

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

УДК 531.781.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-411-419>

Поступила в редакцию 23.07.2021
Received 23.07.2021

К. Ю. Быков, И. В. Качанов, И. М. Шаталов

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**СИЛОВОЙ РЕЖИМ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО СКОРОСТНОГО
КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ДОРОЖНЫХ РЕЗЦОВ**

Аннотация. Приведена упрощенная, трехэтапная модель перехода от плоской к осесимметричной деформации при скоростном, комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов. В основу перехода положен принцип равенства площадей, согласно которому площадь фигуры при плоской деформации заменяется равновеликой площадью круга. При этом считается, что кинематически возможное поле линий скольжения остается неизменным. Такой подход позволяет снизить количество необходимых расчетов и при этом сохранить высокую степень корректности полученных уравнений. Первый этап характеризуется переходом к частному случаю плоской задачи, при котором из исходной заготовки квадратного сечения выдавливается ступенчатая деталь прямоугольного сечения, в котором одна из сторон равна стороне квадрата исходной заготовки. На втором этапе перехода осуществляется выдавливание из исходной заготовки квадратного сечения плоскоступенчатой детали, имеющей квадратные сечения по всей длине. Непосредственно на третьем этапе формируется окончательный переход к осесимметричной деформации резца, при котором площадь квадрата заменяется равновеликой площадью круга. Зависимости, полученные в результате решения осесимметричной задачи, могут быть рекомендованы для расчетов при промышленной реализации технологии скоростного, комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов.

Ключевые слова: осесимметричная деформация, дорожный резец, комбинированное выдавливание, равенство площадей, режим деформирования, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Быков, К. Ю. Силовой режим осесимметричного скоростного комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №4. – С. 411–419. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-411-419>

Konstantin Yu. Bykov, Igor V. Kachanov, Igor M. Shatalov

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**POWER MODE OF AXISYMMETRIC HIGH-SPEED COMBINED EXTRUSION OF BIMETALLIC ROAD
MILLING PICKS**

Abstract. The article presents a simplified three-stage model of the transition from a flat to axisymmetric deformation during high-speed, combined extrusion of bimetallic road milling picks. The transition is based on the principle of equality of areas, according to which the area of a figure during a flat deformation is replaced by an equal area of a circle. In this case, it is assumed that the kinematically possible field of the slip lines remains unchanged. This approach makes it possible to reduce the number of necessary calculations and at the same time maintain a high degree of correctness of the obtained equations. The first stage shows the transition to a special case of a flat problem, in which a stepped rectangular part is extruded from the original square blank, in which one of the sides is equal to the square side of the original blank. At the second stage of the transition, a flat-step part having square sections along its entire length is extruded from the original square-section blank. Directly at the third stage, the final transition to the axisymmetric deformation of the cutter is formed, in which the area of the square is replaced by the equal area of the circle. The dependences obtained because of solving the axisymmetric problem can be recommended for calculations in the industrial implementation of the technology of high-speed combined extrusion of bimetallic milling picks.

Keywords: axisymmetric deformation, road-milling picks, combined extrusion, equality of areas, deformation mode, stress-strain state

For citation: Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Shatalov I. M. Power mode of axisymmetric high-speed combined extrusion of bimetallic road milling picks. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 411–419 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-411-419>

Введение. Разработка новых технологических процессов при получении стержневых изделий с осевой симметрией, к которым можно отнести и дорожные резцы, сопряжена с проведением анализа напряженно-деформированного состояния заготовки с последующим определением мощности и усилия, необходимых для штамповки готового продукта. В литературе имеется достаточное количество рекомендаций для расчета как плоских, так и осесимметричных (пространственных) задач [1–8]. Стоит отметить, что некоторые из этих рекомендаций являются весьма трудоемкими с точки зрения реализации необходимых расчетов.

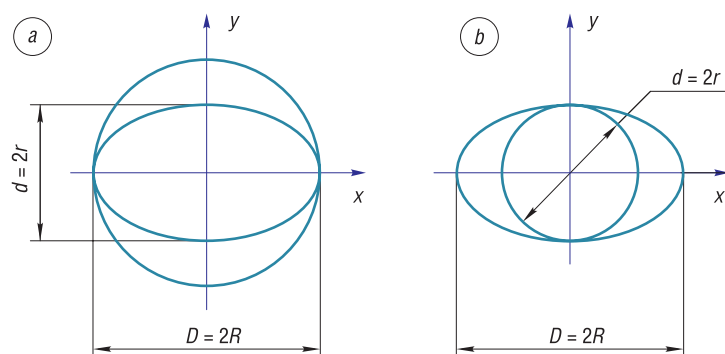


Рис. 1. Два перехода плоской деформации при анализе осесимметричного выдавливания [6, 7]: *a* – схема «круг – эллипс», *b* – схема «эллипс – круг»

Fig. 1. Two flat strain transitions in axisymmetric extrusion analysis [6, 7]: *a* – scheme “circle – ellipse”, *b* – scheme “ellipse – circle”

Так, в [6, 7] авторы рассматривают осесимметричную деформацию как суперпозицию двух переходов плоской деформации (рис. 1). При этом считается, что на первом переходе цилиндрическая заготовка диаметром $D = 2R$ (R – радиус заготовки) выдавливается в стержень эллиптического сечения с параметрами осей $D = 2R$ (большая ось) и $d = 2r$ (малая ось) (рис. 1, *a*). На втором переходе эллиптическая заготовка деформируется через круглое отверстие в цилиндрический пруток с диаметром $d = 2r$ (рис. 1, *b*).

Наряду с этим авторы работ [9, 10] отмечают, что при исследовании кинематики пластического течения имеет место подобие очагов пластической деформации при выдавливании плоских и осесимметричных изделий. Поэтому для осесимметричного выдавливания рассмотрение очага деформации осуществляется в диаметральном сечении заготовки и продеформированной стержневой части.

С учетом этого обстоятельства вполне правомерно осуществить, на наш взгляд, решение плоской задачи с минимальным искажением очага деформации при последующем переходе к осесимметричной деформации. Как пример такого решения в данной статье предлагается плоскую деформацию осуществить на примере ступенчатого, комбинированного выдавливания поковок резца из исходной квадратной заготовки. При этом отличительной особенностью этого процесса является равенство площадей квадратных сечений заготовки и ступенчатых элементов поковки соответствующим площадям круга в осесимметричной детали. При таком подходе полученное решение плоской задачи для поковки с площадями квадратного сечения может быть пересчитано на осесимметричную деталь (используя все полученные расчетные зависимости, годографы скоростей и ускорений) на основе практической неизменности кинематически возможных полей линий скольжения (очага деформации) в условиях как плоской, так и осесимметричной деформации.

Цель данной работы – представление упрощенной, трехэтапной, модели перехода от плоской к осесимметричной деформации при выдавливании биметаллических дорожных резцов.

Первый этап перехода от плоской деформации к осесимметричной. Используя метод верхней оценки, нами была разработана математическая модель [11] расчета режима нагружения пуансона в процессе скоростного комбинированного горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов в условиях плоской деформации. В процессе решения плоской задачи была получена диаграмма $P_n = f(h_n)$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» (рис. 2). Условно процесс был разделен на две стадии: стадию разгона (зона «P» на рис. 2) и стадию торможения, состоящую из двух этапов (зоны «T₁» и «T₂» на рис. 2). Отличительной особенностью данного процесса от ряда схожих по тематике работ [12–14] является то, что в процессе выдавливания на стадии разгона часть металла деформируемой заготовки течет в направлении, противоположном ходу движения пуансона, то есть имеет место так называемое обратное выдавливание.

В ходе решения плоской задачи зависимости, полученные на основе минимальной мощности внутренних сил, установленной по оптимальным параметрам поля и матричной полости (α, β, γ), и характеризующие воспринимаемое пуансоном на каждом этапе выдавливания усилие, имеют вид [11]:

$$P_{п.р,мин} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{1,опт}(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{A} \right] + \rho v_0^2 F_{2,опт}(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 2A^2 b \rho \left(F_{3,опт}(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A \rho} \right)}; \quad (1)$$

$$P_{п1,мин} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{4,опт}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,опт}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_{6,опт}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)}; \quad (2)$$

$$P_{п2,мин} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{4,опт}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,опт}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_{6,опт}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)} + \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{7,опт}(\gamma, \lambda_3, \mu) + 2\mu \left(h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{8,опт}(\gamma, \lambda_2, \lambda_3) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_{9,опт}(\gamma, \lambda_3) + h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right)}, \quad (3)$$

где $P_{п.р,мин}, P_{п1,мин}, P_{п2,мин}$ – минимальные верхнеграницные усилия, воспринимаемые пуансоном на путях деформирования h_p, h_1, h_2 соответственно; h_p, h_1, h_2 – пути деформирования на стадии разгона, первом и втором этапах стадии торможения соответственно; $L_{зар'}$ – длина заготовки; A и b – геометрические размеры (высота и ширина) заготовки, пуансона и промежуточного

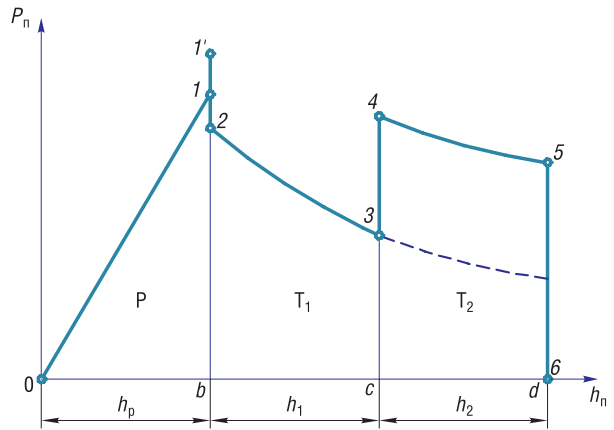


Рис. 2. Расчетная диаграмма $P_n = f(h_n)$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» для плоской задачи: P – стадия разгона; T₁ – первый этап стадии торможения; T₂ – второй этап стадии торможения; h_p – путь деформирования на стадии разгона; h_1 – путь деформирования на первом этапе стадии торможения; h_2 – путь деформирования на втором этапе стадии торможения [11]

Fig. 2. Diagram $P_n = f(h_n)$ “force on the punch – deformation path” for a flat problem: P – acceleration phase; T₁ – the first stage of the inhibition phase; T₂ – the second stage of the inhibition phase; h_p – deformation path at the acceleration phase; h_1 – deformation path at the first stage of the inhibition stage; h_2 – deformation path in the second stage of the inhibition phase [11]

бойка; M – масса пуансона; k – пластическая постоянная; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициенты вытяжек; μ – коэффициент контактного трения; v_0 – начальная скорость пуансона; ρ – плотность заготовки; $l_{п.б}$ – длина промежуточного бойка; $\rho_{п.б}$ – плотность промежуточного бойка; α, β, γ – углы матричной полости; $F_{1,opt} - F_{9,opt}$ – функционалы усилий выдавливания, определяемые в зависимости от условий деформирования.

При этом коэффициенты вытяжек $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в выражениях (1)–(3) определяются через отношение площадей сечений до и после деформации по зависимостям $\lambda_1 = \frac{2Ab}{2a_1b} = \frac{A}{a_1}, \lambda_2 = \frac{2Ab}{2a_2b} = \frac{A}{a_2}, \lambda_3 = \frac{2a_2b}{2a_3b} = \frac{a_2}{a_3}$.

Для перехода от плоской задачи к осесимметричной на первом этапе формоизменения, когда сечение заготовки по длине представляет собой прямоугольники со сторонами $2A, 2a_1, 2a_2, 2a_3$ и b (рис. 3), необходимо внести изменение, суть которого сводится к приравнению размера b (ширина заготовки) к размеру $2A$ (высота заготовки), то есть $b = 2A$ (рис. 4). Отсюда получаем, что площадь исходной заготовки $f_{п.исх} = 2Ab$ увеличивается до значения $f_{п.кв} = 4A^2$. Таким образом, возникает частный случай плоской задачи, когда из исходной заготовки квадратного сечения выдавливаются прямоугольники с шириной, равной $2A$ (рис. 4).

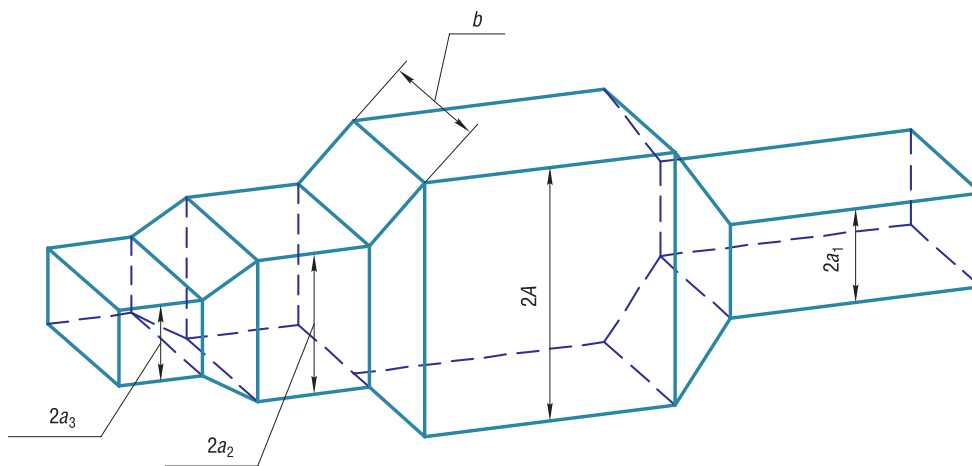


Рис. 3. Плоская задача выдавливания биметаллических дорожных резцов
Fig. 3. The problem of flat extrusion of bimetallic milling picks

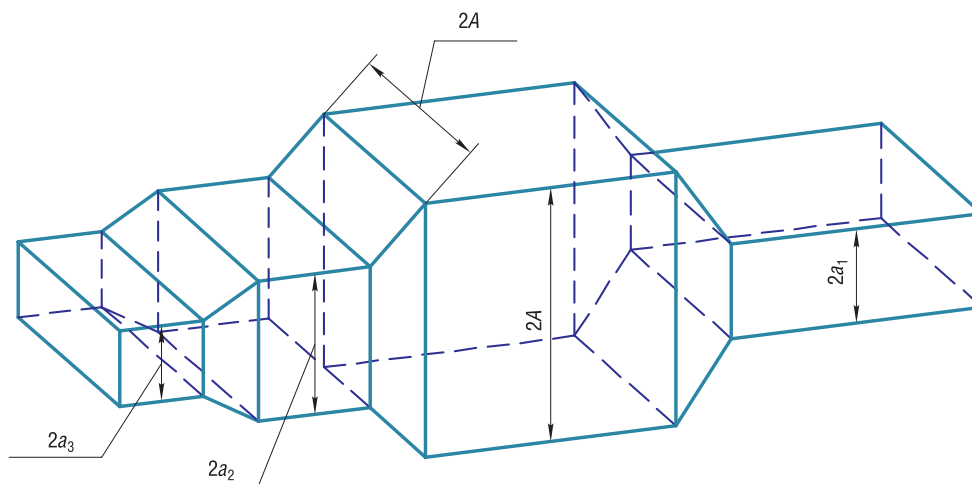


Рис. 4. Частный случай плоской задачи с исходной заготовкой в виде квадрата
Fig. 4. The special case of the flat problem with an initial workpiece in the form of a square

Произведя замену исходных площадей в уравнениях (1)–(3), получим выражения для расчета усилия деформирования при выдавливании из исходной квадратной заготовки ступенчатой детали, ширина которой равняется $2A$:

$$P_{п.р, \min} = \frac{4A^2M \left\{ k \left[F_{1, \text{opt}}(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{A} \right] + \rho v_0^2 F_{2, \text{opt}}(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 4A^3 \rho \left(F_{3, \text{opt}}(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A\rho} \right)}; \quad (4)$$

$$P_{п1, \min} = \frac{4A^2M \left\{ k \left[F_{4, \text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{заг'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5, \text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 4A^3 \rho \left(F_{6, \text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{заг'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A\rho} - \frac{h_p}{A} \right)}; \quad (5)$$

$$P_{п2, \min} = \frac{4A^2M \left\{ k \left[F_{4, \text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{заг'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5, \text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 4A^3 \rho \left(F_{6, \text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{заг'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A\rho} - \frac{h_p}{A} \right)} + \quad (6)$$

$$+ \frac{4A^2M \left\{ k \left[F_{7, \text{opt}}(\gamma, \lambda_3, \mu) + 2\mu \left(h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{8, \text{opt}}(\gamma, \lambda_2, \lambda_3) \right\}}{M + 4A^3 \rho \left(F_{9, \text{opt}}(\gamma, \lambda_3) + h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right)}.$$

При этом выражения для определения коэффициентов вытяжек $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ останутся неизменными.

Второй этап перехода от плоской деформации к осесимметричной. На данном этапе необходимо осуществить формоизменение плоскоступенчатого резца квадратного сечения со сторонами ступеней a_1, a_2, a_3 из исходной заготовки квадратного сечения со стороной квадрата $2A$ (рис. 5). Для того чтобы получить квадратные сечения по всей длине, необходимо дополнительно продеформировать заготовку в направлении, перпендикулярном направлению движения пуансона (физической плоскости).

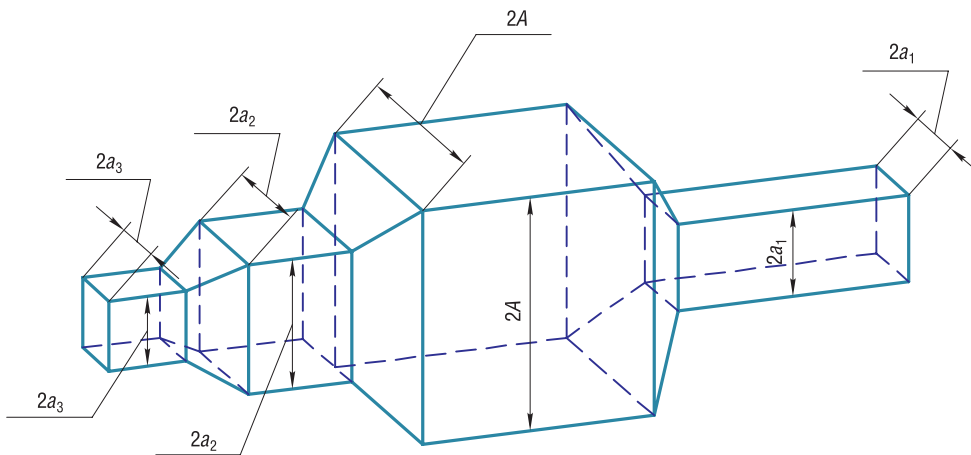


Рис. 5. Форма поперечных сечений резца в виде квадратов
 Fig. 5. The shape of the cross-sections of the road milling picks in the form of squares

Математически это будет означать, что усилия, полученные по уравнениям (4)–(6), необходимо увеличить в 2 раза. Тогда указанные выражения примут вид:

$$P_{п.п,\min} = \frac{8A^2 M \left\{ k \left[F_{1,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{A} \right] + \rho v_0^2 F_{2,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 4A^3 \rho \left(F_{3,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A\rho} \right)}; \quad (7)$$

$$P_{п1,\min} = \frac{8A^2 M \left\{ k \left[F_{4,\text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{заг'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,\text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 4A^3 \rho \left(F_{6,\text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{заг'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A\rho} - \frac{h_p}{A} \right)}; \quad (8)$$

$$P_{п2,\min} = \frac{8A^2 M \left\{ k \left[F_{4,\text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{заг'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,\text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 4A^3 \rho \left(F_{6,\text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{заг'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{A\rho} - \frac{h_p}{A} \right)} + \quad (9)$$

$$+ \frac{8A^2 M \left\{ k \left[F_{7,\text{opt}}(\gamma, \lambda_3, \mu) + 2\mu \left(h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{8,\text{opt}}(\gamma, \lambda_2, \lambda_3) \right\}}{M + 4A^3 \rho \left(F_{9,\text{opt}}(\gamma, \lambda_3) + h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right)}.$$

В выражениях (7)–(9) значения коэффициентов вытяжек $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ будут равны: $\lambda_1 = \frac{2A^2}{2a_1^2} = \frac{A^2}{a_1^2}$, $\lambda_2 = \frac{2A^2}{2a_2^2} = \frac{A^2}{a_2^2}$, $\lambda_3 = \frac{2a_2^2}{2a_3^2} = \frac{a_2^2}{a_3^2}$.

Третий этап перехода от плоской деформации к осесимметричной. На этом этапе перехода к осесимметричной деформации необходимо заменить площадь квадратной заготовки $f_{п.кв} = 4A^2$ на равновеликую площадь круга $f_{кр} = \pi D^2/4$ (рис. 6):

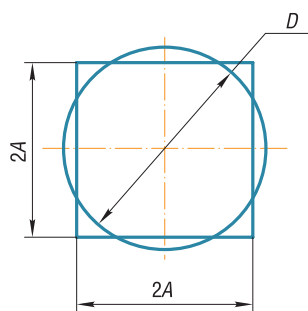


Рис. 6. Форма равновеликих площадей квадратной и круглой заготовок при переходе к осесимметричной деформации

Fig. 6. The shape of equal areas of square and round blanks in the transition to axisymmetric deformation

$$f_{п.кв} = f_{кр} = 4A^2 = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow A = 0,443D, \quad (10)$$

где D – диаметр равновеликого круга осесимметричной заготовки; $2A$ – сторона равновеликой по площади квадратной заготовки, используемая в решении плоской задачи.

При этом будем считать, что кинематически возможное поле линий скольжения с варьируемыми оптимальными параметрами $\alpha_{\text{opt}}, \beta_{\text{opt}}, \gamma_{\text{opt}}$, включая выражения для расчетов этих параметров, полученные при решении плоской задачи [11], остаются неизменными.

Подставляя зависимость (10) в уравнения (7)–(9), получим выражения для расчета усилия необходимого для скоростного выдавливания осесимметричного дорожничного резца с диаметрами ступеней d_1, d_2, d_3 из исходной заготовки диаметром D :

$$P_{п.п,\min.ос} = \frac{1,57D^2 M \left\{ k \left[F_{1,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{0,443D} \right] + \rho v_0^2 F_{2,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 0,348D^3 \rho \left(F_{3,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{0,443D} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{0,443D\rho} \right)}; \quad (11)$$

$$P_{п1, \min. oc} = \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[F_{4, \text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{\text{зар}}' - h_1}{0,443D} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{0,443D} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5, \text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 0,348D^3 \rho \left(F_{6, \text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{\text{зар}}' - h_1}{0,443D} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{0,443D} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{0,443D \rho} - \frac{h_p}{0,443D} \right)}; \quad (12)$$

$$P_{п2, \min. oc} = \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[F_{4, \text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{\text{зар}}' - h_1 - h_2}{0,443D} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{0,443D} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5, \text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 0,348D^3 \rho \left(F_{6, \text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{\text{зар}}' - h_1 - h_2}{0,443D} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{0,443D} + \frac{l_{п.б} \rho_{п.б}}{0,443D \rho} - \frac{h_p}{0,443D} \right)} + \quad (13)$$

$$+ \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[F_{7, \text{opt}}(\gamma, \lambda_3, \mu) + 2\mu \left(h_2 \frac{\lambda_2^2(\lambda_3^2 + 1)}{0,443D} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{8, \text{opt}}(\gamma, \lambda_2, \lambda_3) \right\}}{M + 0,348D^3 \rho \left(F_{9, \text{opt}}(\gamma, \lambda_3) + h_2 \frac{\lambda_2^2(\lambda_3^2 + 1)}{0,443D} \right)}.$$

Коэффициенты вытяжек $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в уравнениях (11)–(13) будут определяться по зависимостям: $\lambda_1 = \frac{D^2}{d_1^2}, \lambda_2 = \frac{D^2}{d_2^2}, \lambda_3 = \frac{d_2^2}{d_3^2}$.

Сравнительный анализ уравнений (1)–(3) и (11)–(13) показывает, что усилие, воспринимаемое пуансоном, при осесимметричной деформации в 2 раза больше, чем при плоской. Сравнительная диаграмма зависимостей $P_{п} = f(h_{п})$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» для случая осесимметричного и плоского скоростного комбинированного горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов представлена на рис. 7.

В условиях осесимметричной деформации усилие, воспринимаемое пуансоном, возрастает за счет увеличивающегося в 2 раза объема материала, который подвергся деформации, и сил контактного трения, динамических напряжений на поверхностях разрыва скоростей и действия сил инерции деформируемой заготовки на стадиях разгона и торможения (рис. 7, кривая 1).

Приведенная диаграмма (см. рис. 7, кривая 1) для случая осесимметричной деформации по аналогии с плоской деформацией (см. рис. 7, кривая 2) имеет схожие участки, соответствующие условным стадиям процесса: стадии разгона и стадии торможения. Так, на стадии разгона (см. рис. 7, кривая 1, участок 0–1_{oc}), когда происходит заполнение хвостовой части резца [11], усилие на пуансоне, как показано на диаграмме, возрастает практически по линейному закону. Затем на стадии торможения за счет одномоментного выравнивая скоростей пуансона и оставшейся части заготовки происходит дополнительное возрастание усилия до некоторого значения, характеризуемого точкой 1'_{oc}, а затем усилие деформирования убывает по экспоненциальной кривой (участок диаграммы 2'_{oc}–3'_{oc}). В точке 3'_{oc} на втором этапе стадии торможения за счет прохождения оставшейся части металла одновременно через два очага деформации возрастает воспринимаемое пуансоном усилие [11]. Достигнув некоторого значения, характеризуемого точкой 4'_{oc} (см. рис. 7, кривая 2), усилие пуансона начинает убывать, подобно первой стадии торможения, по экспоненциальной кривой (участок диаграммы 4'_{oc}–5'_{oc}, см. рис. 7, кривая 1).

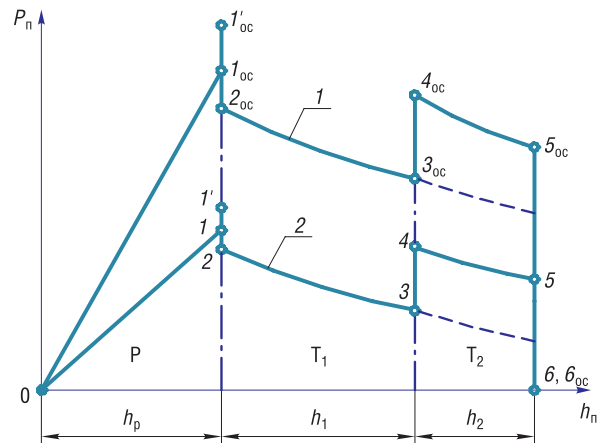


Рис. 7. Сравнительная диаграмма $P_{п} = f(h_{п})$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» при скоростном выдавливании биметаллических дорожных резцов: кривая 1 – осесимметричная задача, кривая 2 – плоская задача

Fig. 7. Comparison chart $P_{п} = f(h_{п})$ “force on the punch – deformation path” at high-speed extrusion of bimetallic road milling picks: curve 1 – axisymmetric problem, curve 2 – flat problem

Таким образом, выражения (11)–(13) и диаграмма $P_{\text{п}} = f(h_{\text{п}})$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» (см. рис. 7, кривая 1), полученные в результате предложенного перехода от плоской деформации к осесимметричной, определяют оптимальный режим и характерные этапы нагружения при скоростном комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов в условиях осесимметричной деформации.

Заключение. Получены математические зависимости для определения минимального усилия при скоростном, комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов в условиях осесимметричной деформации. Положенный в основу решения принцип равенства площадей позволяет говорить о достаточной корректности полученных выражений, а также рекомендовать данные зависимости для энергосиловых расчетов при проектировании и подборе оборудования в рамках промышленной реализации технологии скоростного, комбинированного, горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов.

На основании полученных зависимостей построена диаграмма $P_{\text{п}} = f(h_{\text{п}})$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» для осесимметричной деформации.

Зависимости (11)–(13) могут быть рекомендованы для расчета энергосиловых параметров при промышленной реализации технологии скоростного, комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов.

Список использованных источников

1. Качанов, И. В. Определение усилия в процессе ударного выдавливания плоских стержневых изделий / И. В. Качанов, О. М. Дьяконов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2002. – № 1. – С. 77–81.
2. Теорияковки и штамповки: учеб. пособие / Е. П. Унксов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.
3. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, Л. Меллор. – М.: Машиностроение, 1979. – 598 с.
4. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
5. Томленов, А. Д. Теория пластинчатого деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
6. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. – Минск: УП «Технопринт», 2002. – 327 с.
7. Здор, Г. Н. Технология высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. – Минск: БНТУ, 2010. – 456 с.
8. Смирнов, В. С. Теория обработки металлов давлением / В. С. Смирнов. – М.: Металлургия, 1973. – 497 с.
9. Теоретические основыковки и горячей штамповки / Е. М. Макушок [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1968. – 408 с.
10. Томсен, Э. Механика пластической деформации при обработке металлов / Э. Томсен, Э. Янг, Ш. Кобояши. – М.: Машиностроение, 1969. – 503 с.
11. 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>
12. Качанов, И. В. Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента / И. В. Качанов, В. Н. Шарий, В. В. Власов // Наука и техника. – 2016. – Т. 155, № 1. – С. 3–8. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-3-8>
13. Качанов, И. В. Оптимизация энергосилового режима при ударном выдавливании стержневых изделий с плакированием торцевой части / И. В. Качанова, В. Н. Шарий // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 29–36.
14. Качанов, И. В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий / И. В. Качанов, В. В. Власов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 43–52. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-43-52>

References

1. Kachanov I. V., Dyakonov O. M. Determination of the force in the process of impact extrusion of flat rod products. *Vesti Natsyunal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2002, no. 1, pp. 77–81 (in Russian).
2. Unksov E. P., Dzhonson U., Kolmogorov V. L. [et al.]. *Forging and Stamping Theory*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 720 p. (in Russian).
3. Johnson W., Mellor P. B. *Plasticity for Mechanical Engineers*. London, Princeton, N. J., Van Nostrand, 1962. 412 p.
4. Kolmogorov V. L. *Metal Forming Mechanics*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 688 p. (in Russian).
5. Tomlenov A. D. *The Theory of Plate Deformation of Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 408 p. (in Russian).
6. Kachanov I. V. *High-Speed Hot Extrusion of Core Products*. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2002. 327 p. (in Russian).

7. Zdor G. N., Isaevich L. A., Kachanov I. V. *High-Speed Material Deformation Technology*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2010. 456 p. (in Russian).
8. Smirnov V. S. *Theory of Metal Forming*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 497 p. (in Russian).
9. Makushok E. M., Matusevich A. S., Severdenko V. P., Segal V. M. *Theoretical Foundations of Forging and Hot Forging*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1968. 408 p. (in Russian).
10. Thomsen E. G., Yang C. T., Kobayashi S. *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing*. Macmillan, 1965. 486 p.
11. Bykov K. Y., Kachanov I. V., Shatalov I. M. Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Rod 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>
12. Kachanov I. V., Shary V. N., Vlasov V. V. Resource-Saving Technology for High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Rod Parts. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 3–8 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-3-8>
13. Kachanov I. V., Shary V. N. Optimization of power regime during impact extrusion of rod products with cladding of the end part. *Vestnik BNTU*, 2008, no. 2, pp. 29–36 (in Russian).
14. Kachanov I. V., Vlasov V. V. Loading regime optimization for high-speed impact extrusion of bimetallic flat-step rod products. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi, Seryya fizika-technichnykh 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>

Информация об авторах

Быков Константин Юрьевич – аспирант, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: k.bykovofficial@gmail.com

Качанов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ihar.kachanau@bntu.by

Шаталов Игорь Михайлович – старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ishatalau@bntu.by

Information about the authors

Konstantin Yu. Bykov – Postgraduate Student, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: k.bykovofficial@gmail.com

Igor V. Kachanov – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ihar.kachanau@bntu.by

Igor M. Shatalov – Senior Lecturer, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ishatalau@bntu.by