



УДК 621.771.073

Поступила 10.01.2018

## ДОСТИЖЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ ПОЛОС ПЕРЕМЕННОЙ ПО ДЛИНЕ ТОЛЩИНЫ ПРИ ПРОКАТКЕ

*Е. Е. ПЕТЮШИК, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь, ул. Платонова, 41, А. Д. КРИЦКИЙ, Д. М. ИВАНИЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: denisrodman@tut.by*

*Установлено, что процесс симметричной прокатки сопровождается высоким давлением металла на валки, что приводит к износу их рабочей поверхности. Для снижения давления металла применяют натяжение концов полосы. При минимальном переднем натяжении условия деформирования реализуются в случае рассогласования окружных скоростей рабочих валков. Определено, что от величины опережения существенно зависит точность изделий и это необходимо учитывать при прокатке с переменным обжатием. Представлено уравнение для определения мгновенного опережения металла в сечении выхода из очага деформации при прокатке профилей переменного сечения с нарастанием обжатия. Теоретически доказано, что для снижения износа инструмента и достижения заданной размерной точности прокатываемого профиля вполне достаточно производить прокатку полосы в последнем проходе с минимальным единичным обжатием не более 0,5 мм.*

**Ключевые слова.** Полоса, симметричная прокатка, асимметричная прокатка, рассогласование, критический угол, угол касания, опережение, обжатие.

## ACHIEVEMENT OF DIMENSIONAL ACCURACY OF LENGTH VARIABLE THICKNESS STRIP AT ROLLING

*E. E. PETYUSHIK, State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy, Minsk, Belarus, 41, Platonova str. A. D. KRITSKY, D. M. IVANITSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: denisrodman@tut.by*

*It is established that the process of symmetrical rolling is accompanied by high metal pressure on the rolls, which leads to wear on their working surface. To reduce the metal pressure, the tension of the strip ends is applied. With a minimum forward tension, the deformation conditions are realized in the case of a discrepancy between the circumferential speeds of the working rolls. It is determined that the precision of products depends on the amount of advance and this must be taken into account when rolling with variable reduction. An equation for determining the instantaneous advance of the metal in the cross section of the exit from the deformation center during the rolling of profiles of variable cross section with increasing compression is presented. It has been theoretically proved that in order to reduce tool wear and to achieve the specified dimensional accuracy of the rolling profile, it is quite sufficient to roll the strip in the last pass with a minimum unit reduction of not more than 0,5 mm.*

**Keywords.** Strip, symmetrical rolling, asymmetrical rolling, misalignment, critical angle, angle of contact, forward flow, compression.

Одним из основных способов получения полос с переменной по длине толщиной, нашедших промышленное применение, является прокатка полосы в приводных валках постоянного радиуса с изменяющимся межвалковым зазором в процессе деформирования.

Процесс симметричной прокатки сопровождается высоким давлением металла на валки вследствие подпирającego действия сил контактного трения в очаге деформации. Это приводит к существенному износу рабочей поверхности валка. На практике для снижения давления металла на валки повышают температуру деформации или применяют натяжение концов полосы. Это вызывает увеличение интенсивности роста зерна и развитие микротрещин как в объеме металла, так и на его поверхности. Следовательно, проблему снижения давления металла на валки при получении полос с высокой усталостной прочностью необходимо решать при минимальных значениях переднего натяжения. Схема процесса деформирования при симметричной прокатке и его кинематические параметры приведены на рис. 1.

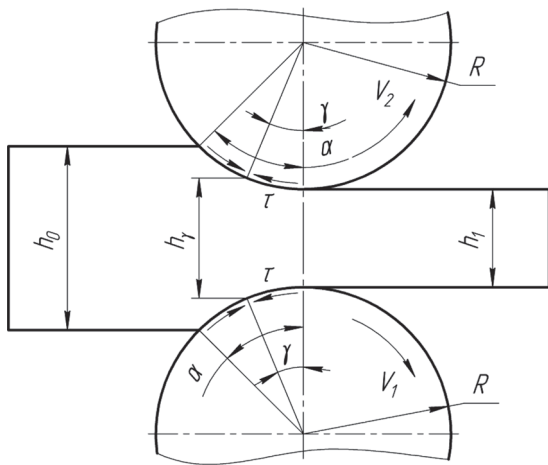


Рис. 1. Схема процесса деформирования при симметричной прокатке

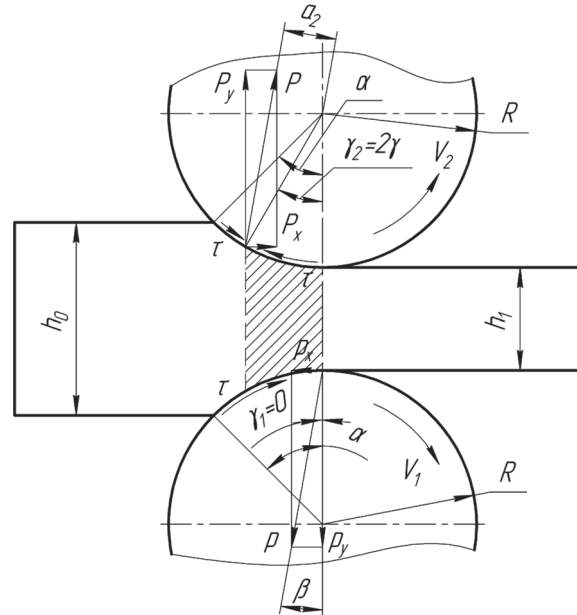


Рис. 2. Схема прокатки с рассогласованием окружных скоростей валков

Условия деформирования при минимальных значениях переднего натяжения могут быть реализованы в случае рассогласования окружных скоростей рабочих валков.

При асимметричной прокатке вследствие разных окружных скоростей валки воспринимают различные по величине крутящие моменты. Распределение общего крутящего момента между валками при асимметричной прокатке рассмотрено А. И. Целиковым и др. [1].

При прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков (рис. 2) возникающие горизонтальные силы  $P_x$ , которые взаимно уравниваются, вызывают отклонение равнодействующих сил  $P$  от плоскости прокатки. При данной схеме прокатки также уравниваются силы контактного трения  $\tau$  на поверхностях верхнего и нижнего валков.

С увеличением коэффициента рассогласования скоростей  $k_V = V_1/V_2$  соответственно увеличивается угол отклонения равнодействующих сил, а также плечо  $a_2$ . В данном случае валок, вращающийся с большей скоростью ( $V_1$ ), будем называть ведущим, а валок, вращающийся с меньшей скоростью ( $V_2$ ), – ведомым. Ведущий валок принимает на себя больший крутящий момент по отношению к ведомому.

В практике конструирования транспортных средств, в частности для автомобилей средней грузоподъемности, все большее внимание привлекают конструкции с использованием подрессорника, по сути дела являющегося одной из разновидностей малолистовых рессор. Заготовка подрессорника представляет собой полосу переменного сечения (рис. 3) и отличается от заготовки малолистовых рессор значительным перепадом толщины.

Условия эксплуатации деформирующих валков чрезвычайно тяжелые. Основной причиной выхода из строя инструмента является неравномерный размерный износ, возникновение пригара материала заготовки к поверхности, а также повреждения в виде сколов, раковин, трещин отслоений и др.

Как известно, при продольной периодической прокатке опережение, сопровождающее процесс, изменяется по мере увеличения или уменьшения обжатия [2]. От величины опережения существенно зависит точность прокатки. Это необходимо учитывать, особенно при прокатке с переменным обжатием.

Для расчетов обычно используют довольно сложные методики, например, методику расчета переменных скоростей [3]. Был предложен другой подход [4]. Допускаем, что в рассматриваемом случае не будет изменяться величина критического угла  $\gamma$ , определяющего положение критического сечения, разделяющего потоки металла на участки опережения и отставания. Для обеспечения требуемых продольных размеров готового профиля необходим учет опережения на различных фиксированных участках полосы. При такой постановке формула



Рис. 3. Эскиз одной ветви полосы малолистовой рессоры

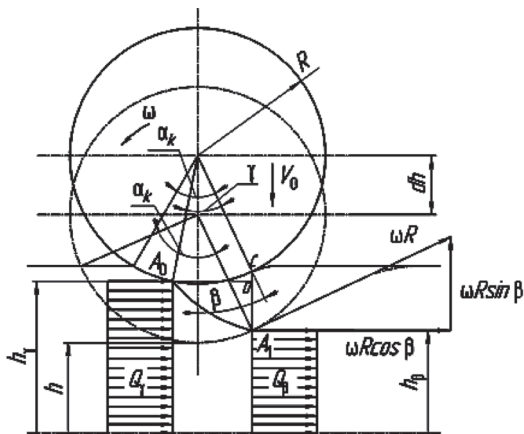


Рис. 4. Схема потоков скорости относительно критического сечения в нестационарном очаге деформации

для расчета опережения может быть получена из закона сохранения масс (рис. 4).

Уравнение для определения мгновенного опережения металла в сечении выхода из очага деформации при прокатке профилей переменного сечения с нарастающим обжатием [4] имеет вид

$$S = \frac{\left\{ 1 + \frac{R}{h_1} \beta^2 + 2 \frac{R}{h_1} \left[ \gamma \beta + \frac{(\gamma - \beta)^2}{2} - \frac{\beta^2}{2} \right] \right\} \left[ 1 - \frac{(\gamma - \beta)^2}{2} \right]}{\left( 1 + \frac{R}{h_1} \beta^2 \right) \left( 1 - \frac{\beta^2}{2} \right)} - 1. \quad (1)$$

Входящий в выражение (1) критический угол определяем (с учетом знака  $\beta$ ) по уравнению, которое может быть получено как из условия равновесия сил в очаге деформации, так и на основе энергетической теории взаимодействия полосы

и валков. Для случая прокатки с нарастающим обжатием оно записывается как [4]

$$\gamma = \sqrt{\frac{h}{R}} \operatorname{tg} \left\{ 0,5 \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{h}{R}} \alpha \right) - \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{h}{R}} \beta \right) \right] - \left( \frac{0,25}{f} \right) \sqrt{\frac{h}{R}} \ln \left[ \frac{\left( \frac{h}{R} + \alpha^2 \right)}{\left( \frac{h}{R} + \beta^2 \right)} \right] \right\} + \beta, \quad (2)$$

где  $f$  – средний коэффициент трения;  $\beta$  – угол сечения выхода металла из валков;  $R$  – радиус валков.

В свою очередь

$$\alpha = \alpha_k - \beta, \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  – угол касания валков с металлом.

Угол касания валков с металлом находим из выражения

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}. \quad (4)$$

После упрощения и подстановки вместо  $\alpha_k$  выражения (4) уравнение (2) примет вид

$$\gamma = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \left( 1 - \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} + \frac{\beta}{f} \right). \quad (5)$$

Результаты расчетов по формуле (1) и данным [5] приведены в таблице. Как видно из таблицы, результаты хорошо согласуются между собой, что указывает на корректность предлагаемого решения.

Изменение мгновенного опережения при прокатке с нарастающим обжатием в зависимости от угла касания  $\alpha_k$  при  $f = 0,5$ ;  $\beta = 0,1$  рад;  $R = 120$  мм и  $(R/h_1) = 10$  по данным [5] и формуле (1)

$\Delta h$	$\gamma$	$S$ [5]	$S$ формула (1)
0	0	0	0
4,6	0,1	0,096391	0,096391
18,4	0,16	0,237218	0,236692
41,4	0,18	0,29794	0,296887
73,6	0,16	0,237218	0,236692
115	0,1	0,096391	0,096391
165,6	0	0	0

Теоретические исследования доказывают, что для уменьшения опережения и достижения заданной размерной точности прокатываемого профиля вполне достаточно производить прокатку полосы в по-

следнем проходе с минимальным единичным обжатием (не более 0,5 мм) без дополнительного ее натяжения и рассогласования окружных скоростей валков. Увеличение обжатия, а, следовательно, и угла касания  $\alpha_k$  приводит к проскальзыванию валков по поверхности металла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Исаевич Л. А.** Определение величины натяга при бандажировании валков для асимметричной прокатки / Л. А. Исаевич, Д. М. Иваницкий, М. И. Сидоренко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф.: В 3-х кн. Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси. Минск, 2016. Кн. 3. С. 23–31.
2. **Аникеенко И. Н.** Параметры калибровки валков и прокатки заготовок турбинных лопаток / И. Н. Аникеенко, А. Г. Сочам // Теоретические проблемы прокатного производства: Тез. докл. 3-й Всесоюз. конф. Днепропетровск: ДМетИ, 1980. С. 300–301.
3. **Чекмарев А. П.** Некоторые вопросы продольной периодической прокатки / А. П. Чекмарев, А. Ф. Смольянинов // Тр. Днепропетр. металлург. ин-та. Днепропетровск: ДМетИ, 1958. Вып. 37. С. 185–203.
4. **Исаевич Л. А.** Расчет опережения при прокатке с нарастающим обжатием / Л. А. Исаевич, М. И. Сидоренко, М. М. Малекиан // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II Междунар. науч.-техн. конф.: В 2-х т. Минск, 2007. Т. 2. С. 42–45.
5. **Данилов В. Д.** Оперезание при прокатке профилей переменного сечения // Изв. вузов. Черная металлургия. 1974. № 1. С. 82–86.

### REFERENCES

1. **Isaevich L. A., Ivanickij D. M., Sidorenko M. I.** Opredelenie velichiny natjaga pri bandazhировanii valkov dlja asimmetrichnoj prokatki [Determination of the value of the interference in the banding of rolls for asymmetric rolling]. *«Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov»*. *Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = «Modern methods and technologies of creation and processing of materials»*. *Materials of the XI International Scientific and Technical Conference*. Minsk, 2016, no. 3, pp. 23–31.
2. **Anikeenko I. N., Socham A. G.** Parametry kalibrovki valkov i prokatki zagotovok turbinnih lopatok [Parameters of calibration rolls and rolling pieces of turbine blades]. *«Teoreticheskie problemy prokatnogo proizvodstva»*. *Tezisy dokladov 3 Vsesojuznoj konferencii = «Theoretical problems of rolling mills»*. *Abstracts 3th Union Conference*. Dnepropetrovsk, 1980, pp. 300–301.
3. **Chekmarev A. P., Smol'janinov A. F.** Nekotorye voprosy prodol'noj periodicheskoy prokatki [Some issues of periodic longitudinal rolling]. *Trudy Dnepropetrovskogo metallurgicheskogo instituta = Proceedings of the Dnepropetrovsk Metallurgical Institute*. Dnepropetrovsk, 1958, no. 37, pp. 185–203.
4. **Isaevich L. A., Sidorenko M. I., Malekian M. M.** Raschet operezhenija pri prokatke s narastajushhim obzhatiem [Calculation of the lead in rolling with increasing compression]. *«Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov»*. *Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = «Modern methods and technologies of creation and processing of materials»*. *Materials of the II International Scientific and Technical Conference*. Minsk, 2007, no. 2, pp. 42–45.
5. **Danilov V. D.** Operezhenie pri prokatke profilej peremennogo sechenija [Advance in rolling profiles of variable section]. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija = Proceedings of the institution. Ferrous metallurgy*, 1974, no. 1, pp. 82–86.