

PACS: 89.20.Bb

Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, В.Е. Гончаров, Ю.И. Юрченко

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КАТАНЫХ ПОЛОС К ПОТЕРЕ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ

Донецкий национальный технический университет

Статья поступила в редакцию 11 июня 2020 года

Предложен метод создания при прокатке напряженно-деформированного состояния полосы, повышающего ее устойчивость к потере плоской формы на основе принципа дробления деформаций. Показано, что локальные участки сжимающих и растягивающих остаточных напряжений рационально располагать в шахматном порядке. Найдены теоретические зависимости расчета параметров локальных участков при дроблении остаточных напряжений, установлены граничные условия получения полосы без дефектов. Показаны предельные возможности стабилизации плоскостности при прокатке стальных и алюминиевых полос.

Ключевые слова: полоса, стабилизация плоскостности, критические напряжения, дробление остаточных напряжений, прокатка

Введение

Одним из основных показателей качества листопрокатной продукции является плоскостность. При холодной прокатке в результате неравномерного распределения деформации по ширине полосы и, как следствие, появления остаточных сжимающих напряжений происходит потеря плоской формы. После деформации полоса может приобретать различные виды дефектов плоскостности – волнистость, коробоватость, локальную неплоскостность и др. [1,2].

Из-за большого числа факторов, вызывающих неравномерность деформации по ширине полосы [3–5] и, как следствие, возникновение различных дефектов ее формы, управлять плоскостностью становится крайне сложно. Способы и устройства по управлению плоскостностью направлены в основном на снижение в полосе сжимающих остаточных напряжений. При этом повышение критических напряжений и, соответственно, стабилизация плоского состояния полосы остаются актуальными.

Целью настоящей работы является улучшение плоскостности прокатываемых полос за счет повышения их устойчивости к потере плоской формы.

Результаты исследования

Для того чтобы участок полосы не потерял плоскую форму, необходимо выполнение следующего условия:

$$\sigma_{sq} < \sigma_{cr}, \quad (1)$$

где σ_{sq} – сжимающие остаточные напряжения, приложенные к участку полосы; σ_{cr} – критическое напряжение для рассматриваемого участка полосы.

Устойчивость полосы к потере плоской формы тем выше, чем выше критические напряжения σ_{cr} участка полосы (при прочих равных условиях). Из теории расчета гибких пластин [6] известна формула критического напряжения сжатия, при котором пластина теряет устойчивость:

$$\sigma_{cr} = k_1 k_2 \left(\frac{h}{b} \right)^2, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от отношения длины a к ширине b пластины и от условий ее закрепления; $k_2 = \frac{\pi^2 E}{12(1-\gamma^2)}$ – показатель, зависящий от упругих свойств пластины (модуля упругости E и коэффициента Пуассона γ); h – толщина пластины.

Из формулы (2) следует, что повысить напряжение σ_{cr} можно путем увеличения модуля упругости, коэффициента Пуассона и толщины пластины, уменьшения ее ширины и отношения длины к ширине, а также за счет изменения условий закрепления пластины.

Потеря участком полосы устойчивости при прокатке происходит и под действием сжимающих напряжений [7], возникающих из-за неравномерного обжатия между смежными участками полосы. Эпюра продольных остаточных напряжений вне очага деформации должна быть равновесной. Вследствие этого на участках, получивших большие обжатия, действуют сжимающие напряжения, а на менее обжатых участках – растягивающие. Для сохранения полосой плоской формы необходимо выполнение условия (1).

Применительно к прокатке полос и листов наиболее приемлемым вариантом повышения σ_{cr} является уменьшение длины и ширины участков, на которые действуют остаточные сжимающие напряжения. Этого можно достичь путем сокращения размеров смежных участков полосы, прокатываемых с разным уровнем деформации.

При обычной листовой прокатке ширина участков полосы, на которых действуют остаточные сжимающие напряжения, составляет приблизительно 1/3 ширины полосы [7], а длина этих участков превышает их ширину и может быть равна расстоянию между прокатной клетью и моталкой. При таких размерах участков, как известно, очень сложно сохранить устойчивость полосы, и она теряет плоскую форму. По сравнению с традиционной прокаткой сократить размеры локальных участков полосы, на которые действуют остаточные сжимающие напряжения, можно путем уменьшения:

- 1) ширины локальных участков b_{loc} при сохранении длины a_{loc} ;
- 2) их длины при сохранении ширины;

3) одновременно их длины и ширины.

Для указанных вариантов эпюры остаточных напряжений в плоскости полосы будут иметь соответственно: 1) чередующиеся по ее ширине участки растягивающих и сжимающих напряжений; 2) чередующиеся по ее длине участки растягивающих и сжимающих напряжений; 3) чередующиеся участки растягивающих и сжимающих напряжений, расположенные в шахматном порядке.

Отсюда следует, что согласно выражению (2) по критерию плоскостности наиболее эффективно располагать участки сжимающих и растягивающих напряжений в шахматном порядке, так как в этом случае размеры локальных участков будут наименьшими, а значит, величина σ_{cr} будет наибольшей.

Авторами разработана схема напряженного состояния, обладающая наибольшей устойчивостью к потере плоской формы полосы за счет наименьших размеров ее участков, на которые действуют сжимающие напряжения (рис. 1). Такое напряженное состояние в полосе можно реализовать путем дробления деформаций в плоскости листа посредством чередования большего и меньшего уровней деформаций на локальных участках. Для получения остаточных сжимающих напряжений полосу на соответствующих участках подвергают большей деформации, для получения растягивающих напряжений – меньшей деформации.

Достижение положительного эффекта от дробления деформаций в плоскости листа требует выполнения следующих условий, вытекающих из анализа эпюры напряженного состояния полосы (рис. 1):

1) осуществления дробления остаточных напряжений в плоскости листа при максимальных растягивающих напряжениях σ_{str} от дробления деформаций, превышающих максимальные сжимающие напряжения σ_{sq}^0 , полученные от неравномерности деформации при прокатке (например, от изгиба валков):

$$\sigma_{str} > \sigma_{sq}^0 ; \quad (3)$$

2) сохранения плоской формы локального участка полосы при максимальных суммарных сжимающих напряжениях σ_{sq}^{Σ} , не превышающих критических σ_{cr} :

$$\sigma_{sq}^{\Sigma} > \sigma_{cr} ; \quad (4)$$

3) сохранения сплошности полосы при максимальных растягивающих суммарных напряжениях σ_{str}^{Σ} , не превышающих временного сопротивления на разрыв σ_t :

$$\sigma_{str}^{\Sigma} < \sigma_t \quad (5)$$

или, с учетом напряжения натяжения σ_u

$$\sigma_{str}^{\Sigma} + \sigma_u < \sigma_t . \quad (6)$$

Только при одновременном выполнении условий (3)–(5), зависящих (при неизменном режиме прокатки) от параметров локальных участков полосы: длины, ширины и неравномерности деформаций между локальными участками можно прокатать плоскую и без нарушений сплошности полосу. Нахождение параметров локальных участков заключается в решении системы неравенств

$$\begin{cases} \sigma_{str} > \sigma_{sq}^0, \\ \sigma_{sq}^{\Sigma} > \sigma_{cr}, \\ \sigma_{str}^{\Sigma} < \sigma_t. \end{cases} \quad (7)$$

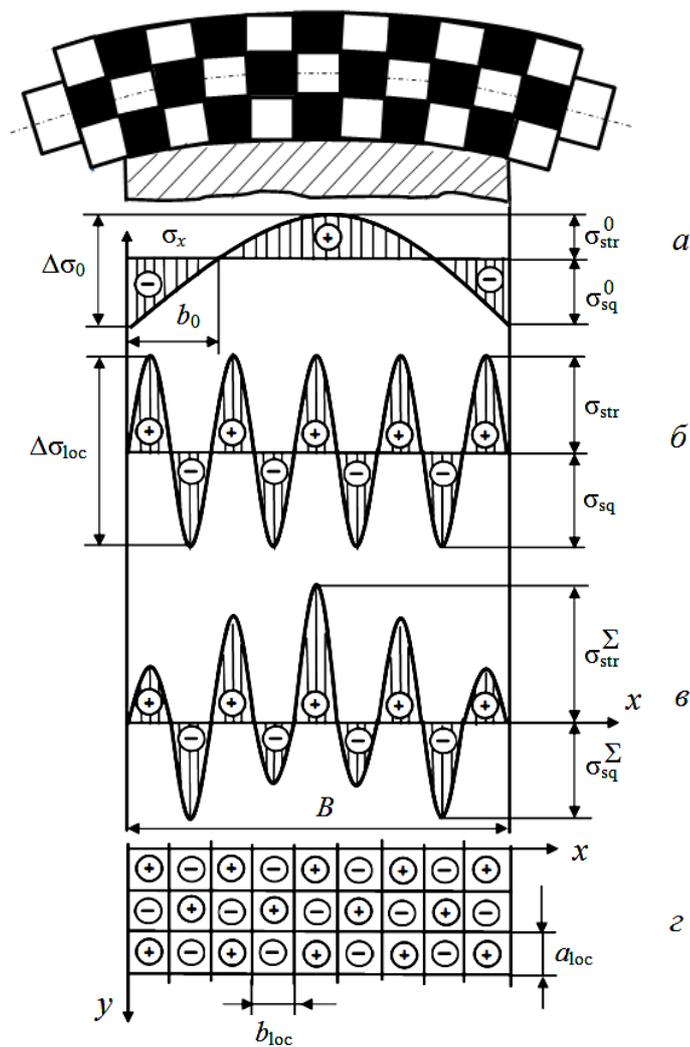


Рис. 1. Эпюры распределения остаточных напряжений в полосе после прокатки с дроблением деформаций по ширине и длине проката: *a* – от искажения активной образующей валков; *б* – от дробления деформаций; *в* – от совместного действия *a* и *б*; *г* – в плоскости полосы

При условиях тонколистовой прокатки допускаем, что на локальных участках полосы отсутствует поперечное течение металла.

Систему (7) последовательно решаем относительно размеров локальных участков a_{loc} , b_{loc} и неравномерности деформаций $\Delta\varepsilon_{loc}$ между ними, необходимых для получения полос, качественных по плоскостности и без нарушения сплошности.

Как видно из рис. 1,б, при условии большого числа локальных участков по ширине ($b_{loc} \ll B$) и равновесного состояния эпюры можно принять, что

$$\sigma_{str} = \frac{\Delta\sigma_{loc}}{2}, \quad (8)$$

где $\Delta\sigma_{loc}$ – неравномерность напряжений, возникающих от неравномерности деформаций $\Delta\varepsilon_{loc}$ между локальными участками.

Поскольку напряжения, возникающие в полосе вне очага деформации, находятся в упругой области и полоса сохраняет плоскую форму, величину $\Delta\sigma_{loc}$ определяем из выражения

$$\Delta\sigma_{loc} = E\Delta\varepsilon_{loc}. \quad (9)$$

Зная закон распределения напряжений по ширине полосы от деформации, например, валков, величину σ_{sq}^0 находим по формуле

$$\sigma_{sq}^0 = m\Delta\sigma_0. \quad (10)$$

Здесь m – коэффициент, зависящий от закона распределения напряжений по ширине полосы (например, для параболического закона $m = 2/3$, для синусоидального – $m = 1/2$); $\Delta\sigma_0$ – неравномерность напряжений между кромкой и серединой полосы (рис. 1,а), которую можно непосредственно измерить в полосе либо выразить через параметры неплоскостности, используя зависимость, полученную в работе [7]:

$$\Delta\sigma_0 = E \left(\frac{A_{max} \pi}{2\lambda_{max}} \right)^2, \quad (11)$$

где A_{max} , λ_{max} – соответственно максимальные амплитуда и период неплоскостности, которая может образовываться от неравномерности деформаций по ширине полосы (например, от деформации валков).

С использованием принципа суперпозиции (рис. 1,в), находим

$$\sigma_{sq}^{\Sigma} = \sigma_{sq}^0 + \sigma_{sq}. \quad (12)$$

Учитывая условия $b_{loc} \ll B$ и $|\sigma_{sq}| \cong \sigma_{str}$, определяем σ_{sq} аналогично (8).

Величину σ_{cr} находим из выражения (2) для участка полосы, наиболее склонного к потере плоской формы. Известно, что менее устойчив прикромочный участок. При этом с учетом моделей, проверенных практикой [7],

принимая, что коэффициент k_1 в этом случае определяется из условия, когда один из ненагруженных краев участка полосы зашпелен, а другой – свободен. Например, при $a_{loc}/b_{loc} = 1$ согласно [6] $k_1 = 1.7$.

Из рис. 1, в следует, что

$$\sigma_{str}^{\Sigma} = \sigma_{str}^0 + \sigma_{str} \quad (13)$$

или, с учетом натяжения полосы:

$$\sigma_{str}^{\Sigma} = \sigma_{str}^0 + \sigma_{str} + \sigma_u, \quad (14)$$

где σ_{str}^0 – максимальное растягивающее напряжение от неравномерности деформаций между кромками и серединой полосы, которое определяем аналогично σ_{sq}^0 из выражения (10).

Решая систему (7) относительно $\Delta\varepsilon_{loc}$, получаем:

– из условия дробления остаточных напряжений (3) с учетом (8)–(11):

$$\Delta\varepsilon_{loc} > 2m \left(\frac{A_{max}\pi}{2\lambda_{max}} \right)^2, \quad (15)$$

– из условия ненарушения сплошности полосы из (5) с учетом (14):

$$\Delta\varepsilon_{loc} < \frac{2}{E} \left[\sigma_t - \sigma_u - mE \left(\frac{A_{max}\pi}{2\lambda_{max}} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Из (15) и (16) следует, что допустимая величина неравномерности деформаций между локальными участками составляет

$$\Delta\varepsilon_{loc} = (\sigma_t - \sigma_u)/E. \quad (17)$$

Размеры локальных участков (приняв $a_{loc} = b_{loc}$) находим из (4) с учетом (2) и (12):

$$a_{loc} = b_{loc} < \left\{ \frac{k_1 k_2 h_1^2}{E \left[m \left(\frac{A_{max}\pi}{2\lambda_{max}} \right)^2 + \Delta\varepsilon_{loc}^*/2 \right]} \right\}^{1/2}, \quad (18)$$

где h_1 – толщина полосы после прокатки; $\Delta\varepsilon_{loc}^*$ – величина неравномерности деформаций между локальными участками, выбранная из интервала, определяемого неравенствами (15) и (16).

Максимально допустимые размеры локальных участков $[a_{max}]$ и $[b_{max}]$, которые не потеряют плоской формы, находим из (18), т.е. используя предельное состояние полосы, когда растягивающие напряжения близки к временным σ_t , а сжимающие – к критическим σ_{cr} :

$$[a_{\max}] = [b_{\max}] = h_1 \left[k_1 k_2 / (\sigma_t - \sigma_u) \right]^{1/2}. \quad (19)$$

На рис. 2 графически показана зависимость (19) при $\sigma_u = 0$ для алюминиевых ($E = 6.75 \cdot 10^4$ МПа, $\sigma_t = 168$ МПа) и стальных ($E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_t = 700$ МПа) полос [8]. Область выше прямых для соответствующего материала полосы свидетельствует о ее локальной неплоскостности, область ниже прямых – о плоском состоянии полосы.

Кроме того, приравнивая (15) и (16), получаем максимальные значения амплитуды неплоскостности, которую можно «подавить» дроблением деформаций, не нарушая сплошности полосы:

$$[A_{\max}] = \frac{2[\lambda_{\max}]}{\pi} \left[\frac{\sigma_t - \sigma_u}{2mE} \right]^{1/2}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что максимальная величина амплитуды неплоскостности, которую можно «подавить» дроблением деформаций, для стальных полос составляет 31.8 mm/m, для алюминиевых – 27.5 mm/m.

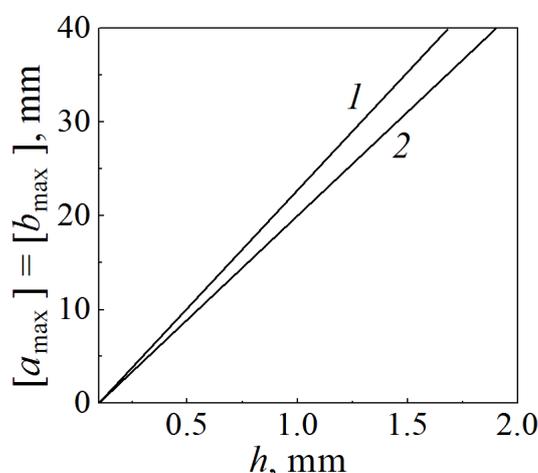


Рис. 2. Зависимость максимальных размеров локальных участков от толщины полосы: 1 – алюминиевой, 2 – стальной

Выводы

1. Разработан метод создания напряженно-деформированного состояния прокатанной полосы, повышающего ее устойчивость к потере плоской формы на основе принципа дробления деформаций. Обоснована более высокая эффективность расположения локальных участков сжимающих и растягивающих остаточных напряжений в шахматном порядке.

2. Предложены теоретические зависимости расчета параметров локальных участков при дроблении остаточных напряжений, установлены граничные условия получения полосы без дефектов.

3. Показаны предельные возможности стабилизации плоскостности при прокатке стальных и алюминиевых полос.

1. С.М. Бельский, И.П. Мазур, С.Н. Лежнев, Е.А. Панин, *Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке: монография*, КГИУ, Темиртау (2016).
2. А.И. Божков, *Известия ВУЗов. Черная металлургия* № 8, 44 (1998).
3. А.Б. Найзабеков, О.Н. Кривцова, А.С. Вивенцев, В.А. Талмазан, А.В. Горшкова, *Обработка материалов давлением* № 3, 164 (2012).
4. С.М. Бельский, Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, А.И. Гончаров, *Сталь* № 5, 52 (2013).
5. В.А. Николаев, С.В. Жученко, *Металл и литье Украины* № 6, 21 (2009).
6. А.С. Вольмир, *Устойчивость деформируемых систем: практическое пособие*, Наука, Москва (1967).

7. Ю.Д. Железнов, Прокатка ровных листов и полос, Металлургия, Москва (1971).
8. И.Н. Францевич, Ф.Ф. Воронов, С.А. Бакута, Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов, Наукова думка, Киев (1982).

E.A. Rudenko, S.V. Zakarlyuka, V.E. Goncharov, Y.I. Yurchenko

INCREASING RESISTANCE OF STRIP TO LOSS OF A FLAT FORM

A method is proposed for creating a stress-strain state of a strip that increases its resistance to loss of a flat shape based on the crushing deformations principle. It is shown that it's rational to stagger local sections of compressive and tensile residual stresses. Theoretical dependences of the parameters of local sections during crushing residual stresses are obtained. The boundary conditions for obtaining a defectless strip are defined. The limits of flatness stabilization are shown, when rolling steel and aluminum strips.

Keywords: strip, flatness stabilization, critical stresses, crushing of residual stresses, rolling

Fig. 1. Diagram of the distribution of residual stresses in the strip after rolling with crushing deformations along the width and length of the strip: a – from distortion of the active generatrix of the rolls; b – from crushing deformations; c – from joint contribution of a and b ; z – in the plane of the strip

Fig. 2. Strip thickness dependence of the maximum sizes of local sections: 1 – for aluminum strip, 2 – for steel strip