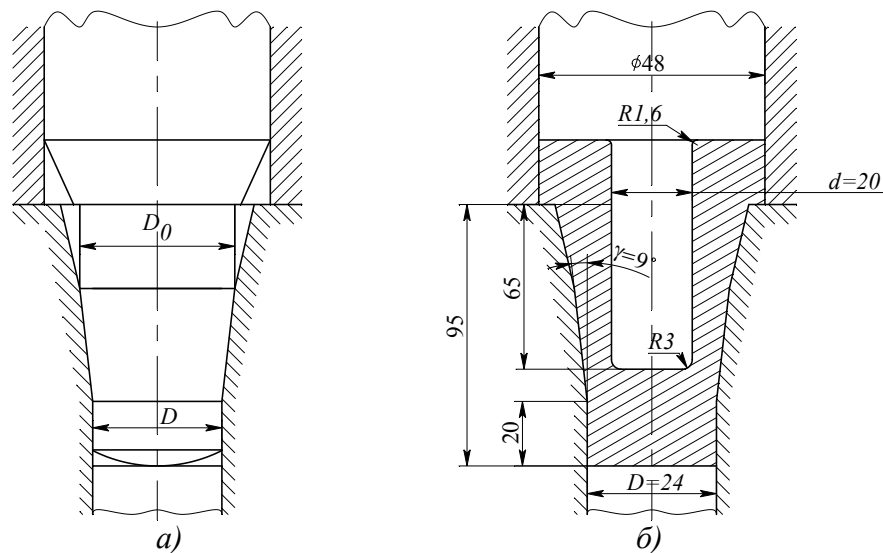


Рис. 2. Переходы штамповки поковки конического стакана с цилиндрической полостью

На первом переходе (рис. 2, а) проводят прямое выдавливание в конической матрице цилиндрической прутковой заготовки с уменьшением ее диаметра от  $D_0$  до  $D$ . На втором переходе из показанного на рис. 2, а полуфабриката в той же матрице проводят обратное выдавливание стакана, которое завершается его закрытой объемной штамповкой. В результате (рис. 2, б) окончательно заполняется полость матрицы, высаживается фланец и оформляется верхний торец поковки.

Операция обратного выдавливания заготовки цилиндрическим пуансоном в конической расширяющейся матрице не нашла достаточного отражения в литературе. По результатам ранее проведенных исследований максимальная величина удельной силы, действующей на пуансон при выдавливании на этой операции существенно меньше, чем удельная сила при выдавливании стакана с цилиндрическими поверхностями, имеющими диаметры  $D$  и  $d$  [7].

Однако поскольку на заключительной стадии этого выдавливания осуществляется штамповка фланца (см. рис. 2, б), заключительная стадия штамповки характеризуется наибольшей величиной деформирующей заготовку силы.

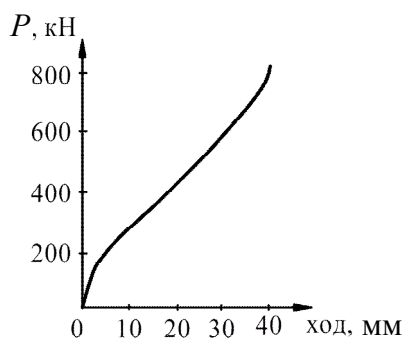


Рис. 3. График изменения силы по ходу внедрения пуансона в заготовку

Возрастающее в результате штамповки фланца гидростатическое давление в заготовке приводит к повышению силы, действующей на нижний торец пуансона (рис. 3). В качестве удельной силы  $q$  оценивают силу, действующую на нижний торец, деленную на площадь торца пуансона. Возможность реализации операции холодного выдавливания ограничивается усталостной прочностью пуансонов, которая связана с удельной силой, действующей на торец пуансона кривой, приведенной на рис. 4 [8].

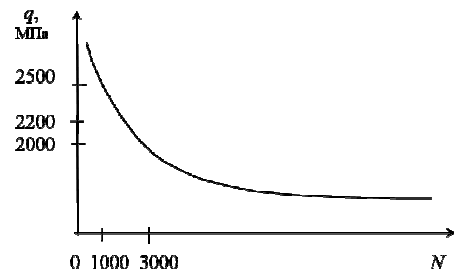


Рис. 4. Кривая усталостной прочности пуансонов из стали P6M5:  $q$  – удельная сила;  $N$  – число циклов штамповки до разрушения пуансона

В целях построения [9] математической модели, описывающей зависимость относительной (по отношению к напряжению текучести штампуемого материала) удельной силы выдавливания от относительного радиуса  $R=D/d$ , а также угла конусности матрицы  $\gamma$ , проведен следующий эксперимент. При постановке эксперимента факторы  $R$  и  $\gamma$  варьировали на трех уровнях каждый. Уровни варьирования факторов приведены в таблице. Был использован план главных эффектов, включающий в себя 9 опытов.

Заданная математическая модель имеет следующий вид:

$$q/\sigma_s = b_0 + b_1 R + b_2 \gamma + b_{11} R^2 + b_{22} \gamma^2. \quad (1)$$

**План эксперимента в натуральном и кодированном масштабах и величины экспериментального и расчетного значений относительной удельной силы выдавливания**

№ опыта	R	γ, °	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	q/σ <sub>s</sub>	
								Экспериментальное	Расчетное
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,2	7	1	-1	-1	1	1	3,6	3,8
2	1,6	7	1	0	-1	-2	1	3,3	3,27
3	2,0	7	1	1	-1	1	1	2,9	2,93
4	1,2	8	1	-1	0	1	-2	3,6	3,63
5	1,6	8	1	0	0	-2	-2	3,1	3,1
6	2,0	8	1	1	0	1	-2	2,9	2,77
7	1,2	9	1	-1	1	1	1	3,6	2,57
8	1,6	9	1	0	1	-2	1	3,0	3,03
9	2,0	9	1	1	1	1	1	2,7	2,7

Матрица плана эксперимента в натуральном масштабе приведена во 2-м и 3-м столбцах таблицы. Выдавливание проводили в штампе со сменными матрицами и пуансонами, установленном на универсальной испытательной машине INSTRON (600 кН), с осуществлением компьютерной записи изменения силы по ходу деформирования заготовки.

Удельную силу, действующую на торец пуансона, определяли компьютерным моделированием [4]. Также использовали подкладные рельефные датчики (такowymi являлись старые бронзовые монеты СССР).

Предварительно с помощью инструментального микроскопа на монете измеряли ширину букв какой-либо из надписей. Затем проводили тарировку датчиков. Для этого монеты осаживали между закаленными плитами с плоскими торцами. Осадку проводили до достижения величин сил, равных 50, 100, 150 кН и т.д. У каждой монеты, осаживаемой при заданной, одной из указанных, силе на инструментальном микроскопе вновь измеряли ширину букв той же надписи, для которой она была измерена до осадки монеты.

По результатам замеров был построен тарировочный график зависимости изменения ширины букв от величины удельной деформирующей силы. При этом удельную силу определяли как частное от деления полной силы осадки на площадь монеты в целом.

В дальнейшем по центру торца, выдавливающего полость пуансона, устанавливали такую же монету. После окончания выдавливания на стороне монеты, обращенной к торцу пуансона, на инструментальном микроскопе измеряли ширину букв той же надписи, что и при тарировке. Нанеся изменение, по сравнению с исходной монетой, этой измеренной ширины букв на соответствующую ось построенного ранее тарировочного графика, по проек-

ции соответствующей точки графика на другую его ось определяли величину действовавшей при выдавливании удельной силы.

Выдавливали заготовки с диаметрами  $D_0 = 30$  мм и  $D = 24$  мм и углами конусности  $\gamma$ , соответствующими матрице плана (см. таблицу). Заготовки из стали 20 были отожжены по режиму, указанному в статье далее. После отжига заготовки были протравлены в кислоте с целью удаления окалина, после чего осуществлялось их фосфатирование и омыливание. Напряжение текучести материала заготовок  $\sigma_s$  для определения удельных сил выдавливания установлены по диаграмме истинных напряжений, построенной по результатам испытания образцов на сжатие.

Результаты проведенных опытов приведены в 9-м столбце таблицы.

Для оценки воспроизводимости эксперимента 5-й опыт был продублирован четыре раза. Получены следующие результаты: 3,05; 3,1; 3,1; 3,15. Дисперсия опыта рассчитана по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{g=1}^n (y_g - \bar{y})^2}{f_1},$$

где  $y_g$  – результат  $g$ -ого повтора опыта;  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение зависимой переменной при  $n$  повторах опыта; число степеней свободы  $f_1 = n - 1$ . Получено  $S_y^2 = 0,0017$  (при числе степеней свободы  $f_1 = 3$ ).

Для обработки результатов эксперимента был совершен переход к кодированному масштабу, в котором матрица плана симметрична и ортогональна. В кодированном масштабе модель (1) имеет следующий вид:

$$\frac{q}{\sigma_s} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} z_1 + b_{22} z_2, \quad (2)$$

где  $x_1$  – линейная функция от  $R$ ;  $x_2$  – линейная функция от  $\gamma$ ;  $z_1$  – квадратичная функция от  $R$ ;

$z_2$  – квадратичная функция от  $\gamma$ .

Формулы, связывающие  $R$  и  $\gamma$  с  $x_1, x_2, z_1$  и  $z_2$ , следующие:

$$x_1 = \frac{5(R-1,6)}{2}; \quad x_2 = \gamma - 8; \quad z_1 = 3\left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right); \quad (3)$$

$$z_2 = 3\left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right).$$

План эксперимента в кодированном масштабе представлен в столбцах таблицы с 4-го по 8-й.

Коэффициенты модели (2) рассчитаны по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad i = 0, 1, 2 \dots k, \quad (4)$$

где  $i$  – номер фактора;  $u$  – номер опыта;  $N$  – число опытов плана.

Дисперсии оценок коэффициентов определены по формуле

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{N \sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (5)$$

где  $i$  – индекс коэффициента;  $u$  – номер опыта в матрице плана.

Получены следующие оценки коэффициентов:

$$b_0 = 3,2; \quad b_1 = -0,433; \quad b_2 = -0,117; \quad b_{11} = 0,033; \quad b_{22} = 0,017.$$

Их дисперсии:

$$S_{b_0}^2 = 0,00019; \quad S_{b_1}^2 = S_{b_2}^2 = 0,00028;$$

$$S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = 0,000094,$$

$$\text{откуда } S_{b_0} = 0,0138; \quad S_{b_1} = S_{b_2} = 0,0167;$$

$$S_{b_{11}} = S_{b_{22}} = 0,0097.$$

Доверительные интервалы оценок коэффициентов определены по формуле

$$\Delta_{bi} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{bi}, \quad (6)$$

где  $t_{\alpha; f_1}$  – табличное значение критерия Стьюдента, взятое в зависимости от уровня значимости и числа степеней свободы при определении дисперсии опыта.

В нашем случае  $t_{0,05; 3} = 3,182$ , поэтому:

$$\Delta_{b_0} = 0,044; \quad \Delta_{b_1} = \Delta_{b_2} = 0,053; \quad \Delta_{b_{11}} = \Delta_{b_{22}} = 0,0031.$$

Поскольку все коэффициенты по абсолютной величине больше своих доверительных интервалов, они признаны статистически значимыми и оставлены в модели (2).

Таким образом, получено следующее

уравнение:

$$\frac{q}{\sigma_s} = 3,2 - 0,433x_1 - 0,117x_2 + 0,033z_1 + 0,017z_2. \quad (7)$$

Рассчитанные по этой модели величины  $q/\sigma_s$  для значений факторов, соответствующих каждому из 9 опытов, приведены в 10-м столбце таблицы.

Дисперсия неадекватности для модели (7) оценена по формуле

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{SS_{\text{неад}}}{f_2} \quad (8)$$

в которой

$$SS_{\text{неад}} = n_5 (y_{5\text{расч}} - y_{5\text{эксп}})^2 + \sum_{u=1}^4 (y_{u\text{расч}} - y_{u\text{эксп}})^2 + \sum_{u=6}^9 (y_{u\text{расч}} - y_{u\text{эксп}})^2,$$

где  $u$  – номер опыта;  $n_5$  – количество повторов 5-го опыта;  $y_{u\text{расч}}$  – значения, приведенные в 10-м столбце таблицы;  $y_{u\text{эксп}}$  – значения, приведенные в 9-м столбце таблицы;  $f = N - k$ , где  $N$  – количество строк в матрице плана;  $k$  – количество признанных значимыми коэффициентов модели (7).

Таким способом определено, что  $S_{\text{неад}}^2 = 0,00135$ .

Расчетное значение статистического критерия Фишера, применяемого при оценке адекватности моделей, определено по формуле

$$F_{f_2; f_1} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2}, \quad (9)$$

оно равно  $F_{\text{расч}} = 0,79$ .

Табличное значение  $F$ -критерия для принятого 5 %-ного уровня значимости и чисел степеней свободы  $f_1 = 3$  и  $f_2 = 4$  равно 9,12. Поскольку расчетное значение  $F$ -критерия не превышает табличного, гипотеза об адекватности модели не отвергается.

Переход к натуральным значениям факторов осуществлен подстановкой формул (3) в модель (7), раскрытием скобок и приведением подобных членов. При натуральных значениях факторов модель (7) приняла следующий вид:

$$\frac{q}{\sigma_s} = 10,63 + 0,625R^2 + 0,051\gamma^2 - 3,08R - 0,933\gamma. \quad (10)$$

С использованием построенной математической модели определена удельная сила выдавливания штампованной поковки, показанной на рис. 1.

Относительная удельная сила  $q/\sigma_s$  составила 3,57. Напряжение текучести материала заготовки было определено по диаграмме истинных напряжений для стали 20 при степени обжатия, рассчитанной по формуле

$$\frac{[F_{\text{заг}} - (F_{\text{заг}} - F_{\text{пол}})]}{F_{\text{заг}}} = \frac{d^2}{D_0^2}, \quad (11)$$

где  $F_{\text{заг}}$  – площадь поперечного сечения заготовки;  $F_{\text{пол}}$  – площадь поперечного сечения выдавленной полости стакана;  $D_0$  – диаметр заготовки;  $d$  – внутренний диаметр стакана. Рассчитанное значение составило 0,694.

Величина напряжения текучести для отожженной стали 20 при этой степени обжатия равна 700 МПа. Следовательно,  $q$  равно 2500 МПа. При такой величине удельной силы стойкость пуансонов из стали Р6М5 (ГОСТ 19205-73) оценена по кривой, приведенной на рис. 4.

В данном случае  $N > 1000$ . При такой прогнозируемой стойкости пуансонов для производства рассматриваемых поковок признана целесообразной реализация процесса холодного обратного выдавливания.

Разработанный технологический процесс состоит из следующих этапов.

1. Изготовление отрезкой от прутка на отрезных токарных станках исходных цилиндрических заготовок.

2. Термообработка заготовок. Производится отжиг по режиму: нагрев до 680...700 °С, выдержка 3 ч, охлаждение с печью.

3. Травление заготовок, их фосфатирование и омыливание. Для травления применяется 30 %-ный раствор соляной кислоты. После травления заготовки промывают в холодной и горячей воде. Для фосфатирования применяется раствор, состоящий из монофосфата цинка в концентрации 70 г/л и нитрита натрия – 35 г/л. Температура раствора 70...80 °С, время травления 10...15 мин. Фосфатированные заготовки после промывки омыливают. Концентрация мыльного раствора 50...70 г/л 72 %-ного хозяйственного мыла, температура около 80 °С, время омыливания 10...15 мин.

4. Выдавливание. Осуществляется за 2 перехода (см. рис. 2).

Технология реализована с применением штампа, схема которого приведена на рис. 5.

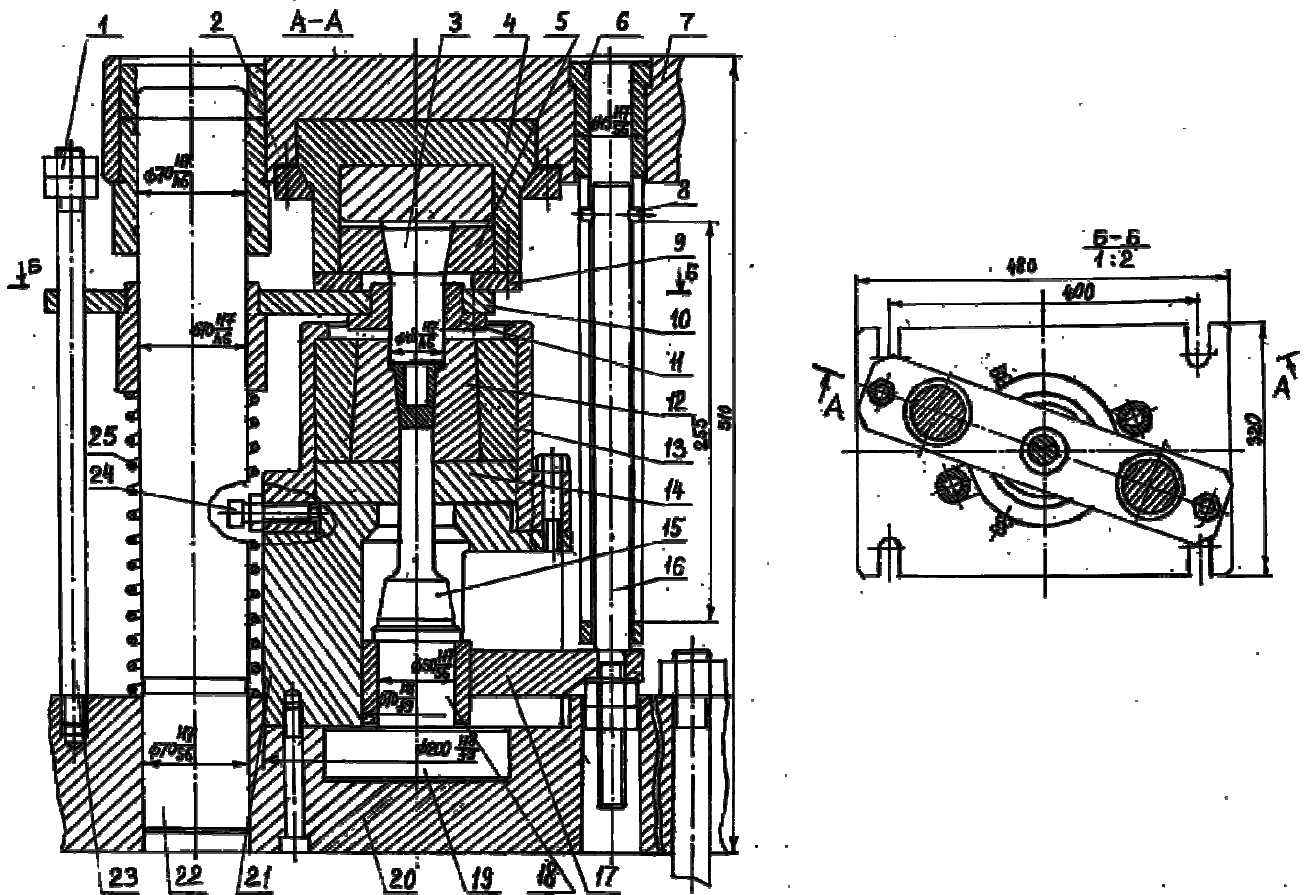


Рис. 5. Схема штампа для выдавливания

В штампе верхняя плита 7 с направляющими втулками 2 направляется по двум колонкам 22, запрессованным в нижнюю плиту 20. На нижней плите установлена опора 21, на которую через закаленную прокладку 14 опирается бандажированная матрица 12. Матрица размещена в матрицедержателе 13, который с помощью установочных винтов 24 может смещаться в радиальном направлении. Это предусмотрено для регулировки соосности матрицы и пуансона 3.

В пуансонодержателе 4 с помощью прижимной плиты 5 и прижимных планок 9 установлены два пуансона: первого и второго переходов штамповки. Пуансонодержатель закреплён на верхней плите штампа с помощью направляющих планок и имеет возможность перемещения.

Внутри опоры 21 расположено коромысло 17, на котором установлен выталкиватель 15. Последний через закаленные прокладки 18 и 19 опирается на нижнюю плиту. Выталкивание штампованной поковки из матрицы осуществляется следующим образом. При ходе ползуна прессы вверх втулка 6 через штифты 8 передает силу тягам 16. Тяги поднимают коромысло с

установленным на нем выталкивателем. Последний выталкивает поковку из матрицы. Величина хода выталкивателя регулируется гайками на тягах.

Для съема детали с пуансона предусмотрен съемник 10 со сменной направляющей втулкой 11. Съём детали осуществляется при упоре съемника в гайки 1, ограничивающие перемещение съемника вверх. Гайки 1 навинчены на шпильки 23, ввернутые в нижнюю плиту 20 штампа. Чтобы обеспечить упор поковки во втулку 11 при ходе пуансона вверх, на цилиндрической направляющей части пуансона выполнены две продольные канавки (на рис. 5 не показаны). Напротив них на внутренней поверхности втулки 11 предусмотрены выступы. Поскольку поковка имеет цилиндрический фланец без канавок, то выступы втулки упираются во фланец поковки и снимают последнюю с пуансона.

Конструкция механизма перемещения и фиксации пуансонодержателя показана на рис. 6.

После выполнения штамповки пуансоном первого перехода оператор сжимает рычаги 3 и 4, перемещая, таким образом, тягу 5. Тяга раз-

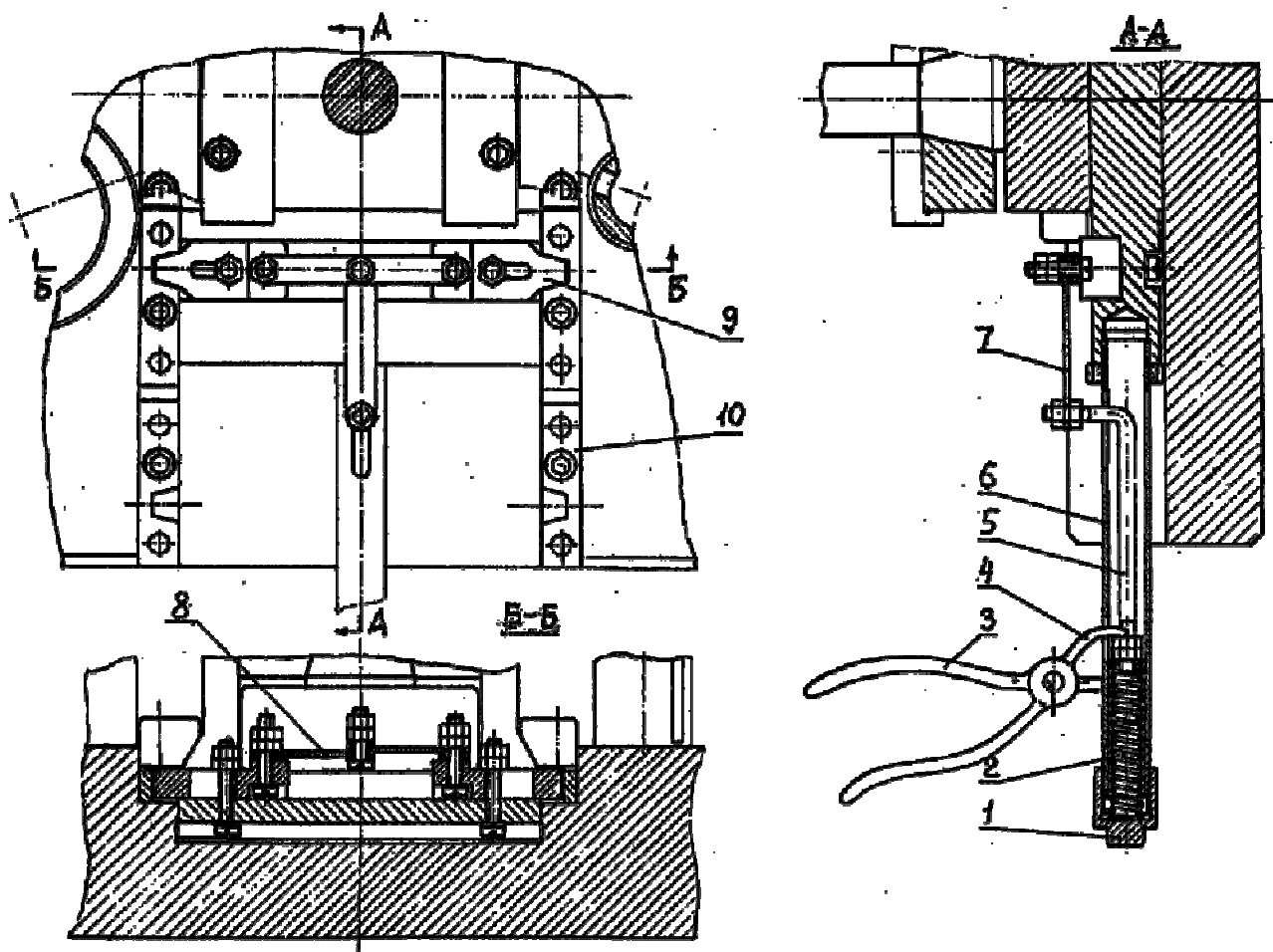


Рис. 6. Конструкция механизма перемещения и фиксации пуансонодержателя

мешена внутри трубы *б* и подпружинена в направлении сжатия пружины регулируется гайкой *1*. Тяга передает силу руки оператора на систему тянущих планок *7* и *8*. Тянущие планки выводят ползушки *9* из гнезд в неподвижно закрепленных фиксаторах *10*. Положение фиксаторов выверяется при сборке штампа.

При сжатых рычагах *3* и *4* пуансонодержатель получает возможность свободно перемещаться вдоль оси паза в верхней плите штампа. Оператор устанавливает пуансон второго перехода в рабочую позицию и отпускает рычаги *3* и *4*. При этом под действием пружины *2* под действием тяг ползушки *9* вводятся в гнезда на другой паре фиксаторов *10*. Включается пресс, и выполняется второй переход штамповки.

При отладке штампа практически не требуется доводочных операций. Штмп надежен и удобен в работе.

Таким образом, в результате проведенного исследования показана целесообразность производства рассматриваемых стальных поковок холодным обратным выдавливанием цилиндрическим пуансоном в матрице с расширяющейся полостью.

При небольших сериях производства таких деталей целесообразно использовать конструкцию описанного штампа, чтобы не скапливать контейнеры с полуфабрикатами, прошедшими первую и ожидающими вторую операцию выдавливания и не допускать упрочнения заготовок в межоперационный интервал.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дмитриев А.М., Демин В.А.** Современные конкурентоспособные технологии, оборудование и оснастка при производстве заготовок давлением // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 5. С. 34-38.
2. **Григорьев С.Н., Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Механические характеристики конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке и их описание аппроксимирующими зависимостями // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 12. С. 23-26.
3. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Расширение области применения холодной объемной штамповки созданием активных сил контактного трения // Трение и износ. 2013. № 3. С. 306–314.
4. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 2 (29). С. 44-49.
5. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник

МГТУ «Станкин». 2014. № 4 (31). С. 41-44.

6. **Аксененко А.Ю., Коробова Н.В., Дмитриев А.М.** Анализ различных методов разработки процесса изготовления корпусных деталей комбинированным выдавливанием // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 6. С. 967-974.

7. **Ковка и штамповка:** Справочник. В 4-х т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ.ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение. 2010. 352 с.

8. **Научно-технические технологии в машиностроении /** А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.

9. **Кузнечно-штамповочное** оборудование. Ч. 2. Выбор технологических параметров для специализированного оборудования: учеб. для вузов / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова. Самара: Изд-во СГАУ, 2015. 168 с.

## REFERENCES

1. Dmitriev A.M., Demin V.A. Modern competitive technologies, equipment and fitment at production workpieces by plastic working. Handbook. An engineering journal. 2011. No 5. Pp. 34–38.
2. Grigor'ev S.N., Dmitriev A.M., Korobova N.V. Mechanical characteristics of construction carbon steels at cold die forging and their description by approximate dependences. Handbook. An engineering journal. 2011. No 12. Pp. 23-26.
3. Dmitriev A.M., Korobova N.V. Expansion of application field of cold die forging by creation of active forces of contact friction. Friction and wear. 2013. No 3. Pp. 306–314.
4. Dmitriev A.M., Korobova N.V., Tolmachev N.S. Experimental verification of results of computer simulation of stresses on element of deforming tool. Vestnik of MSTU "Stankin". 2014. No 2(29). Pp. 44–49.
5. Practical application of changing mechanical properties of construction steels at cold die forging. A.M. Dmitriev, F.V. Grechnikov, N.V. Korobova, N.S. Tolmachev. Vestnik of MSTU "Stankin". 2014. No. 4(31). Pp. 41–44.
6. Akseenenko A.Yu., Korobova N.V., Dmitriev A.M. Analysis of various methods of development of production of box-like parts by combined extrusion. Computer research and simulation. 2014. V. 26. No 6. Pp. 967–974.
7. Forging and die forging: handbook. In 4 v. V. 3. Cold die forging. Forging of metallic powders. ed. by A.M. Dmitriev; general editorship by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie. 2010. 352 p.
8. Science intensive technologies in mechanical engineering. A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezyazhichnyy et al.; ed. by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 528 p.
9. Press-forging equipment. P.2. Selection of technological parameters for specialized equipment: textbook. A.M. Dmitriev, F.V. Grechnikov, N.V. Korobova. Samara: SSTU publishers, 2015. 168 p.

*Рецензент д.т.н. В.А. Демин*