

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>

УДК 531.781.2

Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резцов

Асп. К. Ю. Быков¹⁾, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, И. М. Шаталов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Представлена математическая модель, разработанная для расчета силового воздействия на пуансон в процессе скоростного комбинированного горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов в условиях плоской деформации. Для решения этой задачи процесс разделяли на две стадии: разгона и торможения. Стадия торможения состоит из двух этапов. Отличительной особенностью стадии разгона является то, что она позволяет провести анализ обратного выдавливания, в процессе которого металл течет в направлении, противоположном ходу пуансона. Приведена методика расчета усилия, действующего на пуансон на каждой стадии процесса пластического течения биметаллической заготовки в матричную полость с тремя очагами деформации. В ходе решения задачи в квазистатической постановке и исходя из условий минимальной мощности внутренних сил получены уравнения для расчета оптимальных параметров поля α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} , зависящих от коэффициентов вытяжки λ и коэффициента трения μ . Уравнения, полученные в рамках разработанной модели, являются достаточно корректными, так как позволяют определять минимальное усилие, действующее на пуансон. Рассматриваемая модель расчета и уравнения могут быть использованы при разработке промышленной технологии скоростного комбинированного горячего выдавливания плоскоступенчатых биметаллических резцов.

Ключевые слова: дорожные резцы, ударное выдавливание, комбинированное выдавливание, режим деформирования, скоростное выдавливание, математическая модель, оптимальный режим

Для цитирования: 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>

Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks

К. Ю. Быков¹⁾, И. В. Качанов¹⁾, И. М. Шаталов¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents a mathematical model developed for calculating the force effect on the punch in the process of high-speed combined hot extrusion of bimetallic road milling picks under plane deformation conditions. To solve the problem, the process is divided into two phases: acceleration phase and braking phase, which consists of two stages. A distinctive feature of the acceleration phase is that it allows the analysis of reverse extrusion, in the process of which the metal flows in the opposite direction to the punch stroke. A method for calculating the force acting on the punch at each phase of the process of plastic flow of a bimetallic workpiece into a matrix cavity with three deformation zones is presented in the paper. While solving the problem in a quasi-static formulation and proceeding from the conditions of the minimum power of internal forces, equations have been obtained for calculating the optimal field parameters α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} , depending on the elongation coefficients λ and the friction coefficient μ . The equations obtained within the framework of the developed model are quite correct, since they allow determining the minimum force acting on the punch. The considered calculation model and equations can be used in the development of industrial technology for high-speed combined hot extrusion of flat-step bimetallic road milling picks.

Keywords: road milling pick, impact extrusion, combined extrusion, deformation mode, high-speed extrusion, mathematical model, optimal mode

For citation: Bykov K. Y., Kachanov I. V., Shatalov I. M. (2021) Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks. *Science and Technique*. 20 (4), 287–295. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295> (in Russian)

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

Введение

Современное промышленное производство Республики Беларусь не в полной мере обеспечивает отдельные отрасли народного хозяйства необходимым инструментом, к которому относятся и дорожные резцы, применяемые при строительстве и ремонте дорог. Поэтому такого рода инструмент импортируется из-за рубежа по мировым ценам.

Решением данной проблемы могут стать разработка и использование наукоемких технологий обработки материалов, обеспечивающих (с одновременным снижением энерго- и ресурсозатрат) повышение эксплуатационных качеств получаемых изделий – износостойкости и длительности рабочего ресурса. В этой связи технологии, основанные на высоких скоростях деформации, такие как скоростное комбинированное горячее выдавливание (СКГВ), обладают большими возможностями. Одно из преимуществ СКГВ – возможность получения высокоточных неразъемных биметаллических деталей в сочетании со значительной экономией высоколегированных штамповых сталей (до 90 %). Однако отсутствие теоретической базы, дающей представление о реальных условиях работы инструмента, не позволяет дать толчок промышленному развитию этого процесса [1–4].

Цель исследования – создание теоретической базы, описывающей процесс скоростного комбинированного выдавливания плоскоступенчатых биметаллических дорожных резцов.

Основная часть

Реализация процесса изготовления дорожных резцов заключается в скоростном деформировании предварительно нагретых составных заготовок (рис. 1), состоящих из корпуса резца и его рабочей части. Основой заготовки (корпуса резца) может служить конструкционная легированная сталь 40X или 5ХНМ, а в качестве рабочей части (наконечника) – быстрорежущие стали P18, P6M5, а также высоколегированные штамповые стали ДИ23, 5ХНМ, 3X2B8Ф [2, 5].

Для теоретического исследования процесса СКГВ биметаллических дорожных резцов

необходимо разработать модель динамического взаимодействия системы «пуансон – деформируемая заготовка». В основу решения поставленной задачи положен приближенный энергетический метод (метод верхней оценки), основанный на использовании кинематически возможного поля скоростей. Преимущества этого метода в том, что в нем могут одновременно применяться как аналитические, так и графические способы решения, а точность результатов определяется расхождением механических характеристик материалов и условий трения.

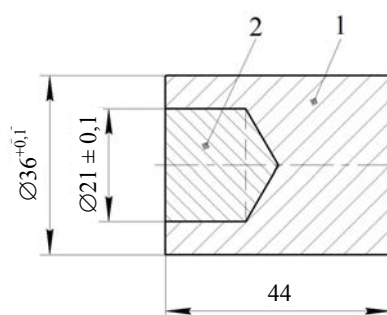


Рис. 1. Схема соединения заготовки:

1 – корпус резца; 2 – рабочая часть

Fig. 1. Workpiece connection scheme:

1 – milling pick body; 2 – working part

Для расчета усилия, воспринимаемого пуансоном, используем кинематически возможное поле скоростей, преобразованное из действительного непрерывного поля линий скольжения (рис. 2а) путем линейной аппроксимации. Принятое поле скоростей состоит из недеформируемых блоков 0–7, где пластические области сосредоточены в треугольных зонах 2, 4, 6, и характеризуется постоянными значениями скорости и ускорения для всех точек указанных блоков относительно неподвижной области [6, 7].

Теоретический анализ процесса проводили при следующих основных допущениях: упругие деформации инструмента равны нулю; деформируемая среда – однородная, жесткопластическая, изотропная и отвечающая условию пластичности Губера – Мизеса; скорость деформирования и силы инерции не оказывают влияния на вид поля скоростей (квазистатическая задача) и кинематику формоизменения (псевдостационарное течение) [1, 2, 8, 9].

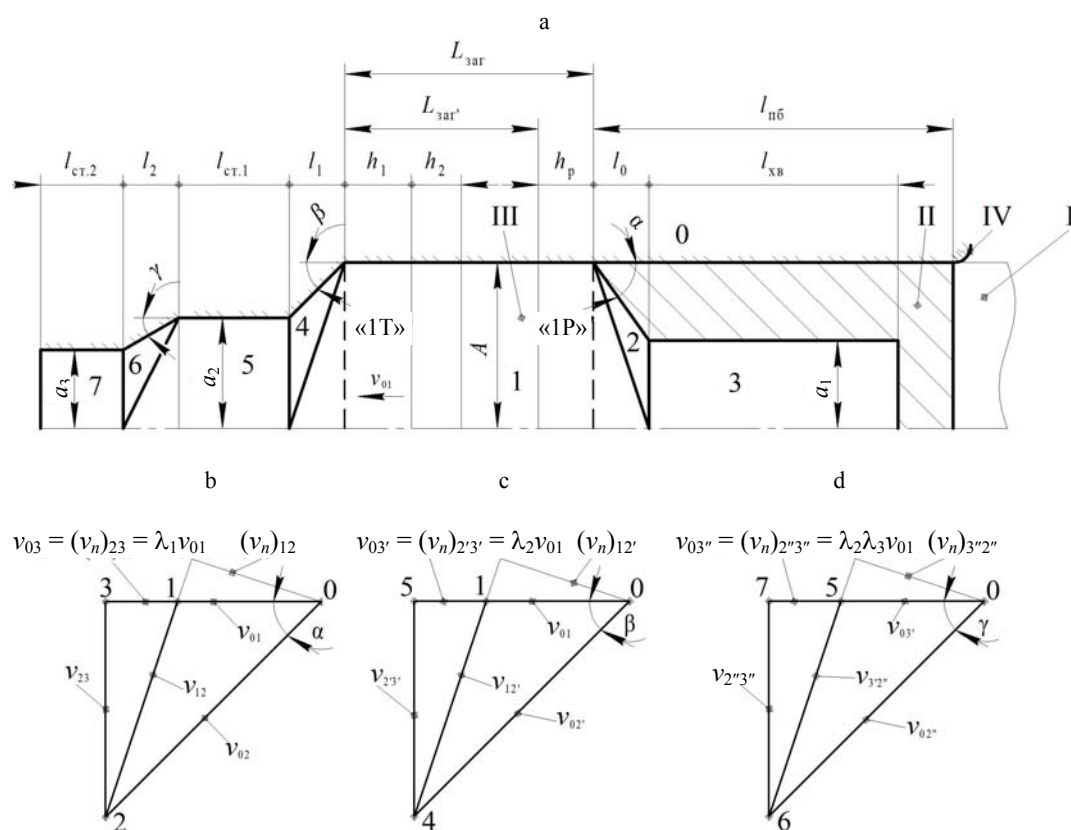


Рис. 2. Кинематически возможное поле скоростей (а) и соответствующие ему годографы скоростей (b, c, d) при скоростном выдавливании биметаллических резцов:

I – пуансон; II – промежуточный боек; III – заготовка; IV – полуматрица

Fig. 2. Kinematically possible velocity field (a) and corresponding hodographs of velocities (b, c, d) at high-speed extrusion of bimetallic milling picks:

I – punch; II – intermediate striker; III – workpiece; IV – semi-matrix

Усилие, действующее на пуансон в процессе СКГВ, найдем, используя уравнение баланса мощностей внутренних и внешних сил [2]

$$W_{\text{п}} = W_{\text{с.с}} = W_{\text{соб}} + W_{\text{дин}} \pm W_{\text{ин}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{п}}$ – мощность движущегося пуансона; $W_{\text{с.с}}$ – то же суммарная сил сопротивления; $W_{\text{соб}}$ – то же сил собственного сопротивления металла деформированию; $W_{\text{дин}}$ – то же от действия динамических напряжений на поверхностях разрыва скоростей; $W_{\text{ин}}$ – то же локальных сил инерции движущейся заготовки.

В (1) мощность $W_{\text{ин}}$ – знакопеременная величина [2]. На начальной стадии процесса – стадии разгона, которая реализуется на пути перемещения пуансона $h_{\text{р}}$ (рис. 3d), когда происходит формирование хвостовой части резца, сопровождаемое течением металла в обратном направлении, – локальные силы инерции на-

правлены в сторону, противоположную ходу движения пуансона I и промежуточного бойка II, что обусловлено ускоренным течением частиц металла в блоках 1–3. Вследствие этого часть мощности $W_{\text{п}}$ затрачивается на преодоление сопротивления от действия указанных сил. Поэтому стадия разгона характеризуется тем, что величина $W_{\text{ин}}$ в (1) берется со знаком плюс.

На основании многочисленных экспериментальных исследований [1, 6, 7, 10] установлено, что характерной особенностью стадии разгона является резкое нарастание усилия $P_{\text{п}}$, действующего на пуансон со стороны деформируемой заготовки практически по линейному закону (рис. 3d, участок 0–1 на силовой диаграмме $P_{\text{п}} = f(h_{\text{п}})$ «усилие на пуансоне – путь деформирования»). Также важно отметить, что в принятой схеме расчета на стадии разгона уравнение баланса мощностей возможно составить только в единственный момент времени, когда проис-

ходит уменьшение начальной скорости v_0 пуансона до некоторого значения v_0^* , при котором скорости пуансона, промежуточного бойка и части деформируемой заготовки (рис. 2а, зона «1Р») выравниваются и величина усилия, действующего на пуансон, достигает значения, характеризуемого точкой 1 на силовой диаграмме $P_n = f(h_n)$ (рис. 3д).

Для конечной стадии процесса – стадии торможения – принимается, что выравнивание скоростей пуансона I, промежуточного бойка II и части деформируемой заготовки (рис. 2а, зона «1Т») происходит одновременно с дополнительным возрастанием усилия относительно достигнутого в точке 1 на 10–12 % (рис. 3д,

участок 1–1' на графике $P_n = f(h_n)$) до некоторого максимального значения, характеризуемого точкой 1'. При этом будем считать, что сформированная система, состоящая из пуансона I, промежуточного бойка II и оставшейся части заготовки «1Т», начинает двигаться замедленно с начальной скоростью v_0^* и с одинаковым ускорением, а действующие при этом в заготовке силы инерции направлены по ходу движения системы «пуансон – промежуточный боек – заготовка» и снижают сопротивление для движущегося пуансона. На основании этого мощность от действия сил инерции $W_{ин}$ на стадии торможения в уравнении (1) берется со знаком минус.

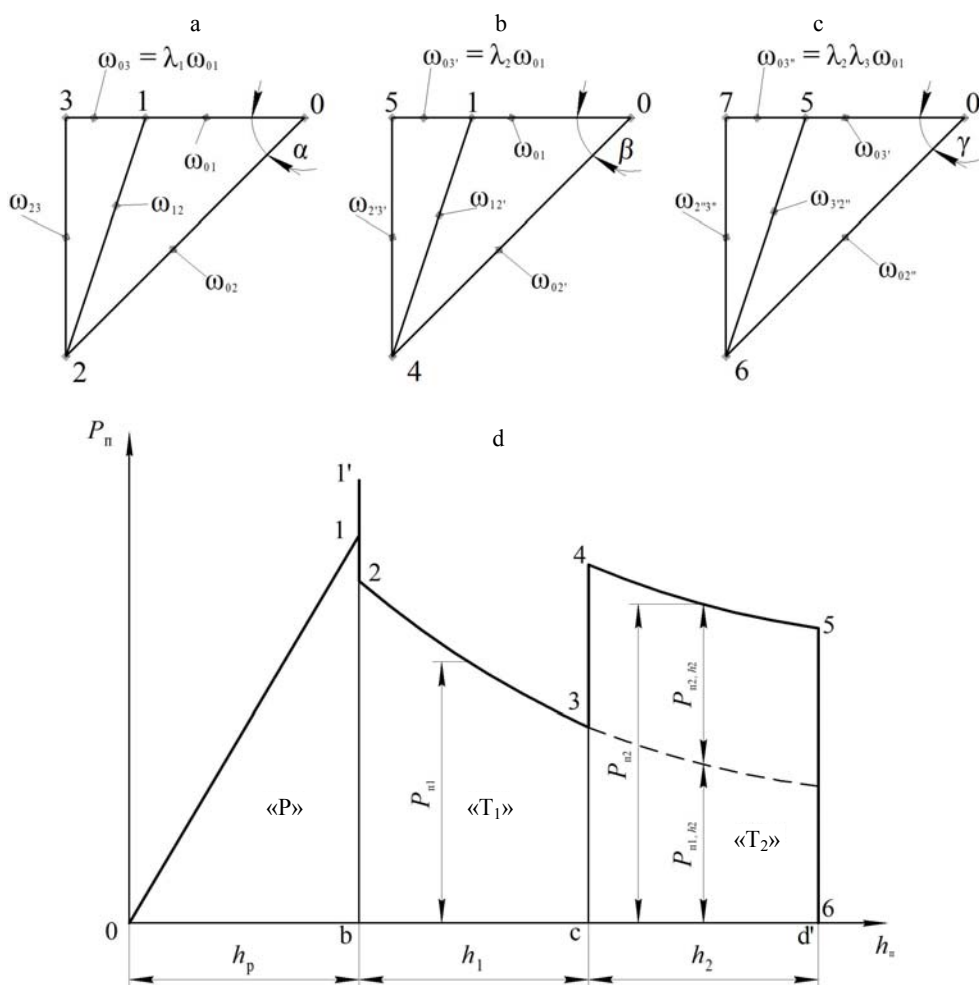


Рис. 3. Голографы ускорений (а, б, с) и силовая диаграмма $P_n = f(h_n)$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» (д) при скоростном выдавливании плоских биметаллических резцов: «P» – стадия разгона; «T₁», «T₂» – первый и второй этапы стадии торможения

Fig. 3. Acceleration hodographs (a, b, c) and force diagram $P_n = f(h_n)$ “force on punch – deformation path” (d) at high-speed extrusion of flat bimetallic milling picks: “P” – acceleration phase; “T₁”, “T₂” – first and second stages of inhibition phase

Определим величины, входящие в (1). Мощность $W_{\text{п}}$ пуансона, движущегося со скоростью v_0 , установим из выражения [2]

$$W_{\text{п}} = P_{\text{п}} v_0 = p_{\text{п}} 2A b v_0, \quad (2)$$

где $P_{\text{п}}$, $p_{\text{п}}$ – усилие и давление, действующие со стороны пуансона на заготовку; $2A$ – высота заготовки; b – ширина заготовки в плоскости, перпендикулярной направлению движения пуансона.

Величину мощности $W_{\text{соб}}$ найдем из условия

$$W_{\text{соб}} = W_{\text{раз}} + W_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{раз}}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости; $W_{\text{тр}}$ – то же сил контактного трения, действующих на поверхностях контакта заготовки и инструмента.

Мощность $W_{\text{раз}}$ определим согласно зависимости

$$W_{\text{раз}} = \sum k l_{rs} b v_{rs}, \quad (4)$$

где k – пластическая постоянная; l_{rs} – длина границ смежных блоков r, s (r, s – номера блоков в принятом поле скоростей; $r = 0-2, r = 4-6; s = 1-7; r \neq s$); b – ширина проекции границы контакта в направлении, перпендикулярном физической плоскости; v_{rs} – величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков r, s .

Мощность $W_{\text{тр}}$, необходимая для преодоления сил контактного трения, определяется из выражения

$$W_{\text{тр}} = \sum \tau_k l_{rs} b v_{rs}, \quad (5)$$

где τ_k – касательные напряжения, возникающие при скольжении блоков относительно друг друга.

Величина касательных напряжений τ_k определяется уравнением [8]

$$\tau_k = 2\mu k, \quad (6)$$

где μ – коэффициент трения на границе между блоками и инструментом ($0 \leq \mu \leq 0,577$) [2, 10].

Учитывая (4)–(6), выражение для определения мощности сил собственного сопротивления $W_{\text{соб}}$ запишется в виде

$$W_{\text{соб}} = (1 + 2\mu) \sum k l_{rs} b v_{rs}. \quad (7)$$

Согласно [8], скоростное пластическое течение частиц деформируемого материала через поверхности разрыва скорости сопровождается изменением их количества движения. Под действием импульса силы, вызванного изменением количества движения, на поверхностях разрыва скорости возникают динамические напряжения $(q_{\text{дин}})_{rs}$, величина которых может быть определена зависимостью [8]

$$(q_{\text{дин}})_{rs} = \rho (v_n)_{rs} v_{rs}, \quad (8)$$

где ρ – плотность деформируемой заготовки (для составной заготовки принимается наибольшее из двух значений); $(v_n)_{rs}$ – нормальная к поверхности разрыва компонента скорости.

Мощность $W_{\text{дин}}$, необходимая для преодоления динамических напряжений $(q_{\text{дин}})_{rs}$, находят следующим образом:

$$W_{\text{дин}} = \rho (v_n)_{rs} v_{rs}^2 l_{rs} b. \quad (9)$$

Силы инерции $P_{\text{ин}}$, возникающие при взаимодействии пуансона I с заготовкой III, определяются уравнением [10]

$$\bar{P}_{\text{ин}} = - \sum_{i=1}^7 m_i \bar{\omega}_i, \quad (10)$$

где m_i – масса блоков 1–7; $\bar{\omega}_i$ – вектор ускорения частиц металла в блоках 1–7.

Учитывая (10), а также наличие промежуточного бойка II, мощность $W_{\text{ин}}$ запишем в виде

$$W_{\text{ин}} = \sum_{i=1}^7 m_i \omega_i v_i + m_{\text{пб}} \omega_{\text{пб}} v_0, \quad (11)$$

где v_i – скорость движения частиц в жестких блоках 1–7; $m_{\text{пб}}$, $\omega_{\text{пб}}$ – масса и ускорение промежуточного бойка II.

Расчет слагаемых мощности внутренних сил по выражениям (3)–(11) производили с использованием полей скоростей и соответствующих им годографов скоростей и ускорений (рис. 2b–d, рис. 3a–c) для пластических областей 2, 4, 6. Для нахождения усилия $P_{\text{п}}$, воздействующего на пуансон, на каждой стадии процесса необходимо, используя геометрические размеры пуансона $2A, b$, коэффициенты вытяжки $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, параметры поля α, β, γ , вытянуть границы блоков l_{rs} , определить массы

блоков m_i и установить соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой заготовки ($v_{rs}, (v_n)_{rs}, v_i, \omega_i$) и блока 1 (v_{01}, ω_{01}) [2, 5].

Определив по годографам скоростей и ускорений кинематические параметры $v_{rs}, (v_n)_{rs}, v_i, \omega_i$ и используя параметры поля α, β, γ , с учетом преобразований получим зависимости для расчета усилий $P_{п,р}, P_{п1}, P_{п2}$, воспринимаемых пуансоном на соответствующих путях деформирования h_p, h_1, h_2 (рис. 2а).

Усилия $P_{п,р}, P_{п1}, P_{п2}$, воспринимаемые пуансоном на каждой стадии процесса выдавливания, зависят от сопротивления металла деформированию. Для начальной стадии – стадии разгона (рис. 3д, область «Р») – это сопротивление обусловлено пластическим течением металла в направлении, противоположном ходу движения пуансона, через пластические области, сосредоточенные в треугольных блоках 2. Для стадии торможения, состоящей из двух этапов (рис. 3д, области «Т₁», «Т₂»), сопротивление деформированию обусловлено пластическим течением металла в направлении, совпадающем с направлением движения пуансона,

через пластические области, сосредоточенные в треугольных блоках 4 и 6. Учитывая это обстоятельство, усилие $P_{п2}$ для второго этапа стадии торможения представим в виде суммарного сопротивления деформированию, вызванного одновременным пластическим течением металла через пластические области 4 и 6.

На основании сказанного выше усилие второго этапа на стадии торможения запишется

$$P_{п2} = P_{п1,h_2} + P_{п2,h_2}, \quad (12)$$

где $P_{п1,h_2}, P_{п2,h_2}$ – усилия, действующие на пуансон при одновременном прохождении металла через пластические области 4 и 6.

На основании второго закона Ньютона и, принимая во внимание уравнения (3)–(12) и уско-

рение пуансона $\omega_{п} = \frac{P_{п}}{M}$ ($P_{п}$ – усилие, действу-

ющее на пуансон при выдавливании плоской заготовки; M – масса пуансона), запишем выражения для определения усилий, действующих на пуансон I в процессе скоростного комбинированного выдавливания заготовки III на каждом этапе процесса:

$$P_{п,р} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_1(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{A} \right] + \rho v_0^2 F_2(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 2A^2 b \rho \left(F_3(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A \rho} \right)}; \quad (13)$$

$$P_{п1} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_4(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_5(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)}; \quad (14)$$

$$P_{п2} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_4(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_5(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)} + \frac{2AbM \left\{ k \left[F_7(\gamma, \lambda_3, \mu) + 2\mu \left(h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_8(\gamma, \lambda_2, \lambda_3) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_9(\gamma, \lambda_3) + h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right)}. \quad (15)$$

В выражениях (13)–(15) функционалы $F_1(\alpha, \lambda_1, \mu)$, $F_2(\alpha, \lambda_1)$, $F_3(\alpha, \lambda_1)$, $F_4(\beta, \lambda_2, \mu)$, $F_5(\beta, \lambda_2)$, $F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2)$, $F_7(\gamma, \lambda_3, \mu)$, $F_8(\gamma, \lambda_2, \lambda_3)$, $F_9(\gamma, \lambda_3)$ зависят от условий деформирования $\mu, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и параметров поля α, β, γ .

Функционалы $F_1(\alpha, \lambda_1, \mu)$, $F_4(\beta, \lambda_2, \mu)$, $F_7(\gamma, \lambda_3, \mu)$, входящие в (13)–(15), представляют собой квазистатическую часть усилий $P_{п.р}$, $P_{п1}$, $P_{п2}$, воспринимаемых пуансоном и обусловленных сопротивлением металла деформированию на поверхностях разрыва скорости и контактного трения в зависимости от степени внедрения пуансона в заготовку.

Функционалы $F_2(\alpha, \lambda_1)$, $F_5(\beta, \lambda_2)$, $F_8(\gamma, \lambda_2, \lambda_3)$ характеризуют возрастание динамического усилия, возникающего на поверхностях разрыва скоростей, что обусловлено изменением размеров поперечного сечения выдавливаемого реза.

Функционалы $F_3(\alpha, \lambda_1)$, $F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2)$, $F_9(\gamma, \lambda_3)$ отражают действие инерционных сил, вызываемых воздействием заготовки на пуансон, которые могут оказывать как отрицательное (для стадии разгона), так и положительное (для стадии торможения) влияние на величину усилия.

На основании принятых допущений (квазистатическая задача, псевдостационарное течение) определим оптимальные значения параметров поля α, β, γ , при которых мощности сил собственного сопротивления ($W_{\text{соб.р}}$, $W_{\text{соб.1}}$, $W_{\text{соб.2}}$) будут принимать минимальные значения. Для этого составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W_{\text{соб.р}}}{\partial \alpha} &= 0; \\ \frac{\partial W_{\text{соб.1}}}{\partial \beta} &= 0; \\ \frac{\partial W_{\text{соб.2}}}{\partial \gamma} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Решив систему уравнений (16), установили значения оптимальных углов α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} матричной полости при скоростном комбинированном выдавливании биметаллических доменных резцов:

$$\alpha_{\text{opt}} = \arccos \sqrt{\frac{2\lambda_1^2\mu + \lambda_1^2 - 2\lambda_1\mu - 2\lambda_1 + 1}{4\lambda_1^2\mu + 2\lambda_1^2 - 4\lambda_1\mu - \lambda_1 + 1}}; \quad (17)$$

$$\beta_{\text{opt}} = \arccos \sqrt{\frac{2\lambda_2^2\mu + \lambda_2^2 - 2\lambda_2\mu - 2\lambda_2 + 1}{4\lambda_2^2\mu + 2\lambda_2^2 - 4\lambda_2\mu - \lambda_2 + 1}}; \quad (18)$$

$$\gamma_{\text{opt}} = \arccos \sqrt{\frac{2\lambda_3^2\mu + \lambda_3^2 - 2\lambda_3\mu - 2\lambda_3 + 1}{4\lambda_3^2\mu + 2\lambda_3^2 - 4\lambda_3\mu - \lambda_3 + 1}}; \quad (19)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициенты вытяжки; μ – коэффициент контактного трения [3, 11–13].

В результате преобразований выражений (13)–(15) и с учетом (17)–(19) получены формулы для расчета минимальных верхнеграничных усилий $P_{п.р,\text{min}}$, $P_{п1,\text{min}}$, $P_{п2,\text{min}}$, воспринимаемых пуансоном на каждом этапе процесса:

$$P_{п.р,\text{min}} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{1,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{A} \right] + \rho v_0^2 F_{2,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 2A^2 b \rho \left(F_{3,\text{opt}}(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{\text{п6}} \rho_{\text{п6}}}{A \rho} \right)}; \quad (20)$$

$$P_{п1,\text{min}} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{4,\text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{\text{зар}'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,\text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_{6,\text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{\text{зар}'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{\text{п6}} \rho_{\text{п6}}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)}; \quad (21)$$

$$P_{п2,\text{min}} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{4,\text{opt}}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{\text{зар}'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,\text{opt}}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_{6,\text{opt}}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{\text{зар}'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{\text{п6}} \rho_{\text{п6}}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)} + \quad (22)$$

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

Анализ показывает, что первые части выражений (20)–(22) в числителе отражают действие внешних и внутренних сил сопротивления на поверхностях разрыва скоростей и контактного трения (квазистатическая задача), зависящих от пройденного пуансоном пути деформирования. Вторая часть (20)–(22) в числителе учитывает динамическое увеличение усилия на пуансоне за счет изменения поперечного сечения деформируемой заготовки. Для стадии разгона выражение в знаменателе отражает отрицательное действие инерционных сил, направленных против хода движения пуансона, что приводит к возрастанию этого усилия. Для стадии торможения выражение в знаменателе отражает положительное действие инерционных сил, ведущее к снижению усилия при выдавливании биметаллических резцов.

Поскольку принцип решения поставленной задачи определен из условия минимальной мощности внутренних сил, установленной с использованием оптимальных параметров поля α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} , зависимости (20)–(22) являются вполне достоверными и позволяют получить довольно точное отражение реальных условий скоростного комбинированного выдавливания дорожных резцов. Полученные уравнения могут использоваться для расчетов при разработке промышленного процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических резцов.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель расчета энергозатрат процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических плоскоступенчатых резцов. Для повышения точности результатов расчета применен метод верхней оценки.

2. Полученные уравнения могут быть рекомендованы для расчета минимального усилия, действующего на пуансон в процессе выдавли-

вания биметаллических плоскоступенчатых дорожных резцов, а также быть основой при разработке промышленной технологии скоростного комбинированного горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. Минск: Технопринт, 2002. 327 с.
2. Здор, Г. Н. Технология высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
3. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2011. 198 с.
4. Капранов, В. Н. Особенности высокоскоростного горячего выдавливания формовочного инструмента повышенной точности / В. И. Капранов, В. Я. Осинных // Повышение качества и эффективности изготовления технологической оснастки методами пластического деформирования: сб. тезисов Всесоюз. науч.-техн. конф. Таллинн, 1977. С. 125–129.
5. Качанов, И. В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий / И. В. Качанов, В. В. Власов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018. Т. 63, № 1. С. 43–52.
6. 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. 15, № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-3-8>.
7. Тутышкин, Н. Д. Соотношение на разрывах при динамической плоской деформации / Н. Д. Тутышкин // Технология машиностроения. Тула, 1972. Вып. 29. С. 56–66.
8. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
9. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
10. Сегал, В. М. Технологические задачи теории пластичности / В. М. Сегал. Минск: Наука и техника, 1977. 254 с.
11. Ренне, И. П. Учет сил инерции при плоском выдавливании полосы через клиновые матрицы / И. П. Ренне, Н. Д. Тутышкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1972. № 6. С. 144–147.

12. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. М.: Наука, 1988. 654 с.
13. Качанов, И. В. Определение усилия в процессе ударного выдавливания плоских стержневых изделий / И. В. Качанов, О. М. Дьяконов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. № 1. С. 77–81.

Поступила 11.03.2021

Подписана в печать 25.05.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

- Kachanov I. V. (2002) *High-Speed Hot Extrusion of Rod Products*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 327 (in Russian).
- Zdor G. N., Isaevich L. A., Kachanov I. V. (2010) *Technology of High-Speed Material Deformation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 456 (in Russian).
- Kachanov I. V., Zdor G. N., Isaevich L. A., Sharii V. N. (2011) *High-Speed Hot Extrusion of Core Products with Butt End Cladding*. Minsk, Belarusian National Technical University. 198 (in Russian).
- Kapranov V. N., Osinnykh V. Ya. (1977) Specific Features of Enhanced Accuracy Moulder Tool for High-Speed Hot Extrusion. *Povyshenie Kachestva i Effektivnosti Izgotovleniia Tekhnologicheskoi Osnastki Metodami Plasticheskogo Deformirovaniia: Sb. Tez. Vsesoiuz. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Improvement of Quality and Efficiency in Manufacturing of Machine-Tool Attachments while Using Deformation Methods: Book of Abstracts of All-Union Scientific Research Conference]. Tallinn, 125–129 (in Russian).
- Kachanov I. V., Vlasov V. V. (2018) Loading Regime Optimization for High-Speed Impact Extrusion of Bimetallic Flat-Step Rod Products. *Vesti Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (1), 77–81 (in Russian).
- Kachanov I. V., Shary V. N., Vlasov V. V. (2016) Resource-Saving Technology for High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Rod Parts. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (1), 3–8. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-3-8> (in Russian).
- Tutyshkin N. D. (1972) Ratio at Discontinuities under Dynamic Planar Deformation. *Tekhnologiya Mashinostroeniya* [Technology of Mechanical Engineering]. Tula, (29), 56–66 (in Russian).
- Tomlenov A. D. (1972) *Theory of Plastic Deformation of Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ. 408 (in Russian).
- Storozhev M. V., Popov E. A. (1977) *Theory of Metal Working with Pressure*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 423 (in Russian).
- Segal V. M. (1977) *Technological Problems of the Plasticity Theory*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 254 (in Russian).
- Renne I. P., Tutyshkin N. D. (1972) The Calculation of Inertia Forces in the Flat Extrusion of a Strip Through Wedge Matrices. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], (6), 144–147 (in Russian).
- Rabotnov Yu. N. (1988) *Mechanics of a Deformable Solid Body*. Moscow, Nauka Publ. 654 (in Russian).
- Kachanov I. V., Dyakonov O. M. (2002) Determination of the Force in the Process of Impact Extrusion of Flat Rod Products. *Vesti Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (1), 77–81 (in Russian).

Received: 11.03.2021

Accepted: 25.05.2021

Published online: 30.07.2021