

УДК 621.77

Е.А. Максимов

ООО «Интрай» (г. Челябинск)

ВЗАИМОСВЯЗЬ КРИТЕРИЕВ И ЧАСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛОСКОСТНОСТИ И СЕРПОВИДНОСТИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Плоскостность является одним из важнейших показателей качества листового проката, прежде всего тонколистового. Улучшение рассматриваемого показателя обеспечивает более высокий уровень технологических и потребительских свойств, что способствует повышению качества и конкурентоспособности исследуемого вида металлопродукции.

В настоящее время широко распространено мнение о том, что дефекты плоскостности прокатываемых полос являются следствием неравномерности распределения коэффициента λ вытяжки по ширине очага деформации, или, без учета поперечной деформации, различия относительной поперечной разнотолщинности полосы в плоскости входа и выхода ее из очага деформации. При этом в качестве критерия плоскостности и отсутствия серповидности принимаются условия [1 – 3]

$$\lambda_y = \lambda = \text{const} \text{ или } \Delta\lambda_y/\lambda = 0; \quad (1)$$

$$h_0/h_1 = \text{const} \text{ или } \Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 = 0, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda_y$ и λ – неравномерная и средняя величина коэффициента вытяжки по ширине полосы; Δh_{0y} и Δh_{1y} – поперечная разнотолщинность полосы в плоскости входа и выхода очага деформации; h_0 и h_1 – толщина полосы в плоскости входа и выхода очага деформации, средняя по ширине полосы.

Условия (1) и (2) называются деформационным критерием плоскостности.

Анализ существующих методик контроля и оценки плоскостности полос позволил выявить следующие допущения и закономерности, используемые в теории формоизменения:

- деформация в ее очаге пластическая, на свободных участках прокатанной полосы – упругая; для определения изменения неравномерности остаточных напряжений по ширине полосы используются уравнения теории упругости;

- принимается допущение о плоской схеме очага деформации, то есть об отсутствии поперечной деформации;

- нарушение плоскостности прокатанной полосы происходит только на переднем конце полосы, задний ее конец сохраняет планшетную форму.

Рассмотрим кинематический критерий плоскостности [4], математическая запись которого может быть выражена следующим образом:

– для плоскости входа в очаг деформации

$$V_{0x}(y, z) = V_{0c} = \text{const}, \quad V_{0y} = 0, \quad V_{0z} = 0; \quad (3)$$

– для плоскости выхода из очага деформации

$$V_{1x}(y, z) = V_{1c} = \text{const}, \quad V_{1y} = 0, \quad V_{1z} = 0, \quad (4)$$

где $V_{0x}(y, z)$ и $V_{1x}(y, z)$ – неравномерная по толщине и ширине полосы продольная составляющая скорости частиц металла в плоскости входа и выхода из очага деформации; V_{0c} и V_{1c} – средняя по толщине и ширине полосы продольная составляющая скорости частиц металла в плоскости входа и выхода из очага деформации.

Условие (3) называется кинематическим критерием плоскостности для заднего конца полосы, выражение (4) – кинематическим критерием плоскостности для переднего конца полосы.

В зависимостях (3) и (4) первые выражения характеризуют прямолинейное движение заднего и переднего концов полосы вдоль продольной оси прокатки, а вторые и третьи уравнения характеризуют отсутствие перемещение полосы в горизонтальном и вертикальном направлениях (изгиб, поворот, серповидность).

Условие прокатки полосы с идеальной прямолинейной геометрической формой ее концов (критерий плоскостности) может быть сформулировано следующим образом: передний и задний концы полосы будут оставаться прямолинейными, если для поперечного сечения полосы на входе и выходе из валков эпюра продольной составляющей скорости металла по толщине и ширине полосы будет равномерной, а поперечная и вертикальная составляющая скорости частиц металла будут отсутствовать.

Таким образом, кинематический критерий плоскостности определяется равенством эпюры продольной составляющей скорости по толщине и ширине полосы, а дефекты формы ее концов определяются неравномерностью продольной составляющей скорости частиц металла на границах входа и выхода очага деформации.

Основы теории состоят в том, что формоизменение переднего и заднего концов полосы определяются соответствующим характером неравномерности продольной составляющей скорости металла по толщине и ширине полосы в плоскостях входа и выхода очага

деформации. Зависимости (3) и (4) представляют собой математическую запись кинематического критерия плоскостности, впервые предложенного в работе [4].

Известно, что изменение продольной скорости металла по ширине полосы на выходе из валков в общем случае неоднозначно связано с изменением коэффициента вытяжки и относительным обжатием полосы, поскольку характер этой взаимосвязи определяется не только поперечным профилем полосы до и после прокатки, но и другими ее условиями, в частности, изменением кинематики процесса прокатки в поперечном направлении.

Рассмотрим изменение неравномерности продольной составляющей скорости по ширине полосы на выходе из валков, а также взаимосвязь деформационного и кинематического критериев плоскостности. С этой целью запишем условие постоянства секундных объемов для элементарной продольной полоски шириной dB_0 и толщиной h_0 в плоскости входа, шириной dB_1 и толщиной h_1 в плоскости выхода:

$$V_0 h_0 dB_0 = V_1 h_1 dB_1. \quad (5)$$

Решая последнее равенство относительно продольной скорости металла на выходе из валков, получим

$$V_1 = \frac{h_0 dB_0}{h_1 dB_1} = \lambda V_0. \quad (6)$$

Для анализа изменения неравномерности продольной составляющей скорости по ширине полосы на выходе из валков, а также критерия плоскостности запишем полный дифференциал функции V_1

$$dV_1 = \frac{\partial V_1}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial V_0}{\partial V_0} dV_0, \quad (7)$$

который после подстановки частных производных, вычисленных согласно равенству (6), примет вид

$$dV_1 = V_0 d\lambda + \lambda dV_0. \quad (8)$$

Поделив последнее равенство на продольную скорость V_1 полосы на выходе из валков, получим

$$\frac{dV_1}{V_1} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dV_0}{V_0}. \quad (9)$$

При замене дифференциалов конечными приращениями фактических значений параметров их средними значениями, будем иметь

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta V_0}{V_0}. \quad (10)$$

Из последнего выражения, следует, что для элементарной полоски изменение продольной составляющей

скорости металла по ширине полосы на выходе из валков возможно не только за счет изменения коэффициента вытяжки по ширине очага деформации, но и за счет изменения продольной составляющей скорости металла по ширине полосы на входе в валки. Неравномерность последней, как будет показано ниже при анализе поля скоростей, определяется не только изменением толщины полосы на входе и выходе полосы из валков, но и другими параметрами процесса прокатки.

Условие (10) может быть использовано для анализа критериев плоскостности прокатываемых полос.

С учетом уравнения (4) кинематический критерий плоскостности запишем в виде

$$\Delta V_1 / V_1 = 0. \quad (11)$$

Анализ показал, что кинематический (4) и деформационный (1) критерии плоскостности тождественны при выполнении условия равенства продольной составляющей скорости металла в плоскости входа по ширине полосы ($\Delta V_0 = 0$):

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 0. \quad (12)$$

Таким образом, деформационный критерий плоскостности в общем случае не может являться показателем плоскостности листового металла.

Судить о плоскостности полосы по распределению коэффициента вытяжки можно лишь приближенно, полагая, что в плоскости входа металл имеет одинаковую продольную скорость по ширине полосы.

Запишем коэффициент вытяжки для элементарной продольной полоски шириной dB_1 в виде

$$\lambda = \frac{h_0 dB_0}{h_1 dB_1} = \frac{h_0}{h_1} \beta, \quad (13)$$

где $\beta = dB_0 / dB_1$ – поперечная деформация элементарной полоски в очаге деформации.

Полный дифференциал коэффициента λ вытяжки имеет вид

$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial h_0} dh_0 - \frac{\partial \lambda}{\partial h_1} dh_1 - \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} d\beta. \quad (14)$$

После определения частных производных и перехода к конечным разностям уравнение (14) может быть приведено к виду

$$\frac{\Delta \lambda_y}{\lambda} = \frac{\Delta h_{0y}}{h_0} - \frac{\Delta h_{1y}}{h_1} - \frac{\Delta \beta}{\beta}, \quad (15)$$

где $\Delta \beta$ – приращение коэффициента поперечной деформации.

Подставляя выражение (15) в формулу (10), получим более развернутое выражение для определения не-

равномерности продольной составляющей скорости по ширине полосы на выходе из валков

$$\frac{\Delta V_{1y}}{V_1} = \frac{\Delta h_{0y}}{h_0} - \frac{\Delta h_{1y}}{h_1} - \frac{\Delta \beta}{\beta} + \frac{\Delta V_{0y}}{V_0}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) также следует, что при выполнении условий $\Delta \beta = 0$ и $\Delta V_0 = 0$ кинематический критерий плоскостности приводится к деформационному

$$\frac{\Delta V_{1y}}{V_1} = \frac{\Delta h_{0y}}{h_0} - \frac{\Delta h_{1y}}{h_1} = 0. \quad (17)$$

Другими словами, деформационный критерий (2) плоскостности является частным случаем кинематического (4).

Частные показатели плоскостности полос, вытекающие из условия (16), представлены в таблице.

В работе [6] показано, что серповидность лент определяется изменением кинематики процесса прокатки между правой и левой кромками полосы.

Рассмотрим более подробно частные показатели плоскостности, приведенные в таблице, которые могут быть использованы для оценки геометрической формы полосы для различных случаев процесса листовой прокатки.

1. Если принимается допущение условия равенства продольной составляющей скорости металла в плоскости входа по ширине полосы $\Delta V_{0y} = 0$, то оценка плоскостности полос может проводиться по изменению коэффициента вытяжки по ширине образца $\Delta \lambda_y / \lambda$.

В существующих работах [1 – 3] оценка плоскостности полосы проводится по следующей методике:

– определяется относительная неравномерность коэффициента вытяжки по ширине полосы;

– с использованием математического аппарата теории упругости определяется неравномерность остаточных растягивающих и сжимающих, взаимоуравновешенных по ширине полосы;

– эпюра остаточных напряжений по ширине полосы на выходе из валков накладывается на равномерную эпюру удельных натяжений, создаваемую, например, моталкой или последующими клетями непрерывного стана, и определяется результирующая эпюра изменения удельного натяжения по ширине полосы для переднего ее конца; на результирующей эпюре удельных натяжения по ширине полосы определяется зона сжимающих напряжений;

– с использованием теории изгиба тонких прямоугольных пластинок в упругой области по статическому либо энергетическому критерию изгиба тонких пластинок определяются критические сжимающие напряжения;

– если продольные напряжения сжатия в зоне сжимающих напряжений превышают критическую величину, то делается вывод о нарушении плоской формы, в противоположном случае полоса имеет планшетную форму.

В соответствии с существующей методикой, рассмотренной в работе [5], в качестве критерия плоскостности прокатываемых полос рекомендуется принимать относительную разность коэффициентов вытяжки центрального и краевых участков полосы:

$$\Delta \lambda_y = \frac{(\lambda_{ц} - \lambda_{кр})}{\lambda} 100 \%, \quad (18)$$

где $\lambda_{ц}$, $\lambda_{кр}$, и λ – коэффициенты вытяжки для центрального, краевых участков полосы и средний по ширине полосы.

Частные показатели плоскостности и серповидности листов, полос и лент вытекающие из кинематического условия (16)

Условия прокатки	Показатели плоскостности полосы
1. Продольная скорость ΔV_{0y} металла на входе в валки равномерна по ширине полосы	$\Delta \lambda_y / \lambda$ соответствует существующей методике
2. Коэффициент вытяжки по ширине очага деформации постоянный, то есть $\Delta \lambda_y / \lambda = 0$	$\Delta V_{0y} / V_0$
3. Поперечная деформация по ширине очага деформации отсутствует: $\Delta \beta = 0$ (плоская схема очага деформации)	$\Delta h_{0y} / h_0 - \Delta h_{1y} / h_1 + \Delta V_{0y} / V_0$
4. Продольная скорость металла на входе в валки по ширине полосы равномерна ($\Delta V_{0y} = 0$); поперечная деформация по ширине полосы отсутствует ($\Delta \beta = 0$)	$\Delta h_{0y} / h_0 - \Delta h_{1y} / h_1$ соответствует существующей методике
5. Продольная скорость ΔV_{0y} металла на входе в валки равномерна по ширине полосы	$\Delta h_{0y} / h_0 - \Delta h_{1y} / h_1 + \Delta \beta / \beta$
6. Равенство относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков ($\Delta h_{0y} / h_0 = \Delta h_{1y} / h_1$)	$\Delta \beta / \beta + \Delta V_{0y} / V_0$
7. Равенство относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков ($\Delta h_{0y} / h_0 = \Delta h_{1y} / h_1$) и равномерность по ширине полосы продольной скорости металла на входе в валки ($\Delta V_{0y} = 0$)	$\Delta \beta / \beta$

Коэффициенты вытяжки на соответствующих участках ширины полосы определяется по результатам замеров расстояний между поперечными рисками:

$$\lambda_i = L_{1i}/L_{0i}, \quad (19)$$

где L_{1i} и L_{0i} – длина темплета до и после прокатки на измеряемом участке ширины полосы.

Таким образом, оценки неравномерности деформации по ширине полосы определяются как относительная разность коэффициента вытяжки между центральным и краевыми участками полосы.

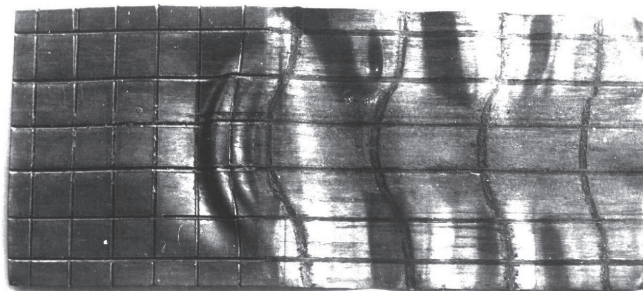
2. Если принимается условие равенства коэффициента $\Delta\lambda_y/\lambda = 0$ вытяжки по ширине полосы, то о плоскостности полосы можно судить по изменению параметра $\Delta V_{0y}/V_0$ по ширине полосы.

При условии равенства коэффициента $\Delta\lambda_y/\lambda = 0$ вытяжки по ширине полосы и неравномерности коэффициента $\Delta f/f$ трения по ширине полосы оценку формы переднего конца полосы можно проводить в соответствии с частным показателем плоскостности полосы $\Delta V_{1y}/V_1 = \Delta V_{0y}/V_0$.

Для рассматриваемого случая прокатки [6] на двухвалковом стане 200 были прокатаны образцы размером 72×1,69 мм из свинца с прямоугольным поперечным профилем на цилиндрических закаленных валках с одинаковым коэффициентом $\lambda = 1,52$ вытяжки по ширине полосы и лучшими условиями трения по середине очага деформации. В этом случае сведено к минимуму влияние изгиба и сплющивания валков на поперечный профиль и плоскостность образца, а также обеспечено условие $\Delta\lambda_y/\lambda = 0$. В этом случае, наблюдается нарушение плоской формы образца на участке перед валками в виде, представленном на рисунке.

Аналогичные явления нарушения плоскостности на входе в валки в виде дефекта формы «елочка» часто наблюдаются при прокатке жести на четырехвалковых станах, а также фольги из тонколистовой стали двадцативалковых станах.

Так, при прокатке полос из коррозионностойкой стали толщиной 0,5 – 0,8 мм, шириной 1030 мм на двадцативалковом стане 1700 ОАО «Мечел» на входе в валки наблюдается дефект плоской формы в виде «елочка».



Образец, прокатанный на цилиндрических валках с лучшими условиями трения по его середине

3. Если принимается допущение об отсутствии поперечной деформации $\Delta\beta = 0$ по ширине полосы (деформация плоская), то для оценки плоскостности полосы может быть использовано изменение параметра $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta V_{0y}/V_0$.

4. Если принимается условие равенства продольной составляющей скорости металла в плоскости входа по ширине полосы $\Delta V_{0y} = 0$ и допущение об отсутствии поперечной деформации $\Delta\beta = 0$ по ширине полосы (деформация плоская), то для оценки плоскостности полосы может быть использован показатель $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1$. Такой случай соответствует прокатке широких ($h_1/B \leq 0,0012$) полос.

В соответствии с существующей методикой [1 – 3] определяется разность относительной поперечной разнотолщинности на входе и выходе из валков.

По закону Гука определяется неравномерность взаимоуравновешенных (растягивающих и сжимающих) остаточных продольных напряжений по ширине полосы:

$$\delta\sigma_{\text{ост}} = E \left(\frac{\Delta h_{0y}}{h_0} - \frac{\Delta h_{1y}}{h_1} \right), \quad (20)$$

где E – модуль упругости материала прокатываемых полос.

Путем сравнения продольных сжимающих напряжений с их критической величиной проводится оценка формоизменения полосы (краевая, центральная, местная волнистость).

Измерения неравномерности удельных натяжений по ширине полос (0,8×1000; 1,0×1250; 1,5×1200; 2,0×1015 мм) после четвертой клетки стана 1700 ОАО «Северсталь» показали, что они изменяются в диапазоне $54 \leq \delta\sigma_{\text{ост}} \leq 150$ Н/мм² [3].

Далее, путем сравнения продольных сжимающих напряжений с их критической величиной, делается вывод о геометрической форме полосы.

В работе [7] рассматривается горячая прокатка толстого листа стали СтЗсп на реверсивном четырехвалковом стане 2300 ОАО «Мечел» типоразмером 6,0×1400; 7,0×1950; 16,0×1500; 16,0×1800 мм. Изменение поперечной деформации по ширине листа определяется в виде относительной разницы коэффициента вытяжки между средними и краевыми его участками. При прокатке толстолистовой стали опытным путем получено условие плоскостности:

$$\frac{\Delta\lambda_y}{\lambda} = \left| \frac{\lambda_c - \lambda_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}}} \right| \leq 1,7 \left(\frac{h}{B} \right)^{0,8}, \quad (21)$$

где λ_c и $\lambda_{\text{кр}}$ – коэффициент вытяжки по середине и краям листа; h и B – толщина и ширина переднего конца листа.

5. Если принимается условие равенства относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и

выходе из валков ($\Delta h_{0y}/h_0 = h_{1y}/h_1$), то о плоскостности полосы можно судить по изменению показателя $\Delta\lambda_y/\lambda = \Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta\beta/\beta$ по ширине ленты.

Известно, что при прокатке лент ($h_1/B \leq 0,02$) с уменьшением их ширины поперечная деформация и абсолютное уширение увеличивается. В работе [8] рассматривается прокатка ленты из стали 10, исходной толщиной $h_0 = 3$ мм, шириной $B = 80$ мм, с относительным обжатием $e = 30\%$, с клиновидным профилем подката $0,005 - 0,006$ мм в цилиндрических валках радиусом $R = 200$ мм. В результате опытов установлено, что уширение составило $0,82\%$.

Таким образом, при наличии поперечной разнотолщинности на входе и выходе из валков, а также поперечной деформации для оценки дефекта (серповидности) формы необходимо пользоваться показателем $\Delta\lambda_y/\lambda = \Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta\beta/\beta$.

6. Если принимается условие равенства относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков ($\Delta h_{0y}/h_0 = h_{1y}/h_1$) и равенства продольной составляющей скорости металла в плоскости входа по ширине полосы ($\Delta V_{0y} = 0$), то о плоскостности полосы можно судить по изменению показателя $\Delta V_{1y}/V_1 = \Delta\beta/\beta$ по ширине полосы.

В заключении отметим, что для общего случая процесса прокатки листовой стали, для оценки плоскостности прокатываемых полос, листов и лент может быть использовано изменение показателя $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 - \Delta\beta/\beta + \Delta V_{0y}/V_0$ по ширине полосы.

Выводы. Проведенный анализ существующих методов контроля и оценки плоскостности листов, полос и лент, а также критерия плоскостности и отсутствия серповидности показал, что на практике показателем плоскостности полос принимается относительная неравномерность коэффициента вытяжки по ширине полосы или разность относительной поперечной разнотолщинности на входе и выходе из валков. Исследован новый кинематический критерий плоскостности и отсутствия

серповидности. Показано, что существующий деформационный критерий плоскостности является частным случаем кинематического. Показано, что для оценки плоскостности и отсутствия серповидности прокатываемых полос и лент могут быть использованы частные показатели, в том числе для лент – различие относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков и неравномерность поперечной деформации по ширине полосы $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta\beta/\beta$, различие относительной поперечной разнотолщинности полосы на входе и выходе из валков и равенства продольной составляющей скорости металла в плоскости входа по ширине полосы $\Delta h_{0y}/h_0 - \Delta h_{1y}/h_1 + \Delta V_{0y}/V_0$, которые могут быть использованы для оценки плоскостности и серповидности прокатываемых листов, полос и лент для различных случаев прокатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суяров Д.И., Беньковский М.А. Качество тонких стальных листов – М.: Металлургия, 1964. – 236 с.
2. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. – М.: Металлургия, 1971. – 200 с.
3. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки / Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А. и др. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
4. Выдрин В.Н. – В кн.: Теория и технология прокатки. Сб. науч. тр. Челябинского политех. ин-та. – Челябинск: изд. ЧПИ, 1972. № 102. С. 208 – 219.
5. Третьяков А.В., Зиновьев Е.Г., Зуев Б.П. и др. // Сталь. 1980. № 9. С. 628 – 631.
6. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. – М.: Теплотехник, 2008. – 336 с.
7. Дегтяренко В.К., Соколов В.А., Зуев С.А. // Сталь. 1979. № 11. С. 855.
8. Салганик В.М., Песин А.М., Куницын Г.А. и др. – В кн.: Процессы и оборудование металлургического производства. Межрегиональный сб. науч. тр. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2009. № 9. С. 113 – 117.

© 2012 г. Е.А. Максимов
Поступила 7 февраля 2011 г.

УДК 621.771.01

А.В. Сатонин, С.С. Настоящая, В.А. Переходченко

Донбасская государственная машиностроительная академия (г. Краматорск)

ДВУХМЕРНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ОСОБО ТОНКИХ ЛИСТОВ И ПОЛОС

Одной из основных тенденций развития технологий и оборудования широкополосных станов горячей прокатки (ШСП) является расширение сортамента и повышение качества готовой металлопродукции, в том числе и за счет производства высокоточных особо тонких го-

рячекатаных полос толщиной менее 1,2 мм [1]. Вместе с тем, условия реализации, имеющие место в этом случае технологической схемы, обуславливают значительное повышение соотношения общей протяженности очага деформации l_d и средней толщины полосы h_{cp} в послед-