

Выводы. Проведенное исследование процесса прокатки непрерывнолитой сортовой заготовки с дефектом типа поры показало, что при прокатке такой заготовки в прямоугольных калибрах стенки калибра оказывают влияние на характер деформации поры. Анализ высотной и поперечной деформации поры позволит в дальнейшем рекомендовать режимы прокатки с целью максимального устранения дефекта "газовый пузырь".

Список литературы: 1. Сычков А. Б. Трансформация дефектов непрерывнолитой заготовки в поверхностные дефекты проката / А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. В. Перчаткин // *Металлург.* – М., 2006. – № 2. – С. 60-64. 2. М. А. Chaaban and J. M. Alexander, A Study of the Closure of Cavities in Swing Forging', Proc. 17th Int. Mach. Tool Des. Res. Conf. Birmingham, Sept. 1976, Macmillan, London, 1977, pp. 633-645. 3. Wang, A., Thomson, P. F., and Hodgson, P. D. A study of pore closure and welding in hot rolling process. *J. Mater. Process. Technol.* 60. – 1996. – P. 95–102. 4. Логинов, Ю. Н. Поведение при прокатке дефекта типа поры, примыкающей к поверхности полосы / Ю. Н. Логинов, К. В. Еремеева // *Производство проката.* – 2008. – № 10. – С. 2-6. 5. Логинов, Ю. Н. Прокатка заготовки с одиночно расположенной в объеме порой / Ю.Н. Логинов, К. В. Еремеева // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2009. – № 11. – С. 33-37.

Надійшла до редколегії 25.10.2012

УДК 621.771.25

Исследование процесса прокатки непрерывнолитой сортовой заготовки с дефектом типа поры/ Склад В. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – №47(953). – С. 181-184. – Бібліогр.: 5 назв

Представлено результати фізичного моделювання процесу прокатки безперервнолітої сортової заготовки з дефектом типу пори в прямокутних калібрах. Показано зміну висотної і поздовжньої деформації пори на бічній поверхні в залежності від величини відносного обтиснення, зроблено висновок про вплив на процес деформації пори стінок калібру.

Ключові слова: безперервноліта заготовка, газовий пухир, пора, фізичне моделювання, прямокутний калібр.

The results of the physical modeling of rolling continuous casting billet with a defect such as pores in rectangular calibers. Shows the change in elevation and longitudinal strain of the pores on the side as a function of relative reduction, the conclusion about the impact on the process of deformation of the walls then caliber.

Keywords: continuous casting, gas bubbles, time, physical modeling, caliber.

УДК 621.983

Е. Н. СОСЕНУШКИН, докт. техн. наук, проф., МГТУ «СТАНКИН», Москва
И. Е. СМОЛОВИЧ, аспирант, МГТУ «СТАНКИН», Москва
Е. А. ЯНОВСКАЯ, доц. МГТУ «СТАНКИН», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕРАВНОМЕРНОЙ РАЗДАЧИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

В статье приводится исследование кинематических параметров и напряженно-деформированного состояния цилиндрической трубной заготовки при неравномерной раздаче на конус. Выведено рекуррентное соотношение, определяющее положение краевой части трубной заготовки на конической поверхности пуансона при нестационарном процессе деформирования.

Ключевые слова: неравномерная раздача; условие пластичности, напряженно-деформированное состояние; положение фланца на конической поверхности.

Введение. Раздача коническим пуансоном происходит при плоском напряженном состоянии металла: сжатие в меридиональном ($+\sigma_r$) и растяжении в окружном направлении ($+\sigma_\theta$). Окружное напряжение связано с меридиональным условием пластичности [1]:

© Е. Н. Сосенушкин, И. Е. Смолевич, Е. А. Яновская, 2012

$$\sigma_\rho + \sigma_\theta = \sigma_s; \quad (1)$$

Распределение напряжений по очагу деформации устанавливается из совместного решения условия пластичности и дифференциального уравнения равновесия, которое с учётом трения запишется [2]:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \sigma_\rho \cdot \mu \cdot \operatorname{ctg}\varphi - \sigma_s \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg}\varphi) = 0; \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения по Кулону; φ – угол конусности пуансона; ρ – текущий радиус детали.

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{\sigma_\rho}{\rho} \cdot \mu \cdot \operatorname{ctg}\varphi - \frac{\sigma_s}{\rho} \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg}\varphi) = 0;$$

Производим интегрирование с помощью метода вариаций [3]:

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right) + C \cdot \rho^{\frac{\mu}{\operatorname{tg}\varphi}};$$

Используя граничные условия $\sigma_\rho=0$, при $\rho=r_0$, находим постоянную интегрирования:

$$C \cdot r_0^{\frac{\mu}{\operatorname{tg}\varphi}} = \sigma_s \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right);$$

$$C = \sigma_s \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right) \cdot r_0^{-\frac{\mu}{\operatorname{tg}\varphi}};$$

Найдя решение дифференциального уравнения равновесия, получим меридиональные напряжения в известной форме [1]:

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right) + \sigma_s \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right) \left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{\left(\frac{\mu}{\operatorname{tg}\varphi} \right)};$$

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right) \left(\left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{\left(\frac{\mu}{\operatorname{tg}\varphi} \right)} - 1 \right); \quad (3)$$

Выразим из условия пластичности (1) окружные напряжения σ_θ :

$$\sigma_\theta = \sigma_s - \sigma_\rho.$$

Подставим найденное значение меридиональных напряжений (3):

$$\sigma_\theta = \sigma_s - \sigma_s \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right) \left(\left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{\left(\frac{\mu}{\operatorname{tg}\varphi} \right)} - 1 \right);$$

Соотношение для определения окружных напряжений:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left(1 - \left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\mu} + 1 \right) \left(\left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{\left(\frac{\mu}{\operatorname{tg}\varphi} \right)} - 1 \right) \right); \quad (4)$$

Эксперименты по неравномерной раздаче проводились с использованием трубных заготовок из сплавов Д16 и М1 [4, 5]. Геометрические параметры заготовки: наружный диаметр трубы 20 мм, толщина стенки 1,5 мм, при этом относительная толщина $s/d=0,0625$. Угол конусности пуансона $\varphi=37^\circ$, угол наклона осей $\alpha=15^\circ$. Коэффициент трения по закону Кулона принимается в диапазоне $0,01 \leq \mu \leq 0,15$.

Расчет по приведенным выше соотношениям позволил проанализировать величины и характер изменения действующих напряжений при деформации трубных заготовок из меди М1.

Механические свойства исследуемых материалов приводятся в таблице.

Таблица. Механические характеристики сплавов Д16 и М1 после разупрочняющей термической обработки [3]:

Материал	М1	Д16
Предел прочности, МПа	240	210
Предел текучести, МПа	38	120
Относительное удлинение, %	71,4	14
Плотность, г/см ³	8,95	2,64

На рис. 1 представлено изменение меридионального σ_ρ и окружного σ_θ напряжений в зависимости от технологических факторов. Наибольший уровень напряжений отмечен в окружном направлении, причем напряжения являются растягивающими.

Обратимся к уравнениям связи напряжений и деформаций. В принятых обозначениях это уравнение для схем напряженно-деформированного состояния представляется в виде [4, 5, 6, 7, 8]:

$$\frac{\sigma_\theta - \sigma_\rho}{e_\theta - e_\rho} = \frac{\sigma_\rho - \sigma_n}{e_\rho - e_n} = \frac{\sigma_n - \sigma_\theta}{e_n - e_\theta}, \quad (5)$$

где e_ρ, e_θ, e_n – логарифмические деформации соответственно в меридиональном, окружном и радиальном направлении.

С учётом условия несжимаемости:

$$e_\rho + e_n + e_\theta = 0; \quad (6)$$

для плоских схем напряженного состояния при $\sigma_n=0$ имеем:

$$\frac{\sigma_\theta}{e_n - e_\theta} = \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{2e_\theta + e_n} = \frac{\sigma_\rho}{2e_n + e_\theta}, \quad (7)$$

Для задачи следует использовать два правых соотношения пропорции (7), решив которое относительно деформаций в радиальном направлении, получим:

$$\begin{aligned} 2(\sigma_\rho - \sigma_\theta) \cdot e_n + (\sigma_\rho - \sigma_\theta) \cdot e_\theta &= 2\sigma_\rho \cdot e_\theta + \sigma_\rho \cdot e_n; \\ (2\sigma_\rho - 2\sigma_\theta - \sigma_\rho) \cdot e_n &= (2\sigma_\rho - \sigma_\rho + \sigma_\theta) \cdot e_\theta; \\ (\sigma_\rho - 2\sigma_\theta) \cdot e_n &= (\sigma_\rho + \sigma_\theta) \cdot e_\theta; \\ e_n &= \frac{(\sigma_\rho + \sigma_\theta)}{(\sigma_\rho - 2\sigma_\theta)} \cdot e_\theta; \end{aligned} \quad (8)$$

Используя уравнение пластичности (1), логарифмические деформации в радиальном направлении будут иметь вид:

$$e_n = \frac{\sigma_s}{(\sigma_\rho - 2\sigma_\theta)} \cdot e_\theta. \quad (9)$$

Подставим в (9) полученные соотношения для напряжений с учетом окружной деформации $e_\theta = \ln \frac{\rho}{r_0}$:

$$e_n = \frac{1}{3 \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\mu} + 1 \right) \left(\left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{\left(\frac{\mu}{\operatorname{tg} \varphi} \right)} - 1 \right) - 2} \cdot \ln \frac{\rho}{r_0}; \quad (10)$$

Поскольку при неравномерной раздаче используется конический пуансон, ось которого расположена под заданным углом по отношению к оси исходной трубной заготовки, то все соотношения для конической поверхности заготовки остаются справедливыми и в этом случае.

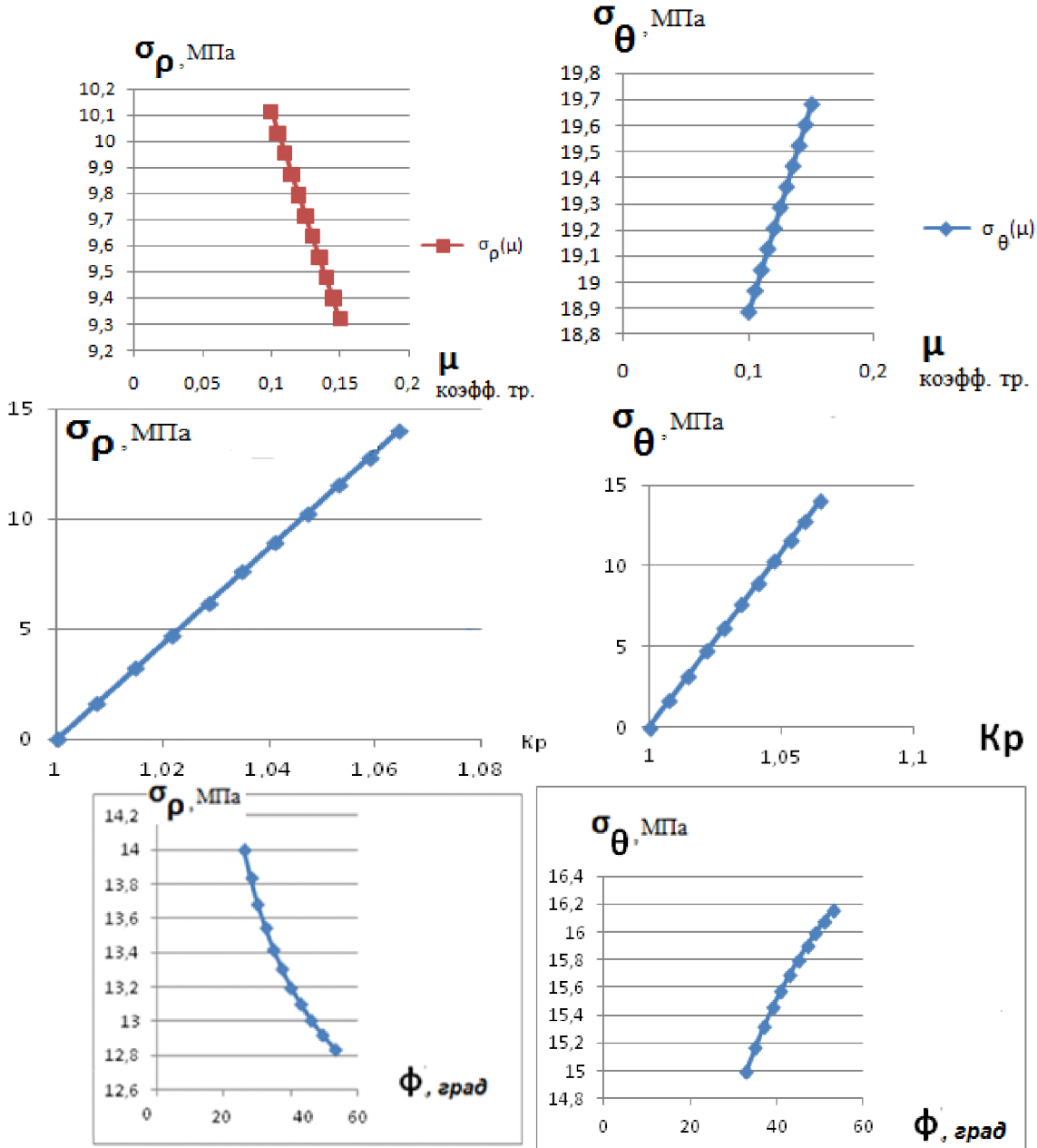


Рис. 1 – Изменение меридиональных σ_ρ и окружных напряжений σ_θ при неравномерной раздаче от технологических факторов.

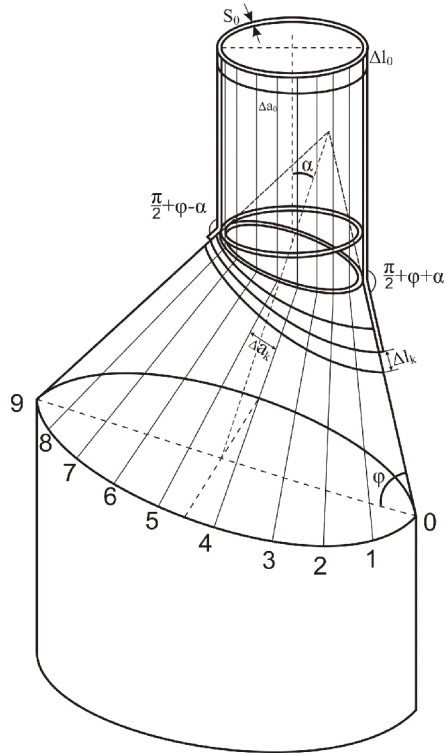


Рис. 2 – Схема неравномерной раздачи.

В соответствии со схемой неравномерной раздачи (рис. 2) цилиндрическая трубная заготовка постепенно переходит на коническую поверхность, причём размеры деформируемой части будут разными из-за изменяющегося угла пересечения цилиндрической части с конической поверхностью $(\varphi - \alpha) \leq \gamma \leq (\varphi + \alpha)$.

Нанесём равномерную сетку на поверхность трубной заготовки и рассмотрим течение металла при деформации данной полосы.

Схема перехода элемента полосы на коническую поверхность приведена на рис. 3.

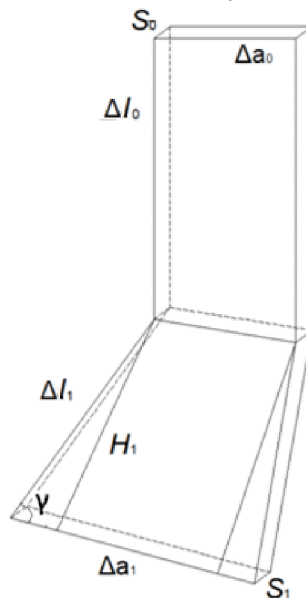


Рис. 3 – Геометрические параметры элемента полосы на конической поверхности:
 s_0, s_1 – толщина заготовки и деформированной полосы; L_0, L_1 – исходная и после деформации высота (длина) полосы; $\Delta a_0, \Delta a_1$ – исходная и после деформации ширина полосы.

Смещенный объём для одной полосы:

$$V_{\text{см}} = s_0 \cdot l_0 \Delta a_0; \quad (11)$$

Объём полосы на конусе:

$$dV_{\text{см}} = s \cdot dl_{\text{к}} \cdot da;$$

Перемещение выделенной полосы l_0 связано с положением краевой части полосы на конической поверхности $l_{\text{к}}$ условием равенства смещенных объемов [9]:

$$\begin{aligned} \int_0^{l_{\text{к}}} \Delta a_{\text{к}} \cdot s_{\text{к}} \cdot dl_{\text{к}} &= l_0 \cdot \Delta a_0 \cdot s_0; \\ \Delta a_{\text{к}} \cdot s_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}} &= l_0 \cdot \Delta a_0 \cdot s_0; \\ l_{\text{к}} &= \frac{e_0 \cdot \Delta a_0}{e_{\text{к}} \cdot \Delta a} \cdot l_0; \end{aligned}$$

длина полосы на коническом участке пуансона имеет вид:

$$l_{\text{к}} = \frac{s_0 \cdot \Delta a_0}{s_{\text{к}} \cdot \Delta a_{\text{к}}} \cdot l_0; \quad (12)$$

Оценим деформированное состояние трубной заготовки:

$$e_{\theta} = \frac{\Delta \rho}{\rho}; \quad e_n = e_{\rho} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho};$$

Конечные деформации задаются соотношениями:

$$\begin{aligned} e_{\theta} = \ln \frac{\rho}{\rho_0}; \quad e_n = -\frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{\rho_0}; \quad e_n = \ln \frac{s}{s_0}; \quad (13) \\ \ln \frac{s}{s_0} = -\frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{\rho_0} \rightarrow \frac{s}{s_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{s}{s_0} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \end{aligned}$$

Изменение толщины на конусной части пуансона [7, 10]:

$$s = s_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = s_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{K_p}}, \quad (14)$$

где K_p – коэффициент раздачи.

На рис. 4 представлены значения толщины трубы в зависимости от коэффициента раздачи.

Объём полосы на конической поверхности с бесконечно малыми размерами оценим как объём призмы:

$$V_{\text{призмы}} = \frac{\Delta a_0 + \Delta a_1}{2} \cdot H_1 \cdot s_1; \quad (15)$$

H_1 – высота; $\Delta a_0, \Delta a_1$ – основания призмы.

Геометрические параметры призмы (см. рис.3):

$$\begin{aligned} AP &= \frac{\Delta a_1 - \Delta a_0}{2}; \\ L_1 &= \frac{\Delta a_1 - \Delta a_0}{2 \cos \gamma}; \end{aligned}$$

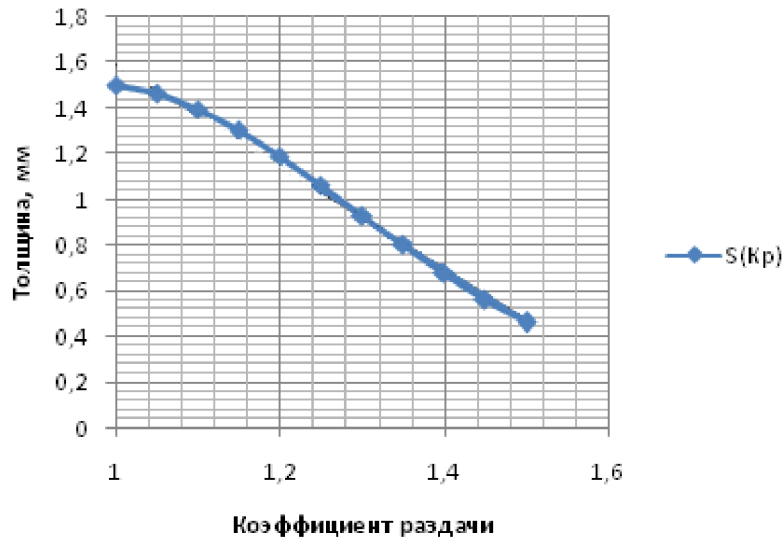


Рис. 4 – Оценка изменения толщины трубы для различных коэффициентов раздачи.

$$H_1 = \frac{\Delta a_1 - \Delta a_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma;$$

Подставим найденные параметры в (15):

$$V_{\text{призмы}} = \frac{\Delta a_0 + \Delta a_1}{2} \cdot \frac{\Delta a_1 - \Delta a_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot s_1;$$

и решим относительно Δa_1 :

$$\frac{\Delta a_1^2 - \Delta a_0^2}{4} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot s_1 = \Delta a_0 \cdot s_0 \cdot l_0;$$

$$\Delta a_1^2 - \Delta a_0^2 = \frac{4 \cdot \Delta a_0 \cdot l_0 \cdot s_0}{\operatorname{tg} \gamma \cdot s};$$

с учетом (14):

$$\Delta a_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \Delta a_0 \cdot l_0 \cdot \sqrt{K_p}}{\sin(\alpha - \varphi)} + \Delta a_0^2}; \quad (16)$$

Длина образующей элемента выделенной полосы на конической поверхности:

$$L_1 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4 \cdot \Delta a_{k-1} \cdot l_{k-1} \cdot \sqrt{K_p}}{\operatorname{tg} \gamma} + \Delta a_{k-1}^2 - \Delta a_{k-1}} \right) \frac{1}{\cos \gamma}; \quad (17)$$

На каждом последующем шаге штамповки длина образующей выразится рекуррентным соотношением:

$$L_{ki} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4 \cdot \Delta a_{k-1} \cdot l_{k-1} \cdot \sqrt{K_p}}{\operatorname{tg} \gamma} + \Delta a_{k-1}^2 - \Delta a_{k-1}} \right) \frac{1}{\cos \gamma}; \quad (18)$$

где k_i – номер участка i полосы на коническом участке трубной заготовки в k -ряду;

$$\gamma = (\varphi - \alpha + i \cdot \Delta \alpha); \quad 0 \leq i \cdot \Delta \alpha \leq 2\alpha; \quad i = 0, \dots, n;$$

n – количество полос.

Положение краевой части трубной заготовки на конической поверхности пуансона можно оценить по графику, представленному на рис. 5.

Разбив переднюю (видимую) часть конической поверхности на 10 полос (рис. 1), установили положение краевой части трубной заготовки после нескольких шагов штамповки.

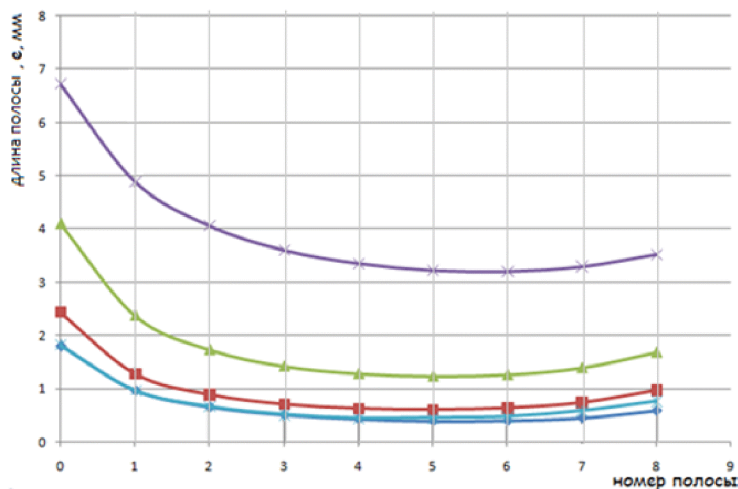


Рис. 5 – Характер изменения длин образующей элемента полосы, расположенного на коническом участке пуансона

Список литературы. 1. *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977.- 423с. 2. Теорияковки и штамповки. Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов. Под общей ред. Унксова Е.П., Овчинникова А.Г.- М.: Машиностроение, 1992.-720с. 3. Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.Н., Третьякова Е.И., Сосенушкин А.Е. Штамповка сферических и конических деталей из трубных заготовок.// Заготовительные производства в машиностроении. 2010.-№11- С. 18-21. 4. Сосенушкин Е.Н., Климов В.В., Яновская Е.А., Кутышкина Е.А. Экспериментальные исследования формоизменения стальных труб. /Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением.-2010.-№6.-С.39-43. 5. Смолевич И.Е., Сосенушкин Е.Н. Технологический процесс получения наклонного фланца методом неравномерной раздачи./ Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств. – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2010. – С.191-195. 6. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформациям.- М.-Л.: Машгиз, 1999.-248с. 7. Попов О.В. Изготовление цельноштампованных тонкостенных деталей переменного сечения.- М.: Машиностроение, 1974.-120с. 8. Третьякова Е.И, Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А. Определение полей напряжений при пластическом деформировании элементов оболочек./ Сб. научн. трудов Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА, 2010.-№1(22).-С.49-54. 9. Непершин Р.И. Проектирование технологических процессов в машиностроении. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2011. – 106 с. 10. Артеc А.Э., Сосенушкин Е.Н., Третьюхин В.В., Махдиян А. Групповые технологические процессы штамповки трубных переходов в мелкосерийном и серийном производстве. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением.-№7. – 2007. – С. 18-24.

Надійшла до редколегії 21.10.2012

УДК 621.983

Исследование процесса неравномерной раздачи трубных заготовок/ Сосенушкин Е. Н., Смолевич И. Е., Яновская Е. А. / / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 184-192. – Бібліогр.: 10 назв.

У статті наводиться дослідження кінематичних параметрів та напружено-деформованого стану циліндричної трубної заготовки при нерівномірному роздачі на конус. Виведено рекурентне співвідношення, що визначає положення крайової частини трубної заготовки на конічній поверхні пуансона при нестационарному процесі деформування.

Ключові слова: нерівномірна роздача; умова пластичності, напружено-деформований стан; положення фланця на конічній поверхні.

In article the research of the kinematic parameters and the stress-strain state of cylindrical tube workpieces by irregular distribution on the cone are considered. We derived a recurrence relation which determines the position of the marginal part of tube workpieces on the conical surface of the punch at unsteady deformation process.

Keywords: irregular distribution, condition of plasticity, the stress-strain state, the position of the flange on the conical surface.

УДК 669.1.013.5:621.671

Д. В. СТАЛИНСКИЙ, докт. техн. наук, проф., ген. директор, ГП «УкрНТЦ
«Энергосталь», Харьков

А. С. РУДЮК, канд. техн. наук, зам. ген. директора, ГП «УкрНТЦ
«Энергосталь», Харьков

В. С. МЕДВЕДЕВ, докт. техн. наук, гл. науч. сотр., ГП «УкрНТЦ
«Энергосталь», Харьков

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ И РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОКАТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Рассмотрены вопросы ресурсо- и энергосбережения при создании металлургического микрозавода по производству малотоннажных профилей с объемом производства до 200 тыс. т в год. Определены наиболее перспективные технологии, включающие выплавку и разливку стали, прокатку малотоннажных профилей из непрерывно-литых заготовок, совмещение МНЛЗ и прокатного стана с обеспечением горячей посадки заготовок в нагревательные устройства, гибкие безынерционные способы индукционного нагрева металла. Представлены концепции литейно-прокатного модуля для производства горячекатаного листа по тонкослябовой технологии, микрозаводов небольшой мощности для производства из металлолома сортового проката широкого сортамента, производства длинномерных железнодорожных рельсов термоупрочненных с прокатного нагрева.

Ключевые слова: ресурсо- и энергосбережение, микрозавод, выплавка и разливка стали, нагрев заготовок, прокатка.

Введение. Развитие горно-металлургического комплекса Украины, России и других стран СНГ неразрывно связано с деятельностью ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» (г. Харьков), созданного на базе научно-исследовательского и проектного института «Энергосталь», конструкторско-технологического института «Металлургмаш», а также научно-исследовательского института «УкрНИИМет» и проектного института «Гипросталь» в 2001 г.

Сегодня ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» является одной из ведущих научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций СНГ в области металлургических технологий, проектирования предприятий, производственных объектов и оборудования для горно-металлургического комплекса, охраны окружающей природной среды, энергосбережения, переработки вторичных энергетических и сырьевых ресурсов.

Центр на протяжении многих лет выполняет функции головной организации в области производства сортового проката, в т.ч. профилей общего назначения, специальных фасонных профилей, транспортного металла, гнутых профилей и пр. В настоящее время ведется активная работа по созданию новых и реконструкции действующих прокатных производств – в проекты закладываются прогрессивные ресурсо- и энергосберегающие технологические решения, которые обеспечивают высокий уровень технологии, качество и конкурентоспособность готовой продукции [1–6].