



УДК 621.771.014.2

Поступила 13.06.2016

ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ БАНДАЖИРОВАННОГО ВАЛКА ДЛЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ

STRENGTH ANALYSIS OF BANDED ROLL FOR ASYMMETRIC ROLLING

Л. А. ИСАЕВИЧ, Д. М. ИВАНИЦКИЙ, М. И. СИДОРЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: denisrodman@tut.by

L. A. ISAEVICH, D. M. IVANICKIJ, M. I. SIDORENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: denisrodman@tut.by

Проведен расчет номинальных крутящих моментов на валках при асимметричной прокатке полос малолистовых рессор. Для стабилизации процесса прокатки предложено использовать переднее натяжение и определена минимальная его величина. Рассчитано рассогласование окружных скоростей ведущего и ведомого валков. Предложена конструкция составного бандажированного валка с двумя выступами на бандаже и двумя пазами на валу. Произведена проверка на смятие и на срез выступов на бандаже. Прочность конструкции обеспечена.

The calculation of the nominal torque on the rolls during asymmetric rolling of a strip with small laminated springs are held. To stabilize the rolling process it is proposed to use a front tension and a certain minimum value was calculated. Misalignment of the circumferential speeds of the driving and driven rolls are calculated. The design of a composite roll banded with two tabs on the brace and the two grooves on the shaft are proposed. Crumpling test and shear test of the tabs on the brace were conducted. Necessary structural toughness was provided.

Ключевые слова. Асимметричная прокатка, крутящий момент, переднее натяжение, рассогласование, смятие, срез.

Keywords. Asymmetric rolling, torque, front tension, misalignment, crumpling, shear.

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. [1–3]. При прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков (рис. 1) возникающие горизонтальные силы P_x , которые взаимно уравновешиваются, вызывают отклонение равнодействующих сил P от плоскости прокатки. При данной схеме прокатки также уравновешиваются силы контактного трения τ на поверхностях верхнего и нижнего валков.

С увеличением рассогласования скоростей соответственно увеличиваются углы отклонения равнодействующих сил. В данном случае валок, вращающийся с большей скоростью (V_1), будем называть ведущим, а валок, вращающийся с меньшей скоростью (V_2), – ведомым.

Момент прокатки на ведущем валке будем считать равным работе деформации на этом валке. Определим работу, совершаемую ведущим валком. Для этого вначале рассмотрим процесс симметричной прокатки.

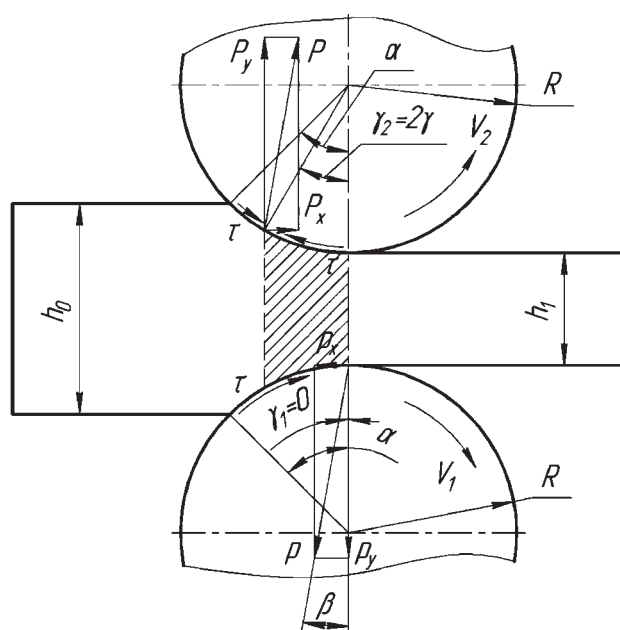


Рис. 1. Схема прокатки с рассогласованием окружных скоростей валков

Силу трения на элементарной площадке контактной поверхности можно описать выражением [1]

$$dF = \tau b R d\alpha, \tag{1}$$

где $b, R d\alpha$ – соответственно ширина и длина элементарной площадки контактной поверхности.

В качестве пути силы dF следует принять путь, проходимый точками контактной поверхности валка. При повороте валка на бесконечно малый угол $d\psi$ этот путь равен $dS = R d\psi$. Тогда работа элементарной силы трения dF в зоне отставания будет равна (для одного валка) [1]

$$dA' = \int_{\gamma}^{\alpha} \tau b R^2 d\psi d\alpha. \tag{2}$$

Аналогично для зоны опережения можно записать [1]

$$dA'' = \int_0^{\tau} \tau b R^2 d\psi d\alpha. \tag{3}$$

В зоне отставания энергия передается в направлении от валка к полосе, затрачиваемую при этом работу dA' будем считать положительной. В зоне опережения энергия будет передаваться от полосы к валкам, в связи с этим работе dA'' следует присваивать отрицательный знак. Учитывая знак работы в обеих зонах, можно записать суммарную работу сил контактного трения в следующем виде:

$$dA = dA' - dA'' = 2\tau b R^2 d\psi \left(\int_{\gamma}^{\alpha} d\alpha - 2 \int_0^{\gamma} d\alpha \right). \tag{4}$$

Проинтегрируя выражение (4) и пренебрегая бесконечно малой величиной $d\psi$, получаем выражение для определения работы, совершаемой валком:

$$A = 2\tau b R^2 (\alpha - 2\gamma). \tag{5}$$

Принимая во внимание, что $\tau = f\sigma_s$, запишем выражения для определения крутящего момента при асимметричной прокатке на ведущем и ведомом валках соответственно

$$M_{кр1} = 2f\sigma_s b R^2 (\alpha - 2\gamma_1), \quad M_{кр2} = 2f\sigma_s b R^2 (\alpha - 2\gamma_2),$$

где σ_s – предел текучести металла; f – коэффициент контактного трения.

При предельном рассогласовании окружных скоростей валков $\gamma_1 = 0$ и $\gamma_2 = 2\gamma$ запишем

$$M_{кр1} = 2f\sigma_s b R^2 \alpha, \quad M_{кр2} = 2f\sigma_s b R^2 (\alpha - 4\gamma). \tag{6}$$

Согласно [1, 4], положение нейтрального сечения при симметричной прокатке определяем по формуле

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2f} \right). \tag{7}$$

Тогда с учетом изложенного выше окончательно запишем выражения для определения крутящего момента на ведущем и ведомом валках соответственно

$$M_{кр1} = 2fbR^2 \alpha \sigma_s, \quad M_{кр2} = 2fbR^2 \left(\frac{\alpha^2}{f} - \alpha \right) \sigma_s. \tag{8}$$

Используя выражения (8), в качестве примера рассчитаем крутящие моменты на составных ведомом и ведущем валках при прокатке полосы малолистовой рессоры за один проход. Эскизы обрабатываемой полосы и одного из бандажированных валков приведены на рис. 2.

Определяем крутящие моменты на ведущем и ведомом валках, используя зависимости (8) (см. таблицу). Принимаем исходные данные для расчетов: $f = 0,3$; $R = 130$ мм; $\sigma_s = 100$ МПа для стали 50ХГФА [5].

Результаты расчета крутящих моментов

α , рад	$M_{кр1}$, Нм	$M_{кр2}$, Нм
0,249	22 724	-3863

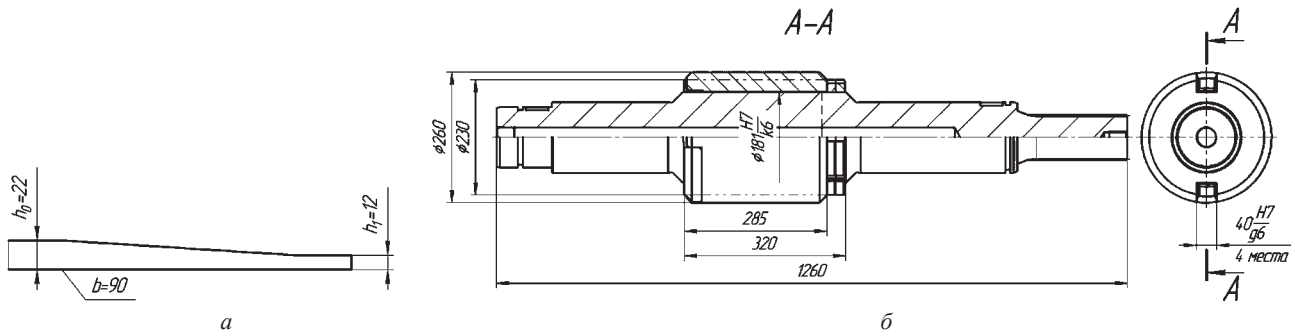


Рис. 2. Эскиз одной ветви полосы малолистовой рессоры (а) и бандажированного вала (б)

Крутящий момент на ведомом валке $M_{кр2}$ имеет отрицательное значение, поскольку на поверхности контакта металла и валка преобладает зона опережения над зоной отставания и энергия передается от полосы к валку. В данном случае отрицательный знак крутящего момента оказывает негативное влияние и приводит к проскальзыванию ведомого валка по полосе и остановке процесса прокатки. Устранить негативное влияние крутящего момента при асимметричной прокатке можно применением переднего натяжения полосы. Схема прокатки с передним натяжением T показана на рис. 3.

Стабильность процесса асимметричной прокатки с передним натяжением полосы будет обеспечена при соблюдении условия

$$TR \geq M_{кр2}, \quad (9)$$

где T – сила переднего натяжения прокатываемой полосы.

С учетом выражения (8) получим зависимость для определения усилия переднего натяжения

$$T = 2fbR \left(\frac{\alpha^2}{f} - \alpha \right) \sigma_s. \quad (10)$$

Рассчитаем величину усилия переднего натяжения при прокатке полосы малолистовой рессоры (см. рис. 2, а) за один проход в валках:

$$T = 2 \cdot 0,3 \cdot 90 \cdot 130 \left(\frac{0,249^2}{0,3} - 0,249 \right) \cdot 100 = 29,7 \text{ кН.}$$

Для задания скоростей вращения ведущего и ведомого валков необходимо знать рассогласование их скоростей при асимметричной прокатке. Определим величину относительного скольжения (опережения) полосы в валках при асимметричной прокатке, используя выражение [1]:

$$s = \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \quad (11)$$

из которого получаем

$$V_2 = V_1(s + 1). \quad (12)$$

С другой стороны, рассогласование скоростей можно определить, используя известное выражение [1]:

$$s = \frac{\gamma^2 R}{h_1}, \quad (13)$$

где h_1 – конечная толщина полосы.

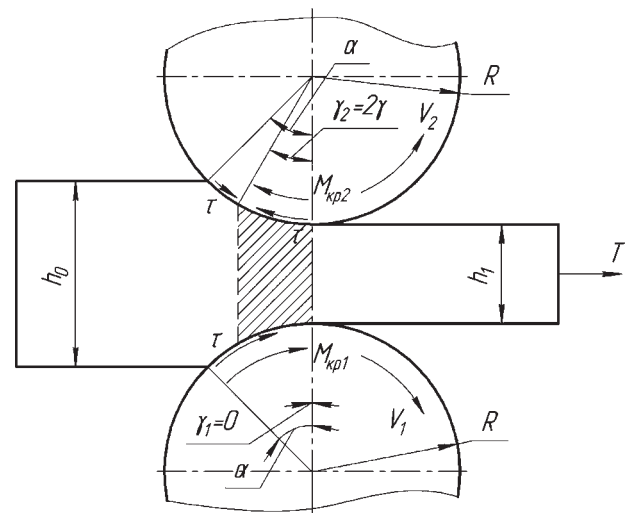


Рис. 3. Схема прокатки с передним натяжением полосы

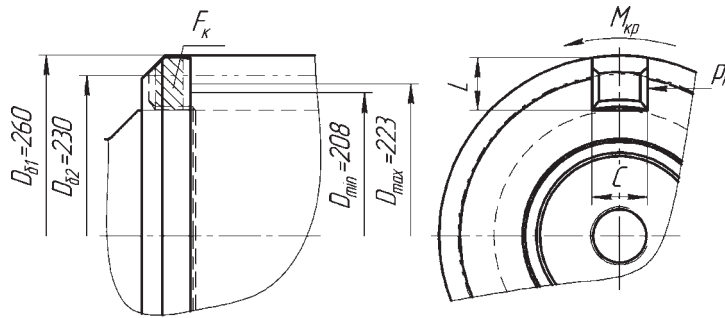


Рис. 4. Схема для определения нормальных давлений на контактных поверхностях составного вала

При прокатке полосы малолистовой рессоры (см. рис. 2, а) за один проход в валках относительное скольжение на ведомом валке составит при $\gamma_2 = 0,073$

$$s = \frac{0,073^2 \cdot 130}{12} = 0,058.$$

Из выражения (11) находим зависимость между скоростями ведущего и ведомого валков

$$V_2 = V_1(1 - s). \quad (14)$$

Для определения величин скоростей валков задаемся скоростью вращения ведущего валка и из выражения (14) рассчитаем скорость ведомого валка. Рассогласование скоростей (коэффициент рассогласования скоростей) можно найти, используя выражение [4]:

$$k_V = \frac{V_1}{V_2}. \quad (15)$$

В связи с наличием рассогласования скоростей валков на ведомом валке появляется протяженная зона опережения и возникает скольжение металла в этой зоне, что приводит к существенному износу самого валка. С целью обеспечения ремонтпригодности валков предложена их конструкция в виде бандажированного вала. Как видно из рис. 4, на бандаже выполнены прямоугольные выступы, входящие при сборке валка в пазы на фланце вала и воспринимающие номинальный крутящий момент в процессе прокатки.

В данном случае для анализа работоспособности составного валка необходимо определить максимальное и минимальное нормальные напряжения, возникающие на поверхностях контакта выступов бандажа и пазов вала (рис. 4). При этом максимальное нормальное напряжение находим при минимальном диаметре бандажа $D_{б2} = 230$ мм после переточки во время ремонта, а минимальное – при диаметре $D_{б1} = 260$ мм.

Нормальное напряжение на поверхности контакта выступа бандажа и паза вала в процессе прокатки с номинальным крутящим моментом (см. таблицу) определим из выражения [6]

$$p_k = \frac{2M_{кр}}{DF_k}, \quad (16)$$

где $M_{кр}$ – номинальный крутящий момент на валках; D – максимальный и минимальный диаметр бандажа по средней линии выступа; F_k – площадь контактной поверхности выступа бандажа и паза вала.

Окончательно рассчитаем нормальное напряжение на площадке контакта одного выступа:

для нового бандажа $F_{к1} = 727,7$ мм²:

$$p_{к1} = \frac{2M_{кр}}{D_{max} F_{к1}} = \frac{2 \cdot 22,724 \cdot 10^6}{223 \cdot 727,7} = 280 \text{ МПа};$$

для переточенного бандажа $F_{к2} = 483,4$ мм²:

$$p_{к2} = \frac{2M_{кр}}{D_{min} F_{к2}} = \frac{2 \cdot 22,724 \cdot 10^6}{208 \cdot 483,4} = 452 \text{ МПа}.$$

Поскольку для термообработанной инструментальной легированной стали (для примера возьмем сталь 5ХНВ) допустимое напряжение на смятие $[\sigma_{см}] = 1560$ МПа [6], то, очевидно, что соблюдается

условие $p_k < [\sigma_{см}]$ и, следовательно, прочность предложенного соединения бандажа с одним выступом и вала с одним пазом будет обеспечена.

Далее рассчитаем прочность соединения бандажа и вала на срез в процессе прокатки с номинальным крутящим моментом, используя выражение [6]:

$$\sigma_{ср} = \frac{2M_{кр}}{DLC} \leq [\sigma_{ср}], \quad (17)$$

где L , C – соответственно высота и толщина выступа бандажа; $[\sigma_{ср}]$ – допустимое напряжение на срез материала бандажа.

Принимаем в качестве исходного данного для расчетов параметр $C = 40$ мм. Окончательно определим прочность соединения бандажа и вала на срез для одного выступа:

для нового бандажа $L_1 = 38$ мм:

$$\sigma_{ср1} = \frac{2M_{кр}}{D_{max}L_1C} = \frac{2 \cdot 22,724 \cdot 10^6}{223 \cdot 38 \cdot 40} = 134 \text{ МПа};$$

для переточенного бандажа $L_2 = 23$ мм:

$$\sigma_{ср2} = \frac{2M_{кр}}{D_{min}L_2C} = \frac{2 \cdot 22,724 \cdot 10^6}{208 \cdot 23 \cdot 40} = 238 \text{ МПа}.$$

Допустимое напряжение на срез материала бандажа (сталь 5ХНВ) составляет $[\sigma_{ср}] = 1350$ МПа [6]. Сравнивая полученные данные, можно утверждать, что соблюдается условие $\sigma_{ср} < [\sigma_{ср}]$ и, следовательно, прочность на срез предложенного соединения бандажа с одним выступом и вала с одним пазом также будет обеспечена.

Для обеспечения симметричности нагрузки на бандаже предложено использовать по два радиально расположенных выступа на бандаже и два паза на валу.

Выводы

Проведен расчет номинальных крутящих моментов на валках при асимметричной прокатке полос малолистовых рессор. Для стабилизации процесса прокатки предложено использовать переднее натяжение и определена минимальная его величина. Рассчитано рассогласование окружных скоростей ведущего и ведомого валков. Предложена конструкция составного бандажированного валка с двумя выступами на бандаже и двумя пазами на валу. Произведена проверка на смятие и на срез выступов на бандаже. Прочность конструкции обеспечена.

Литература

1. **Выдрин В. Н.** Динамика прокатных станов. Свердловск: Metallurgizdat, 1960. 255 с.
2. **Степаненко А. В.** Кинематические и силовые параметры прокатки с критическим рассогласованием окружных скоростей валков / А. В. Степаненко, Ю. В. Карпицкий, Л. А. Смирнова // Докл. НАН Беларуси. 1999. Т. 43, № 5. С. 111–113.
3. **Степаненко А. В.** Прокатка полос с критическим рассогласованием окружных скоростей валков / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич, Ю. В. Карпицкий, Л. А. Смирнова // «Технология 99»: Материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Братислава (Словакия). 1999. Ч. 1. С. 417–420.
4. **Степаненко А. В.** Прокатка полос переменного профиля / А. В. Степаненко, В. А. Король, Л. А. Смирнова. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2001. 180 с.
5. **Третьяков А. В.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справ. / А. В. Третьяков, А. И. Зюзин. М: Металлургия, 1973. 223 с.
6. **Руководящий документ 37.002.0490–86** «Конструирование штампов листовой штамповки». НПО «ГНИИТавтопром», 1987. 329 с.

References

1. **Vydrin V. N.** *Dinamika prokatnyh stanov* [Dynamics of rolling mills]. Sverdlovsk, Metallurgizdat Publ., 1960, 255 p.
2. **Stepanenko A. V., Karpickij Ju. V., Smirnova L. A.** Kinematicheskie i silovye parametry prokatki s kriticheskim rassoglasovaniem okružnyh skorostej valkov [Kinematic and force parameters of rolling with the critical misalignment of the circumferential speeds of the rolls]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1999, vol. 43, no. 5, pp. 111–113.
3. **Stepanenko A. V., Isaevich L. A., Karpickij Ju. V., Smirnova L. A.** Prokatka polos s kriticheskim rassoglasovaniem okružnyh skorostej valkov [The rolling of a strip with the critical misalignment of the circumferential speeds of the rolls]. «*Tehnologija 99*» *Materialy 6-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = «Technology 99» Materials of 6th International scientific-technical conference*. Bratislava (Slovakia), 1999, p. 1, pp. 417–420.

4. Stepanenko A. V., Korol' V. A., Smirnova L. A. *Prokatka polos peremennogo profilja* [The rolling of a strip with variable profile]. Gomel, Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2001, 180 p.

5. Tret'jakov A. V., Zjuzin A. I. *Mehaničeskie svojstva metallov i spлавov pri obrabotke davleniem: Spravočnik* [Mechanical properties of metals and alloys under pressure treatment: a Handbook]. Moscow, Metallurgy Publ., 1973, 223 p.

6. Rukovodjashhij dokument 37.002.0490–86. *Konstruirovaniye shtampov listovoj shtampovki* [Guidance document 37.002.0490-86. Design of dies for sheet forming]. Moscow, Scientific-production Union state scientific-research Institute of automobile industry Publ., 1987, 329 p.

2016 МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА
ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ,
МЕТАЛЛООБРАБОТКИ И ЛИТЬЯ

25-27
ОКТЯБРЯ
2016



М. НИВКИ, УЛ. САЛЮТНАЯ, 2Б



ВПЕРВЫЕ В КИЕВЕ



МАШПРОМ



ЛитЭкс

ООО Экспо-центр «МЕТЕОР»™
+38 (056) 373-93-72, +38 (067) 639-86-79
mashprom@expometeor.com
litex@expometeor.com

