

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-28-36>
УДК 531.781.2Оригинальная статья**И. В. Качанов, В. В. Власов****Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь***СИЛОВОЙ РЕЖИМ СКОРОСТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ
ОСЕССИММЕТРИЧНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Аннотация. Приводится математическая модель, разработанная для расчета силового воздействия на пуансон при скоростном ударном выдавливании осесимметричного ступенчатого стержневого инструмента (пуансоны, толкатели, фрезы и т. д.). В основу модели положен двухэтапный переход, который реализуется по схемам «прямоугольник – квадрат», «квадрат – круг». При этом переход от квадрата к кругу осуществляется при условии равенства площадей поперечных сечений, что позволяет сохранить практически неизменным кинематически возможное поле линий скольжения, включая годографы скоростей и ускорений, при переходе от плоской к осесимметричной деформации. Первый переход в разработанной модели реализуется путем преобразования (адаптации) полученных ранее расчетных уравнений для формообразования прямоугольной заготовки в уравнения для анализа силового режима при выдавливании стержневого инструмента с квадратным сечением на всех ступенях. На втором переходе полученные уравнения для анализа силового режима работы пуансона при плоской деформации квадратной заготовки из условия равенства площадей адаптируются для анализа осесимметричной деформации на основе использования соотношений $D_i(d_i) = 1,128A_i(a_i)$, $A_i(a_i) = 0,886D_i(d_i)$, в которых $D_i(d_i)$ – искомые диаметры круглых сечений осесимметричной детали, которые определяются по известным значениям сторон $A_i(a_i)$ квадратных сечений детали, сформированной в условиях плоской деформации. Предложенная схема расчета силовых параметров процесса скоростного ударного выдавливания позволяет оперативно рассчитать силовой режим формирования для любого стержневого ступенчатого инструмента с осесимметричной (круглой) формой поперечных ступеней, используя для этого классический метод верхней оценки. С учетом корректных допущений указанный метод эффективно применяется только для анализа скоростной ударной деформации плоских ступенчатых стержневых изделий. Используя предложенную методику технологии, в производственных условиях можно оперативно пересчитать силовой режим формоизменения с плоской на осесимметричную деформацию и на этом основании подобрать оборудование (чеканочный либо кривошипно-шатунный прессы, штамповочный молот и т. д.), необходимое для реализации процесса изготовления инструмента.

Ключевые слова: скоростное выдавливание, стержневой биметаллический инструмент, метод верхней оценки, равенство площадей, баланс мощности внешних и внутренних сил

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Качанов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета; Власов Вячеслав Владимирович – старший преподаватель кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета. E-mail: vlasov881988@mail.ru

Вклад авторов: Качанов Игорь Владимирович – предложил идею пересчета уравнений силового режима формоизменения полученных для плоской на осесимметричной деформаций; Власов Вячеслав Владимирович – разработал конкретную схему силового режима, а также годографов скоростей и ускорений при переходе с плоской на осесимметричную деформацию, основанную на принципе равенства поперечных площадей квадратной и круглой заготовок.

Для цитирования: Качанов, И. В. Силовой режим скоростного выдавливания осесимметричных биметаллических стержневых изделий инструментального назначения / И. В. Качанов, В. В. Власов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 28–36. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-28-36>

Поступила в редакцию: 26.11.2024

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

Original article

Igor V. Kachanov, Viacheslav V. Vlasov*

Belarusian National Technical University,
65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus

POWER MODE OF HIGH-SPEED EXTRUSION OF AXISYMMETRIC BIMETALLIC ROD PRODUCTS FOR INSTRUMENTAL PURPOSES

Abstract. A mathematical model developed to calculate the force impact on a punch during high-speed impact extrusion of axisymmetric stepped rod tools (punches, pushers, cutters, etc.) is described in the article. The model is based on a two-stage transformation, which is implemented according to the scheme “rectangle – square”, “square – circle”. At the same time, the transformation from square to circle is implemented under the condition of equality of cross-sectional areas, which allows keeping practically unchanged the kinematically possible field of slip lines, including velocity and acceleration hodographs during the transformation from plane to axisymmetric deformation. The first transformation in the developed model is accomplished by transforming (adapting) the previously obtained calculation equations for forming a rectangular workpiece into equations for analyzing the force regime during extrusion of a rod tool with a square cross-section at all stages. During the second transformation the obtained equations for the analysis of the force mode of the punch operation at flat deformation of a square workpiece from the condition of equality of squares are adapted for the analysis of axisymmetric deformation on the basis of using the relations $D_i(d_i) = 1.128A_i(a_i)$, $A_i(a_i) = 0.886D_i(d_i)$, in which $D_i(d_i)$ – are the required diameters of circular sections of axisymmetric workpiece which are determined by the known values of sides $A_i(a_i)$ of square sections of the workpiece formed under conditions of flat deformation. The proposed scheme for calculating the power parameters of the high-speed impact extrusion process makes it possible to quickly calculate the power mode of formation for any rod step tool with an axisymmetric (round) shape of the transverse steps, using the classical upper estimation method. Taking into account the correct assumptions, this method is effectively used only for analyzing the high-speed impact deformation of flat stepped rod products. Using the proposed technology methodology, in production conditions, it is possible to quickly recalculate the force mode of shaping from flat to axisymmetric deformation and, on this basis, select the equipment (stamping or crank presses, stamping hammers, etc.) necessary for the implementation of the tool manufacturing process.

Keywords: high-speed extrusion, rod bimetallic tool, upper estimation method, equality of squares, power balance of external and internal forces

Conflict of interest: authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: Igor V. Kachanov – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department “Hydraulic and energy construction, water transport and hydraulics” at Belarusian National Technical University; Viacheslav V. Vlasov – Senior Lecturer of the Department “Hydraulic and energy construction, water transport and hydraulics” at Belarusian National Technical University. E-mail: vlasov881988@mail.ru

Contribution of the authors: Igor V. Kachanov – proposed the idea of recalculating the equations of the force mode of shape change obtained for plane to axisymmetric deformations; Viacheslav V. Vlasov – developed a specific diagram of the force mode, as well as hodographs of velocities and accelerations during the transition from flat to axisymmetric deformation, based on the principle of equality of the transverse areas of square and round workpieces.

For citation: Kachanov I. V., Vlasov V. V. Power mode of high-speed extrusion of axisymmetric bimetallic rod products for instrumental purposes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 28–36 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-28-36>

Received: 26.11.2024

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

Введение. Для реализации современных процессов металлообработки, разработки горнорудных месторождений, ремонта дорожного асфальтобетонного полотна широко используется осесимметричный инструмент стержневой формы (пуансоны, фрезы, прошивники и т. д.). В ряде работ (например, [1]) отмечается, что для изготовления такого инструмента целесообразно применять процессы скоростного ударного выдавливания. Однако реализация указанных процессов сталкивается с необходимостью прогнозирования реального силового режима формоизменения, что связано с вопросами технически обоснованного подбора штамповочного оборудования и обеспечения стойкости инструментальной оснастки, особенно в момент воздействия на нее пиковых нагрузок.

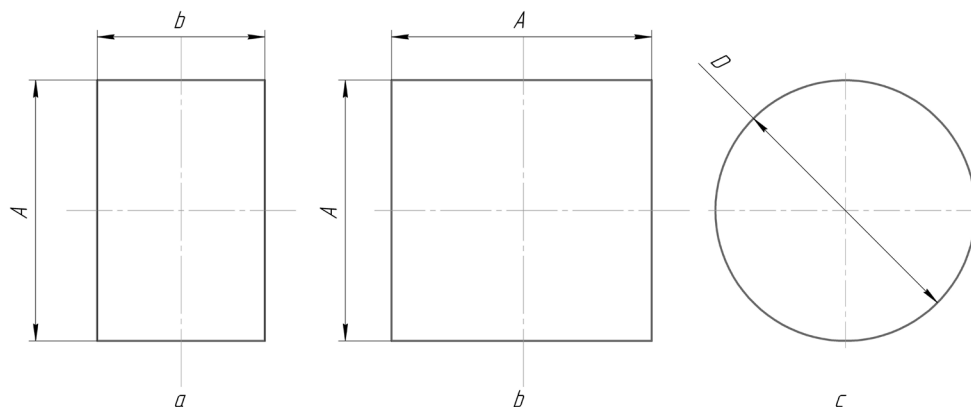


Рис. 1. Формы поперечных сечений прямоугольной (а), квадратной (b) и круглой (с) заготовок для двухэтапного перехода по схеме «прямоугольник – квадрат», «квадрат – круг», используемого для решения задачи скоростного ударного выдавливания осесимметричных изделий

Fig. 1. Shapes of cross sections of rectangular (a), square (b) and round (c) workpieces for two-stage transformation according to the “rectangle – square”, “square – circle” scheme used to solve the problem of high-speed impact extrusion of axisymmetric products

В [3–9] приводятся различные методики для расчета нагрузок, действующих на инструмент в условиях как плоской, так и осесимметричной деформации. Однако следует отметить, что в условиях ударной штамповки из-за неучета, например, инерционных нагрузок, существенно влияющих на силовой режим процесса формоизменения, эти методики имеют следующие недостатки: невысокую корректность и большую трудоемкость.

Как альтернатива вышеуказанным эмпирическим подходам в работе [10] приводится теоретическое решение задачи в условиях плоской деформации скоростного ударного выдавливания на основе применения метода верхней оценки, которое позволило получить уравнения для расчета силового режима при изготовлении многоступенчатого стержневого инструмента из исходной прямоугольной заготовки (рис. 1, а).

Следует отметить, что полученное в [10] решение имеет очевидный недостаток, связанный с невозможностью прогнозировать силовой режим при изготовлении деталей с осесимметричной (круглой формой) поперечного сечения, широко используемых в инструментальном производстве (фрезы, пуансоны, толкатели, прошивники и т. д.)

Для устранения указанного недостатка предлагается внести изменения в уравнение, полученное при решении задачи скоростного ударного выдавливания плоской прямоугольной заготовки. Суть изменений сводится к использованию в уравнениях для анализа силового режима [9] процесса ударного выдавливания квадратной заготовки (рис. 1, b) с площадью поперечного сечения $f_{\text{кв}}$ ($f_{\text{кв}} = A^2$, где A – сторона квадратной заготовки) вместо прямоугольной с площадью $f_{\text{пр}}$ ($f_{\text{пр}} = Ab$) (см. рис. 1, а).

В уравнения, приведенные в работе [9], нами предлагается дополнительно внести еще одно изменение, которое позволит их использовать для анализа скоростного выдавливания осесимметричных стержневых деталей круглого сечения. Суть этого изменения сводится к тому, чтобы площадь исходной квадратной заготовки $f_{\text{кв}} = A^2$ заменить на равновеликую площадь круга ($f_{\text{кр}} = \pi D^2/4$).

Из условия равенства указанных площадей ($A^2 = \pi D^2/4$) устанавливаются искомые соотношения между диаметрами круглых $D_i(d_i)$ и сторонами квадратных сечений $A_i(a_i)$ в виде выражения

$$D_i(d_i) = 1,128 A_i(a_i) \Rightarrow A_i(a_i) = 0,886 D_i(d_i). \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что по известным значениям размеров детали, например, с квадратными сечениями заготовки и ступеней $A_i(a_i)$ путем умножения на 1,128 можно установить требуемые диаметры $D_i(d_i)$ заготовки и круглых сечений осесимметричной стержневой детали. В свою очередь при решении обратной задачи из выражения (1) по известным значениям размеров осесимметричной детали $D_i(d_i)$ путем умножения их на множитель 0,886 можно определить при необходимости размеры $A_i(a_i)$ заготовки и ступеней квадратного сечения детали.

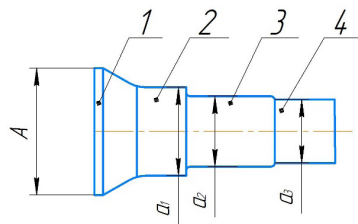


Рис. 2. Ступенчатая стержневая деталь с квадратным сечением прессостатка 1 и ступеней 2, 3, 4

Fig. 2. Stepped rod workpiece with square section of pressostat 1 and 2, 3, 4 stages

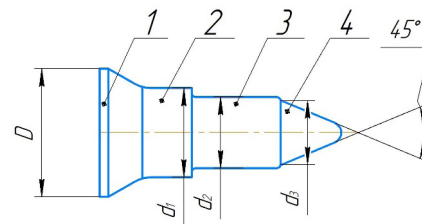


Рис. 3. Ступенчатая стержневая осесимметричная деталь с круглым сечением прессостатка 1 и ступеней 2, 3, 4

Fig. 3. Stepped rod axisymmetric workpiece with circular section of pressostat 1 and 2, 3, 4 stages

Исходя из изложенного нами предлагается методика, позволяющая преобразовать на первом переходе исходные уравнения для анализа силового режима выдавливания прямоугольной заготовки в уравнения для анализа формоизменения заготовки квадратного сечения с получением стержневой детали с квадратной формой сечений, площадь которой уменьшается от прессостатка 1 до концевой элемента 4 (рис. 2) стержневой детали.

Полученные расчетные уравнения на втором этапе, учитывая выражение (1), предлагается адаптировать для скоростного выдавливания многоступенчатой осесимметричной стержневой детали (рис. 3), у которой площади круглых сечений уменьшаются последовательно от максимального значения (прессостаток 1), включая промежуточные ступени 2, 3, до минимального (ступень 4).

Первый этап пересчета силового режима при переходе от прямоугольной заготовки к квадратной. Для анализа силового режима процесса скоростного ударного выдавливания прямоугольной плоскоступенчатой детали из исходной прямоугольной заготовки на основе метода верхней оценки нами в работе [10] использовалось кинематически возможное поле линий скольжения с построенными годографами скоростей и ускорений (рис. 4 и 5).

Исходя из условия баланса мощностей внешних и внутренних сил была получена силовая диаграмма «усилие на пуансоне – путь деформирования» ($P_n = f(h_n)$) (рис. 5, d). На основании экспериментальных данных [10] процесс был разделен на две стадии: разгона и торможения (участки Δh_p и $h_{n.T}$ соответственно на рис. 5, d).

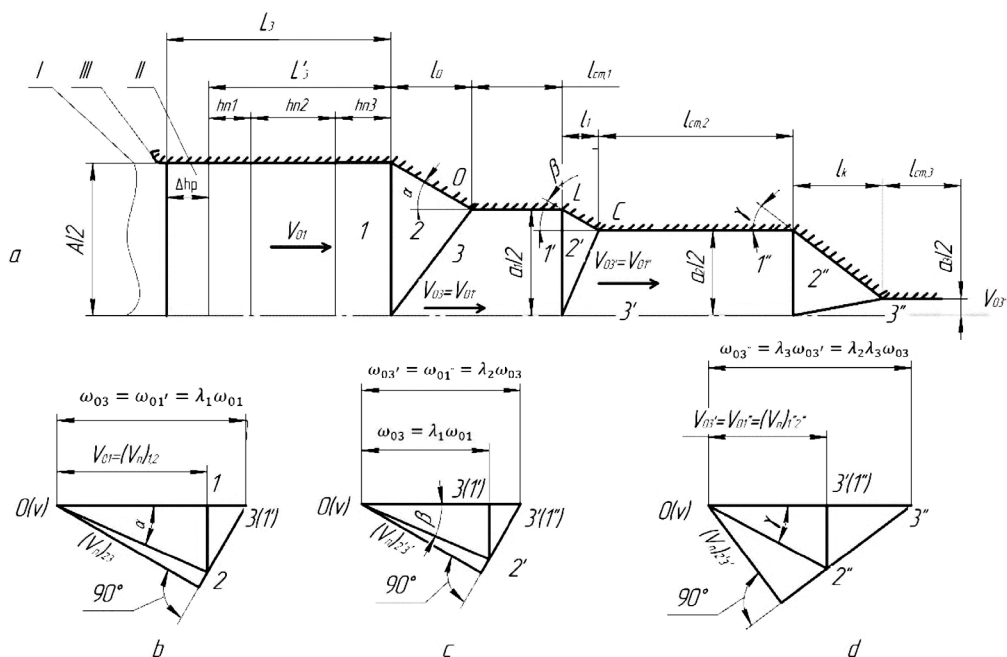


Рис. 4. Кинематически возможное поле линий скольжения (a) и соответствующие ему годографы скоростей (b, c, d) при скоростном ударном выдавливании ступенчатых плоских изделий (приведенных величин приведено в [10])

Fig. 4. The kinematically possible field of slip lines (a) and the corresponding velocity curves (b, c, d) for high-speed impact extrusion of stepped flat products (given values from [10])

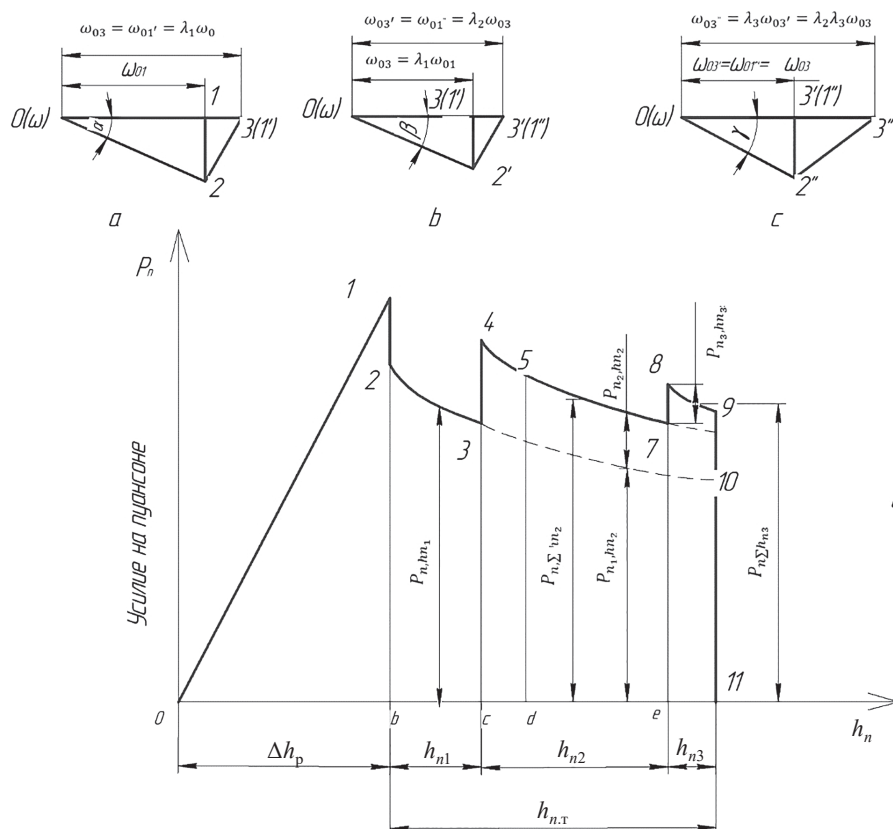


Рис. 5. Годографы ускорений (a, b, c) и силовая диаграмма $P_n = f(h_n)$, «усилие на пуансоне – путь деформирования» (d) при скоростном ударном выдавливании плоских ступенчатых изделий

Fig. 5. Hodographs of accelerations (a, b, c) and the force diagram $P_n = f(h_n)$, “force on the punch – path of deformation” (d) with high-speed impact extrusion of flat step products

Для завершающего этапа процесса, когда путь деформирования пуансона $h_{п}$ равняется h_{n3} (см. рис. 4, a), величина суммарного усилия $P_{n,\Sigma h_{n3}}$, действующего на пуансон, будет зависеть от сопротивления деформированию при пластическом течении материала заготовки через три очага деформации, сосредоточенных в блоках 2, 2', 2'' (см. рис. 4, a).

Уравнение для расчета минимального усилия деформирования $P_{n,\Sigma h_{n3}}$ на этом этапе процесса имеет следующий вид [10]:

$$\begin{aligned}
 P_{n,\Sigma h_{n3}} = & \frac{AbM \left\{ k \left[F_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{L'_3}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[F_{2\text{опт}} + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F'_{3\text{опт}} + \frac{L'_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right]} + \\
 & + \frac{AbM \left\{ k \left[F'_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[F'_{2\text{опт}} + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F'_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right]} + \\
 & + \frac{AbM \left\{ k \left[F''_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[F''_{2\text{опт}} + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F''_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right]}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Физический смысл всех величин, входящих в уравнение (2), приведен в [10]. При этом коэффициенты вытяжки $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в уравнении (2) определяются по зависимостям:

$$\lambda_1 = \frac{A_1}{a_1}; \lambda_2 = \frac{a_1}{a_2}; \lambda_3 = \frac{a_2}{a_3}. \quad (3)$$

Для адаптации уравнения (2) к условиям выдавливания квадратной заготовки предлагаем заменить в нем площадь прямоугольника (см. рис. 1, а) $f_{\text{пр}} (f_{\text{пр}} = Ab)$ на квадрат (см. рис. 1, б) $f_{\text{кв}} (f_{\text{кв}} = A^2)$. При деформации квадратной заготовки в многоочковой матрице с квадратными сечениями для каждой ступени коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ будут определяться следующими очевидным соотношениями:

$$\lambda_1 = \frac{A^2}{a_1^2}; \lambda_2 = \frac{a_1^2}{a_2^2}; \lambda_3 = \frac{a_2^2}{a_3^2}. \quad (4)$$

Для того чтобы получить квадратные сечения по всей длине ступенчатого изделия, необходимо подвергнуть деформации заготовку в условиях объемного приложения нагрузки. Математически это будет означать, что после замены площади прямоугольника $f_{\text{пр}} (f_{\text{пр}} = Ab)$ на площадь квадрата $f_{\text{кв}} (f_{\text{кв}} = A^2)$ указанную зависимость (2), выполнив умножение на 2, можно использовать для расчета суммарного усилия, действующего на пуансон $P_{n\Sigma h_{n3}}$, на пути деформирования h_{n3} . При этом уравнение для расчета усилия $P_{n\Sigma h_{n3}}$, действующего на пуансон при скоростном выдавливании инструментального изделия со ступенями квадратного сечения, примет вид:

$$\begin{aligned} P_{n\Sigma h_{n3}} = & \frac{2A^2M \left\{ k \left[F_1(\alpha, \mu, \lambda_1) + 4\mu \left(\frac{L'_3}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[F_2(\alpha) + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^3 \left[F_3(\alpha, \lambda_1) + \frac{L'_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right]} + \\ & + \frac{2A^2M \left\{ k \left[F'_1(\beta, \mu, \lambda_2) + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[F'_2(\beta) + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^3 \left[F'_3(\lambda_{2,\beta}) + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right]} + \\ & + \frac{2A^2M \left\{ k \left[F''_1(\gamma, \mu, \lambda_3) + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[F''_2(\gamma) + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^3 \left[F''_3(\gamma, \mu, \lambda_3) + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right]}. \quad (5) \end{aligned}$$

Новизной уравнения (5) по отношению к уравнению (2) следует считать его адаптацию для формоизменения квадратной заготовки и получение в итоге ступенчатой стержневой детали с квадратным сечением для каждой ступени, что обеспечивается за счет умножения трех слагаемых в числителях зависимости (5) на величину $2A^2$ вместо Ab , как это имеют место в зависимости (2). При этом все величины, входящие в зависимость (5), имеют тот же смысл, что и в зависимости (2).

Второй этап перехода от плоской к осесимметричной деформации. Чтобы получить зависимость для расчета усилия выдавливания осесимметричной заготовки в уравнение (5) предлагается внести изменение, которое сводится к замене площади квадратной заготовки $f_{\text{кв}} (f_{\text{кв}} = A^2)$ (см. рис 1, а) на равноценную площадь круга $f_{\text{кр}} (f_{\text{кр}} = \pi d^2/4)$ (см. рис. 1, б).

Исходя из условия равенства площадей $f_{\text{кв}} = f_{\text{кр}}$ с учетом выражения (1) соотношение длины сторон квадрата и диаметра равноценной площади круга характеризуется следующей зависимостью:

$$f_{\text{кв}} = f_{\text{кр}} \Rightarrow A^2 = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow A = 0,886D, \quad (6)$$

где A – длина стороны квадратной заготовки, используемой в условиях плоской деформации (рис. 6) для получения многоступенчатых стержневых деталей квадратного сечения; D – диаметр круглой заготовки (рис. 6), взаимосвязанной со стороной квадрата A зависимостью (1) и используемой для изготовления ступенчатых деталей круглого сечения в условиях осесимметричной деформации.

Принимая допущение, что вид кинематически возможного поля линий скольжения, приведенного в [10], при выдавливании квадратной и круглой заготовок с одинаковой площадью $f_{\text{кв}} = f_{\text{кр}}$ остается практически неизменным, и используя зависимость (6) после преобразований уравнения (5), получим уравнение для расчета усилия $P_{n\sum h_{n3}}$, действующего на пуансон при $h_n = h_{n3}$ при выдавливании осесимметричной заготовки через три очага деформации 2, 2', 2'' (см. рис 4, а), в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_{n\sum h_{n3}} = & \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[F_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{L'_3}{0,886D} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{0,886D} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[F_{2\text{опт}} + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho(0,886D)^3 \left[F'_{3\text{опт}} + \frac{L'_3}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{0,886D} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{0,886D} \right]} + \\ & + \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[F'_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{0,886D} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[F'_{2\text{опт}} + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho(0,886D)^3 \left[F'_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{0,886D} \right]} + \\ & + \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[F''_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{0,886D} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[F''_{2\text{опт}} + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho(0,886D)^3 \left[F''_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{0,886D} \right]}. \quad (7) \end{aligned}$$

Анализ уравнения (7) показывает, что, используя корректное решение плоской задачи, основанное на неизменности кинематически возможного поля линий скольжения и годографа скорости и ускорения, из условия равенства площадей квадратной и круглой заготовок можно получить расчетные уравнения для анализа силового режима процесса ударного выдавливания осесимметричной стержневой многоступенчатой детали.

При этом из рассмотренных уравнений (5), (7) видно, что при равенстве площадей квадратной и круглой заготовок усилие на пуансон в условиях плоской и осесимметричной деформации будет иметь одно и то же значение. Положенный в основу двухэтапного перехода принцип равенства площадей квадратных и круглых сечений позволяет с учетом новых величин оперативно преобразовать уравнения для расчета усилия формоизменения в условиях плоской деформации в уравнения для определения силового режима процесса ударного выдавливания стержневого осесимметричного многоступенчатого биметаллического инструмента с диаметрами ступеней d_1, d_2, d_3 , получаемых из исходной круглой заготовки с начальным диаметром D (см. рис. 3).

Заключение. Для анализа силового режима процесса ударного выдавливания в условиях осесимметричной деформации разработана методика пересчета уравнений, полученных для

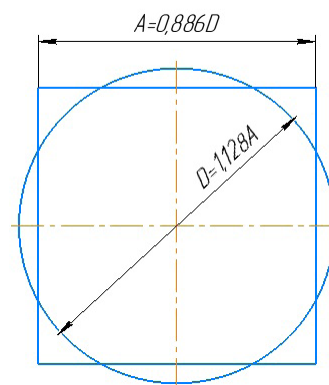


Рис. 6. Формы сечений равноценных по площади квадратной и круглой заготовок, используемых для перехода от плоской к осесимметричной деформации
Fig. 6. Cross-sectional areas of equal-sized square and round workpieces used for transformation from plane to axisymmetric deformation

плоской деформации прямоугольных заготовок. Методика предполагает последовательное формоизменение заготовок с формой поперечных сечений «прямоугольник – квадрат», «квадрат – круг» за два этапа с одновременным пересчетом уравнений для расчета определения силовых нагрузок, действующих на пуансон на каждом этапе указанного формоизменения.

Разработанная методика двухэтапного перехода от плоской к осесимметричной деформации позволяет использовать уравнения для анализа силового режима пуансона в условии плоской ударной деформации квадратной заготовки, для расчета параметров ударного выдавливания многоступенчатого инструмента круглого сечения с диаметром заготовки D и ступеней d_1, d_2, d_3 .

На основе равенства площадей поперечных сечений квадратной и круглой заготовок и неизменности кинематически возможного поля линий скольжения, а также годографов скоростей и ускорений установлена зависимость между стороной квадрата A и диаметром круглой заготовки D в виде $A = 0,886D$, в которой обеспечивается одно и то же усилие формоизменения при изготовлении стержневых деталей как с квадратной, так и с осесимметричной (например, круглой) формой поперечного сечения.

Предложенная схема расчета силовых параметров процесса скоростного ударного выдавливания позволяет оперативно рассчитать силовой режим формирования для любого стержневого ступенчатого инструмента с осесимметричной (круглой) формой поперечных ступеней, используя классический метод верхней оценки.

На современном уровне указанный метод с учетом корректных допущений эффективно используется только для анализа скоростной ударной деформации плоских ступенчатых стержневых изделий. Применяя предложенную методику технологии, в производственных условиях возможно оперативно пересчитать силовой режим формоизменения с плоской на осесимметричную деформацию и на основании такого пересчета подобрать оборудование (чеканочный либо кривошипно-шатунный прессы, штамповочный молот и т. д.), необходимое для реализации процесса изготовления инструмента.

Список используемых источников

1. Быков, К. Ю. Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резцов / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 287–295. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>
2. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. – Минск: Технопринт, 2002. – 327 с.
3. Сидельников, С. Б. Теория процессовковки и штамповки: учеб. пособие / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, И. Л. Константинов; Сиб. федер. ун-т, Ин-т цвет. металлов и материаловедения. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – Красноярск: СФУ, 2017. – 103 с.
4. Макаров, Е. Г. Теория пластичности для инженеров: учеб. пособие / Е. Г. Макаров. – СПб.: БГТУ Воентех, 2011. – 85 с.
5. Теория обработки металлов давлением: учеб. для вузов / В. А. Голенков, С. П. Яковлев, С. А. Головин [и др.]; под ред. В. А. Голенкова, С. П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.
6. Гречников, Ф. В. Теория пластического деформирования металлов: учебник / Ф. В. Гречников, В. Р. Каргин. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2021. – 448 с.
7. Коликов, А. П. Теория обработки металлов давлением: учебник / А. П. Коликов, Б. А. Романцев. – М.: Изд. дом МИСиС, 2015. – 451 с.
8. Здор, Г. Н. Технология высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. – Минск: БНТУ, 2010. – 456 с.
9. Смирнов, В. С. Теория обработки металлов давлением / В. С. Смирнов. – М.: Металлургия, 1973. – 497 с.
10. Качанов, И. В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий / И. В. Качанов, В. В. Власов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 43–52. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-43-52>

References

1. Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Shatalov I. M. Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 287–295 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>
2. Kachanov I. V. *High-Speed Hot Extrusion of Rod Products*. Minsk, Technoprint Publ., 2002. 327 p. (in Russian).

3. Sidel'nikov S. B., Dovzhenko N. N., Konstantinov I. L. *Theory of Forging and Stamping Processes: Textbook*. Ed. 3rd. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2017. 103 p. (in Russian).
4. Makarov E. G. *Plasticity Theory for Engineers*. St. Petersburg, Baltic State Technical University Voenmech named after. D. F. Ustinov, 2011. 85 p. (in Russian).
5. Golenkov V. A., Yakovlev S. P., Golovin S. A., Yakovlev S. S., Cook V. D. Golenkov V. A., Yakovlev S. P. (eds.). *Theory of Metal Forming*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 442 p. (in Russian).
6. Grechnikov F. V., Kargin V. R. *Theory of Plastic Deformation of Metals*. Samara, Samara University Publ. House, 2021. 448 p. (in Russian).
7. Kolikov A. P., Romantsev B. A. *Theory of Metal Forming*. Moscow, MISiS Publ. House, 2015. 451 p. (in Russian).
8. Zdor G. N., Isaevich L. A., Kachanov I. V. *Technology of High-Speed Deformation of Materials*. Minsk, BNTU, 2010. 456 p. (in Russian).
9. Smirnov V. S. *Theory of Metal Pressure Processing*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 497 p. (in Russian).
10. Kachanov I. V., Vlasov V. V. Optimization of the power mode at the high-speed shock-sleeping of bimetallic plane-stage rod products. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 43–52 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-43-52>