

УДК 621.771

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.05>

Шифрін Є.І., Квітка Н. Ю.

## Методика визначення параметрів осередку деформації при поздовжній прокатці труб в калібрах

Shifrin Y., Kvitka N.

## Methods of determining the parameters of the deformation zone in case of the longitudinal rolling of pipes in calibers

До наступного часу при визначенні параметрів осередку деформації під час прокатки труб в калібрах боковою течією металу в площині, що є перпендикулярною осі прокатки, нехтують. Це призводить до появи помилки при визначенні розмірів готових труб, довжини осередку деформації, площини контакту металу з валками, відносної деформації та інших параметрів формозміни.

**Мета.** Врахувати течу металу в площині, що є перпендикулярною осі прокатки і, завдяки цьому, уточнити визначення геометричних параметрів прокатки.

**Методика.** При визначенні параметрів контакту металу з валком прийняли, що, через бокову течу металу, діаметр заготовки в площині випуску змінюється від початкової величини (на вході в осередок деформації) до величини, що дорівнює ширині калібру (на виході з осередку деформації).

**Результати.** Розраховано параметри осередку деформації при прокатці циліндричних та овальних заготовок в овальних двошалькових та тришалькових калібрах. Розрахункові дані якісно відповідають характерним особливостям реального процесу прокатки. Тобто, відповідно розрахунковим і експериментальним даним:

при прокатці циліндричних заготовок в двошалькових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації має характерну форму так званого сідла;

при прокатці овальних заготовок в двошалькових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації має характерну форму так званого подвійного сідла;

при прокатці циліндричних заготовок в тришалькових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації на значній частині периметра калібру має форму, близьку до прямої лінії;

при прокатці овальних заготовок в тришалькових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації має форму, близьку до параболі.

При цьому усунена існуюча в раніше використовуваних методиках похибка, обумовлена тим, що максимальний розрахунковий радіус труби був менше ширини калібру, в якому здійснювалася прокатка.

**Наукова новизна.** Вперше розроблено аналітичну методику визначення параметрів осередку деформації при прокатці труб в калібрах, при використанні якої виконується обумовлене фізичними особливостями процесу формозміни умова рівності максимального розрахункового радіуса труби і ширини калібру, в якому здійснювалася прокатка.

**Практична цінність.** Розроблена методика використана при розрахунку силових параметрів деформації в станах поздовжньої прокатки трубокатних агрегатів "30-102", "350", "140" і "80". Ці дані були використані при розробці таблиць прокатки і проектуванні нового обладнання.

**Ключові слова:** труби, калібр, поздовжня прокатка, осередок деформації, геометричні параметри

To date, when determining the parameters of the deformation zone during pipe rolling in calibers, the lateral metal flow in a plane perpendicular to the rolling axis is neglected. This leads to an error in determining the dimensions of the finished pipes, the length of the deformation zone, the area of contact of the metal with the rolls, the relative deformation, and other parameters of the deformation.

**Purpose:** To account for the flow of metal in a plane perpendicular to the axis of rolling and, thereby, clarify the definition of geometric parameters of rolling.

**Methodology:** When determining the parameters of the contact of the metal with the roll, it was assumed that, due to the lateral flow of the metal, the diameter of the workpiece in the plane of the outlets changes from the initial value (at the entrance to the deformation zone) to a value equal to the width of the caliber (at the exit from the deformation zone).

**Findings.** The parameters of the deformation zone during the deformation of cylindrical and ovalized workpieces in oval two-roll and three-roll calibers are calculated. The calculated data qualitatively correspond to the characteristic features of the real rolling process. Namely, according to the calculated and experimental data:

when rolling cylindrical workpieces in two-roll calibers, the horizontal projection of the rear boundary of the deformation zone has the characteristic shape of the so-called "saddle";

when rolling oval workpieces in two-roll calibers, the horizontal projection of the rear boundary of the deformation zone has the characteristic shape of the so-called "double saddle";

when rolling cylindrical workpieces in three-roll calibers, the horizontal projection of the rear boundary of the deformation zone on a significant part of the perimeter of the caliber has a shape close to a straight line;

when rolling oval workpieces in three-roll calibers, the horizontal projection of the rear boundary of the deformation zone has a shape close to a parabola.

In this case, the error that occurred in the previously used methods, due to the fact that the maximum calculated radius of the pipe was smaller than the width of the caliber in which the rolling was carried out, was eliminated.

**Originality:** For the first time, an analytical technique has been developed for determining the parameters of the deformation zone during rolling of pipes in calibers, using which the condition of equality of the maximum calculated radius of the pipe and the width of the caliber in which the rolling was carried out due to the physical features of the forming process is fulfilled.

**Practical value:** The developed method was used in calculating the force parameters of the deformation in the longitudinal rolling mills of pipe rolling units "30-102", "350", "140" and "80". The data was used in the development of rolling tables and the design of new equipment.

**Keywords:** pipes, caliber, longitudinal rolling, deformation zone, geometric parameters.

**Вступ.** В існуючих методиках розрахунку параметрів контактної поверхні металу з валками при поздовжній прокатці труб в калібрах виходять з того, що заготовка до деформації має циліндричну форму утворюючої зовнішньої поверхні [1, с. 90-97; 2, с. 49-56 та ін.]. При такому припущенні ці методики відповідають тільки умовам прокатки в першому проході і, в разі аналізу умов багатопрхідної прокатки, не використовуються. В разі прокатки заготовки в другому та подальших проходах проймають умову, відповідно до котрої форма утворюючої зовнішньої поверхні заготовки до деформації в  $i$ -тому проході відповідає формі заготовки після формозміни в попереднім проході з урахуванням її кантування [3, 4 та ін.]. В виробничих умовах для запобігання утворення дефектів на зовнішній поверхні труби дотримуються умови, згідно з якою (рис. 1)

$$R_{0b} \leq b, \tag{1.1}$$

де  $R_{0b} = R_{0\theta}(\theta = \theta_m)$  – радіус заготовки до обтиснення в валках в напрямку випусків калібру;  $R_{0\theta}(\theta)$  – закон зміни радіусу утворюючої зовнішньої поверхні заготовки до деформації;  $\theta$  – ко-

ординатний кут в циліндричній системі координат, де  $\theta = 0$  в вершині калібру;  $\theta_m = \frac{\pi}{n}$ ;  $n$  – кількість валків, що утворюють калібр;  $b$  – ширина калібру.

В усіх вищезгаданих методиках боковою течею металу в площині, що є перпендикулярною осі прокатки, нехтують. Тому, в разі, коли виконується умова (1), розрахункові значення максимального радіусу прокатаної труби  $R_{t \max}$  є меншими за ширину калібру  $b$ , в якому здійснювалася прокатка. Це категорично не корелюється з експериментальним даним, у відповідності до яких в реальних умовах маємо [5, 6 та ін.]

$$R_{t \max} \geq b. \tag{1.2}$$

Невиконання умови (1.2) в разі використання існуючих методик [1-4, 7] обумовлює похибку в визначенні розмірів готових труб, довжини осередку деформації, площини контакту металу з валками, відносної деформації та інших параметрів формозміни.

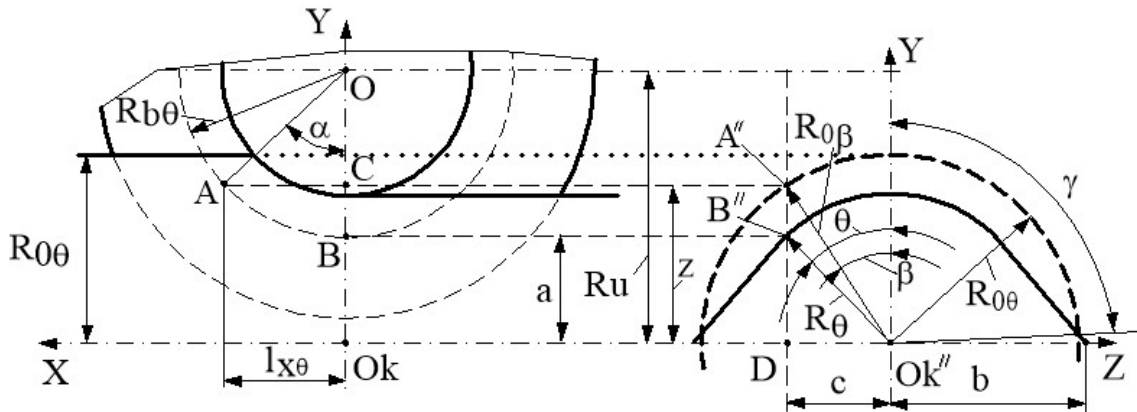


Рис. 1. Схема до визначення величини  $l_{x\theta}$

**Мета дослідження.** Врахувати течу металу в площині, що є перпендикулярна осі прокатки і, завдяки цьому, уточнити визначення геометричних та деформаційних параметрів прокатки. Для досягнення поставленої мети розробимо математичну модель формування геометричних параметрів осередку деформації при поздовжній прокатці труб в калібрах з урахуванням бокової течі металу в площині, що є перпендикулярна осі прокатки.

Загальні рівняння. Контактна поверхня металу з валком характеризується довжиною дуги контакту  $AB$  і її проекцією  $l_{x\theta}$  на горизонтальну площину  $XO_kZ$  (рис. 1), а також площею контакту

$F_k$  і її проекцією  $F_{kx}$  на горизонтальну площину  $XO_kZ$ .

Очевидно, що, якщо сплющенням валків можна знехтувати, то дотик труби з валком припиняється в площині  $YO_kZ$ . Якщо прийняти, що координата точки  $O_k$  дорівнює нулю, то рівняння передньої межі осередку деформації матиме вигляд  $x = 0$ .

У загальному випадку профіль, який утворює зовнішню поверхню заготовки описується рівнянням  $R_{0\theta} = R_{0\theta}(\theta)$ . Профіль калібру на виході з осередку деформації (при  $x = 0$ ) описується рівнянням  $R_{\theta} = R_{\theta}(\theta)$ . Радіус валка  $R_{b\theta}$  можна

визначити з рівняння  $R_{b\theta} = R_u - a$ . Враховуючи, що  $a = R_\theta \cos \theta$ , отримуємо

$$R_{b\theta} = R_u - R_\theta \cos \theta. \quad (2.1)$$

З трикутника  $AOC$  визначимо величину горизонтальної проекції  $l_{x\theta}$  дуги контакту

$$l_{x\theta} = \sqrt{R_{b\theta}^2 - (R_u - z)^2}. \quad (2.2)$$

Величина  $z$  визначиться з трикутника  $O_k A D$ :

$$z = \sqrt{R_{0\beta}^2 - c^2}, \quad (2.3)$$

де  $R_{0\beta} = R_{0\theta}(\theta = \beta)$ .

З трикутника  $O_k B D$  величина  $c$  дорівнює

$$c = R_\theta \sin \theta. \quad (2.4)$$

Підставляючи (2.1), (2.3) і (2.4) в (2.2), отримуємо остаточне рівняння для визначення горизонтальної проекції  $l_{x\theta}$  дуги контакту як функції ідеального радіусу валка  $R_u$ , профілю калібру  $R_\theta$ , профілю зовнішньої поверхні заготовки  $R_{0\beta}$  і точного значення кута  $\theta$ :

$$l_{x\theta} = \sqrt{(R_u - R_\theta \cos \theta)^2 - \left(R_u - \sqrt{R_{0\beta}^2 - R_\theta^2 \sin^2 \theta}\right)^2}. \quad (2.5)$$

Рівняння (2.5) – це рівняння задньої границі осередку деформації.

Кут  $\alpha$  контакту труби з поверхнею валка в меридіональному перерізі осередку деформації визначиться з рівняння

$$\alpha = \arcsin \frac{l_{x\theta}}{R_{b\theta}}. \quad (3)$$

Довжина дуги  $AC$  контакту металу з валком дорівнює

$$l_\theta = \alpha R_{b\theta}. \quad (4)$$

Кут  $\gamma$  контакту труби з поверхнею валка в перерізі виходу з осередку деформації визначиться як корінь рівняння  $R_\theta(\theta = \gamma) = R_{0\theta}(\theta = \gamma)$ . Враховуючи, що реально у відповідності до (1.2) повинна виконуватися умова  $\gamma \geq \theta_m$ , приймаємо цілком допустиме припущення, відповідно до якого максимальний радіус прокатої труби  $R_{T\max}$  дорівнює ширині калібру  $b$ . Це відповідає умові  $\gamma = \theta_m$ . Таким чином, з точки зору механізму формозміни, прийнято умову, відповідно до котрої, внаслідок бокової течії металу в процесі прокатки, початковий радіус заготовки в напрямку випуску калібру збільшується від величини  $R_{0b}$

на вході в осередок деформації до величини  $b$  на виході з осередку деформації.

Евристично приймаємо:

для прокатки циліндричної заготовки зовнішній радіус котрої дорівнює  $R_0 \leq b$  (перший прохід,  $i = 1$ ) найпростіший – лінійний – закон зміни радіусу заготовки відповідно до логічної умови

$$R_0 = \begin{cases} R_0 & \text{якщо } x > l_{x\theta}(\theta = 0) \\ (b_i - R_0) \left(1 - \frac{x}{l_{x\theta}}\right) & \text{якщо } x \leq l_{x\theta}(\theta = 0) \end{cases}; \quad (5)$$

для прокатки попередньо овалізованої заготовки зовнішній радіус котрої змінюється відповідно закону  $(R_{0\theta})_i = R_{i-1}(\theta_m - \theta)$  (другий,  $i = 2$ , та подальші проходи) закон зміни радіусу заготовки в напрямку випуску калібру відповідно до логічної умови

$$(R_{0\theta})_i = \begin{cases} R_{i-1}(\theta_m - \theta) & \text{якщо } R_{i-1}(\theta_m - \theta) > b_i \\ b_i & \text{якщо } R_{i-1}(\theta_m - \theta) \leq b_i \end{cases}. \quad (6)$$

На рис. 2 показано графічну інтерпретацію закону зміни радіусу заготовки (5).

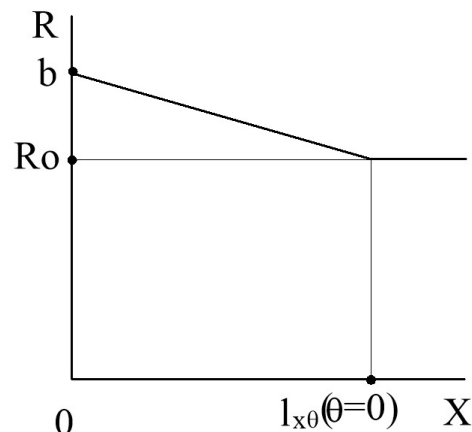


Рис. 2.

В разі використання закону (6) в розрахунках для вершини калібру приймаємо форму заготовки, що співпадає з формою попереднього калібру, а для випуску калібру приймаємо, що радіус заготовки дорівнює ширині калібру  $b_i$ , в якому здійснюється прокатка. Очевидно, що відповідно до прийнятих умов (5.) та (6) незалежно від форми утворюючої зовнішньої поверхні заготовки до прокатки співпадає з формою калібру  $R_i(\theta)$ , в якому здійснювалась деформація. Зовнішній діаметр прокатої труби становить величину  $R_{T\theta} = R_\theta$ , умова (1.2) виконується,

На рис. 3 наведено розрахункові значення  $l_{x\theta}$  калібрах. при прокатці циліндричної заготовки в овальних

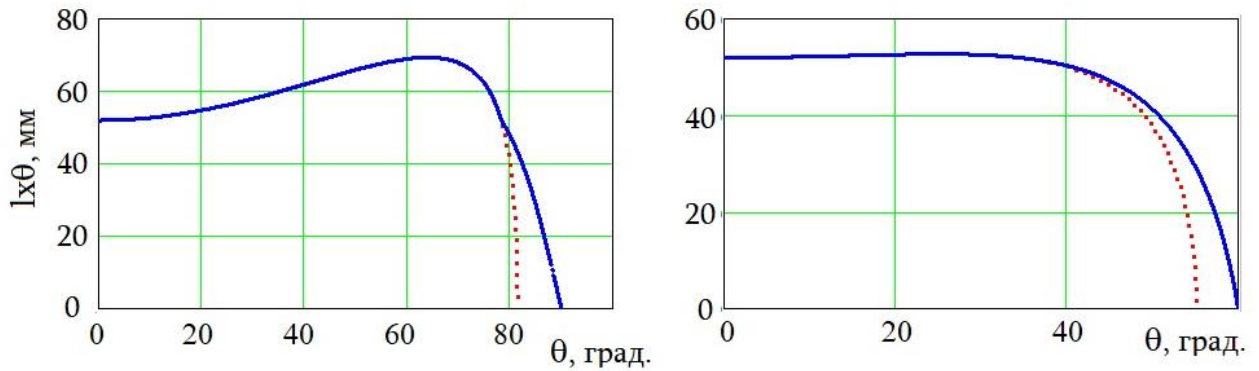


Рис. 3. Розрахункові значення  $l_{x\theta}$  при прокатці циліндричної заготовки в овальних калібрах: суцільні лінії – з використанням умови (5); точки – з використанням умови  $R_0(x) = R_0$  [7]

На рис. 4 наведено розрахункові значення  $l_{x\theta}$  при прокатці попередньо овалізованої заготовки в овальних калібрах.

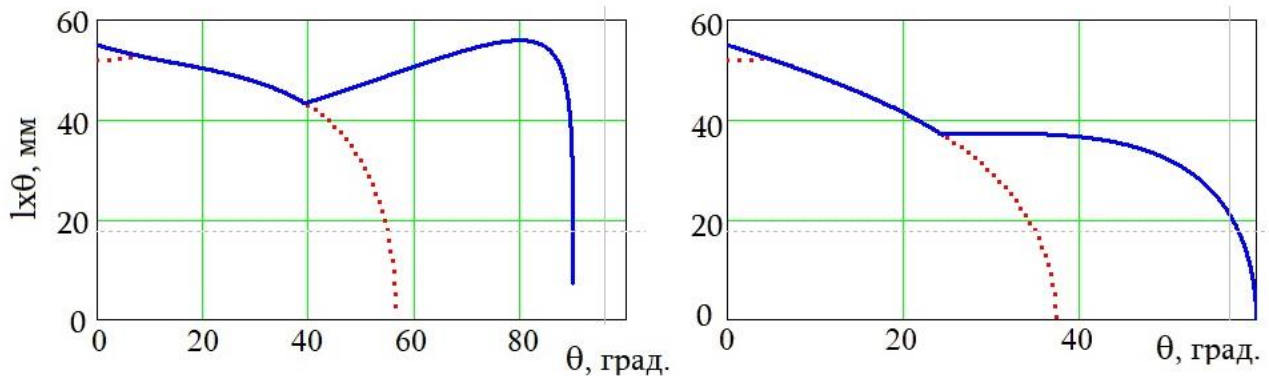


Рис. 4. Розрахункові значення  $l_{x\theta}$  при прокатці попередньо овалізованої заготовки в овальних калібрах: суцільні лінії – з використанням умови (6); точки – з використанням умови  $(R_{0\theta})_2 = R_1(\theta_m - \theta)$  [3, 4]

Розрахункові дані, що представлені на рис. 3–4, якісно відповідають характерним особливостям реального процесу прокатки. Тобто, відповідно розрахунковим і експериментальним даним [8, стор. 146]:

при прокатці циліндричних заготовок в двохвалкових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації має характерну форму так званого сідла;

при прокатці овальних заготовок в двовалкових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації має характерну форму так званого подвійного сідла;

при прокатці циліндричних заготовок в тривалкових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації на значній частині пе-

риметра калібру має форму, близьку до прямої лінії;

при прокатці овальних заготовок в тривалкових калібрах горизонтальна проекція задньої межі осередку деформації має форму, близьку до параболи.

Змінне по периметру калібру обтиснення по радіусу  $\Delta R_\theta$  дорівнює

$$\Delta R_\theta = R_{0\theta} - R_{T\theta} \quad (7)$$

Середня довжина осередку деформації  $l_D$  визначиться з рівняння

$$l_D = \frac{1}{\theta_m} \int_0^{\theta_m} l_{x\theta}(\theta) d\theta \quad (8)$$

З трикутника  $DO_k''A''$  (рис. 1) маємо

$$c = R_{0\beta} \sin \beta. \quad (9)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (2.4) і (9), маємо

$$R_{0\beta} \sin \beta = R_\theta \sin \theta. \quad (10)$$

Рівняння (10) пов'язує кут  $\theta$  в системі координат калібру з кутом  $\beta$  в системі координат заготовки на вході в осередок деформації.

Повна площа контакту заготовки з валком визначиться наступним чином  $F_k = \int_0^{\theta_m} l_\theta R_\theta d\theta$ . З

урахуванням раніше отриманих залежностей останнє рівняння можна представити у вигляді

$$F_k = 2 \int_0^{\theta_m} (R_u - R_\theta \cos \theta) R_\theta \arcsin \left( \frac{l_{x\theta}}{R_u - R_\theta \cos \theta} \right) d\theta \quad (11)$$

Горизонтальна проекція площі контакту дорівнює

$$F_{kx} = 2 \int_0^{\gamma} l_{x\theta} R_\theta \cos \theta d\theta. \quad (12)$$

Розроблена методика використана при розрахунку силових параметрів деформації в станах поздовжньої прокатки трубокатних агрегатів

"30-102", "350", "140" і "80". Ці дані були використані при розробці таблиць прокатки і проектуванні нового обладнання.

#### Висновки

Розроблено модель деформації при прокатці в калібрах, що враховує течу метала в площині, що є перпендикулярна осі прокатки.

При визначенні параметрів контакту метала з валком прийняли, що, через бокову течу металу, діаметр заготовки в площині випусків змінюється від початкової величини (на вході в осередок деформації) до величини, що дорівнює ширині калібру (на виході з осередку деформації).

Розраховано параметри осередку деформації при прокатці циліндричних та овальних заготовок в овальних двовалкових та тривалкових калібрах. Розрахункові дані якісно відповідають характерним особливостям реального процесу прокатки. Тобто, відповідно розрахунковим і експериментальним даним.

Усунена існуюча в раніше використовуваних методиках похибка, обумовлена тим, що максимальний розрахунковий радіус труби був менше ширини калібру, в якому здійснювалася прокатка.

Розроблена методика використана при розрахунок силових параметрів деформації в станах поздовжньої прокатки трубокатних агрегатів "30-102", "350", "140" і "80".

#### Бібліографічний опис

1. Чекмарёв А.П., Ваткин Я.Л. Основы прокатки труб в круглых калибрах. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 222 с.
2. Данилов Ф.А., Балакин А.З., Глейберг В.Г. Горячая прокатка и прессование труб. – Изд. 3-е. – М.: Metallurgiya, 1972. – 576 с.
3. Методика расчета скоростного режима непрерывной продольной прокатки труб на длинной оправке / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.А. Максимова – Гуляева и др. – Теория и практика металлургии, 2010, № 3-4. – С. 53–57.
4. Теоретический анализ влияния отклонений скоростного и деформационного режимов на изменение условий непрерывной продольной прокатки труб на длинной оправке / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.А. Максимова – Гуляева и др. – Теория и практика металлургии, 2012, № 1-2. – С. 37–44.
5. Гуляев Г.И., Довгаль А.И. Выбор величин уширения при редуцировании труб // Сталь. – 1965. – №6. – С. 62–64.
6. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах. – М.: Metallurgiya, 1979. – 240 с.
7. Гуляев Ю.Г., Николаенко Ю.М. Технологічні процеси обробки металів тиском. Частина VII: Навч. посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – 52 с.
8. Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.О. Теорія та технологія трубного виробництва: Підручник. – Дніпропетровськ: Дніпро – VAL, 2000. – 588 с.

#### REFERENCE

1. Chekmaryov A.P., Vatin Ya.L. Osnovy prokatki trub v kruglyh kalibrah. – M.: Metallurgizdat, 1962. – 222 s.
2. Danilov F.A., Balakin A.Z., Glejberg V.G. Goryachaya prokatka i pressovanie trub. – Izd. 3-e. – M.: Metallurgiya, 1972. – 576 s.
3. Metodika rascheta skorostnogo rezhima nepreryvnoj prodolnoj prokatki trub na dlinnoj opravke / Yu.G. Gulyaev, E.I. Shifrin, N.A. Maksimova – Gulyaeva i dr. – Teoriya i praktika metallurgii, 2010, № 3-4. – S. 53–57.

4. Teoreticheskij analiz vliyaniya odklonenij skorostnogo i deformatsionnogo rezhimov na izmenenie uslovij nepreryvnoj prodolnoj prokatki trub na dlinnoj opravke / Yu.G. Gulyaev, E.I. Shifrin, N.A. Maksimova – Gulyaeva i dr. – Teoriya i praktika metallurgii, 2012, № 1-2. – S. 37–44.
5. Gulyaev G.I., Dovgal A.I. Vybora velichin ushireniya pri reducirovani trub // Stal. – 1965. – №6. – S. 62–64.
6. Polyakov M.G., Nikiforov B.A., Gun G.S. Deformaciya metalla v mnogovalkovykh kalibrah. – M.: Metallurgiya, 1979. – 240 s.
7. Gulyayev Yu.G., Nikolayenko Yu.M. Tehnologichni procesi obrobki metaliv tiskom. Chastina VII: Navch. posibnik. – Dnipro: NMetAU, 2017. – 52 s.
8. Druyan V.M., Gulyayev Yu.G., Chukmasov S.O. Teoriya ta tehnologiya trubnogo virobniactva: Pidruchnik. – Dnipropetrovsk: Dnipro – VAL, 2000. – 588 s.

*Стаття поступила: 02.04.2019*