

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

А.П. Пелленен

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Процесс несимметричной прокатки с различными окружными скоростями вращения рабочих валков расширяет технологические возможности станов холодной прокатки. За счет снижения контактных нормальных напряжений в очаге деформации уменьшаются упругие деформации валков, что позволяет использовать процессы несимметричной прокатки для получения тончайших полос и фольги. Однако минимальная толщина для этих процессов ограничивается контактом валков на краях бочек, что не допустимо, так как это обстоятельство приводит к резкому возрастанию усилия прокатки, повышению температуры валков на краях бочек, дополнительным термическим напряжениям и выходу валков из строя. Целью исследования по минимальной толщине полосы при несимметричной прокатке является установление особенностей ее достижения и оценка расчетных и экспериментальных данных. При этом под минимальной толщиной полосы в проходе при несимметричной прокатке понимается такая толщина, при которой рабочие валки вследствие их радиальной деформации и изгиба приходят в контакт на краях бочек. Установлено, что минимальная толщина при несимметричной прокатке, в частности при прокатке-волочении, в 2–3 раза меньше по сравнению с обычным процессом прокатки. При этом чем меньше вытяжка полосы в проходе, тем меньшую толщину полосы можно получить. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений минимальной толщины полосы при прокатке-волочении, которое подтвердило возможность использования инженерных методик для определения минимальной толщины полосы в проходе из условия контакта валков на краях бочек.

Ключевые слова: холодная прокатка полосы, минимальная толщина, обычная прокатка, несимметричная прокатка, прокатка-волочение, экспериментальное исследование.

По результатам опытных прокаток и теоретических исследований [1–5] установлено, что при несимметричной прокатке полосы (НП) в валках, вращающихся с различными окружными скоростями, при определенных условиях (толщине полосы, сопротивлении материала деформации и т. д.) возможная вытяжка полосы будет ограничиваться контактом валков на краях бочек, а полоса может быть прокатана до определенной минимальной толщины.

Таким образом, под минимальной толщиной полосы в проходе при несимметричной прокатке понимается такая толщина, при которой рабочие валки вследствие их радиальной деформации и изгиба приходят в контакт на краях бочек.

Анализ существующих методик для обычного процесса прокатки для определения минимальной толщины полосы [6, 7] и, соответственно, диаметра рабочего валка для несимметричных процессов прокатки не применимы, так как не учитывают их особенностей.

Целью исследования по минимальной

толщине полосы при несимметричной прокатке является установление особенностей ее достижения и оценка расчетных и экспериментальных данных.

Методика исследования и аппаратура

Экспериментальное исследование минимальной толщины полосы проводилось на опытном стане Дуо-200 ЮУрГУ (НИУ) с диаметром рабочих валков 180 мм и длиной бочки валков 200 мм.

Для определения контакта валков на краях бочек на одном из рабочих валков были установлены изолированные от тела валка стальные кольца. Схема их установки показана на рис. 1. Ширина колец составляла 5 мм, а внутренний диаметр 170 мм. Выполненные на краях бочек проточки для установки колец какого-либо влияния на изгиб валков оказывать не могут. Стальные изолированные кольца, установленные на нижнем рабочем валке, включены в электрическую схему. Напряжение к кольцам (4,5 В) подводилось с помощью скользящих контактов.

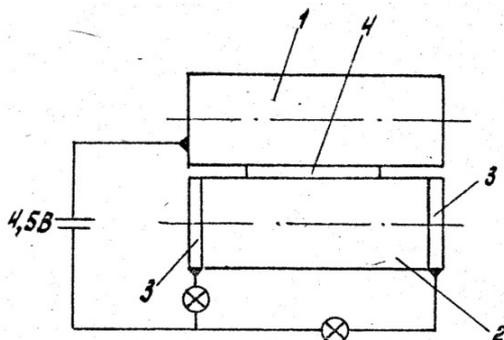


Рис. 1. Схема для определения контакта валков на краях бочек: 1, 2 – верхний и нижний рабочие валки; 3 – изолированные кольца; 4 – полоса

Согласно схеме, изображенной на рис. 1, при определенной толщине полосы в результате радиальной деформации валков в очаге деформации и изгиба валков при касании колец бочки верхнего рабочего валка электрическая цепь замыкается и электрическая лампочка загорается.

Для контроля величины межвалкового зазора и особенностей ее изменения в процессе прокатки рядом с полосой прокатывались свинцовые «свидетели» [8] из сплава С1 ГОСТ 3778–98.

Исходная толщина «свидетелей» (h_c) подбиралась таким образом, чтобы она была на 5–10 % больше толщины полосы на выходе из валков. Толщина полосы и «свидетелей» измерялась толщиномером с точностью 0,5 мкм.

В исследовании особенностей минимальной толщины полосы при несимметричной прокатке устанавливали влияние следующих параметров:

K_v – отношение окружных скоростей вращения валков ($K_v = V_{в1}/V_{в0}$, $V_{в1} \geq V_{в0}$, $V_{в1}$, $V_{в0}$ – окружные скорости валков);

λ – вытяжки полосы в проходе; $\lambda = h_0/h_1$ (h_0 , h_1 – толщина полосы до и после прохода соответственно);

σ_s – сопротивления деформации прокатываемого материала.

Отношение скоростей вращения валков достигалось путем изменения передаточного отношения шестерен в шестеренной клетке привода валков. При прокатке использовались зубчатые пары с передаточными соотношениями 1; 1,07; 1,18; 1,45.

Влияние сопротивления деформации прокатываемого материала устанавливалось использованием полос с резко отличающимися прочностными характеристиками. В исследовании применялись отожженные полосы из ста-

лей 08КП толщиной 0,3 и 0,5 мм и 12Х18Н10Т толщиной 0,5 мм. Ширина полос $b = 50$ мм.

Исследование было проведено в несколько этапов. На первом этапе осуществлена прокатка полос из стали 08КП $h_0 \times b = 0,3 \times 50$ мм обычным способом (ОП) и с рассогласованием скоростей вращения валков (НП) при максимальном усилии прокатки для стана Дуо-200 ($P_{\max} = 370$ кН) до образования контакта валков на краях бочек валков.

На втором этапе прокатывались полосы из сталей 08КП и 12Х18Н10Т способом прокатка-волочение (ПВ, [9]) $V_{в1}/V_{в0} = \lambda$, $V_{в1} = V_1$ (здесь V_1 – скорость полосы на выходе из валков) и обычным способом до образования контакта валков на краях бочек. Прокатка полос обычным способом прокатки осуществлялась при максимальных усилиях для стана.

На третьем этапе для оценки влияния контакта валков на краях бочек при обычном способе прокатки один из валков на длине 70 мм с каждого края бочки был шлифован на меньший диаметр на величину 0,4 мм. Прокатка полос осуществлялась при максимальном усилии прокатки до минимально-возможной ее толщины. За условие достижения такой толщины при ОП принимались такие, при которых при прокатке за три прохода толщина полосы не уменьшалась.

Усилие прокатки в исследовании измерялось месдозами, установленными под нажимными винтами.

Прокатка полос осуществлялась с использованием масла П-28 и натяжением концов полосы.

Результаты экспериментального исследования, приведенные на рис. 2–5, позволяют выявить следующие особенности.

1. Создание рассогласования скоростей вращения валков обеспечивает интенсификацию режимов обжатий. При этом контакт валков на краях бочек достигается за меньшее число проходов. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 2, при прокатке полос из стали 08КП. При прокатке полосы при максимальном усилии прокатки для стана Дуо-200 при ОП контакт валков достигается за 4 прохода, а при НП – за 2 прохода.

Возможность интенсификации режимов обжатий при НП объясняется уменьшением подпирющего действия сил трения. Достаточно детально с позиций напряженно-деформированного состояния прокатываемого металла этот вопрос рассмотрен в работе [9].

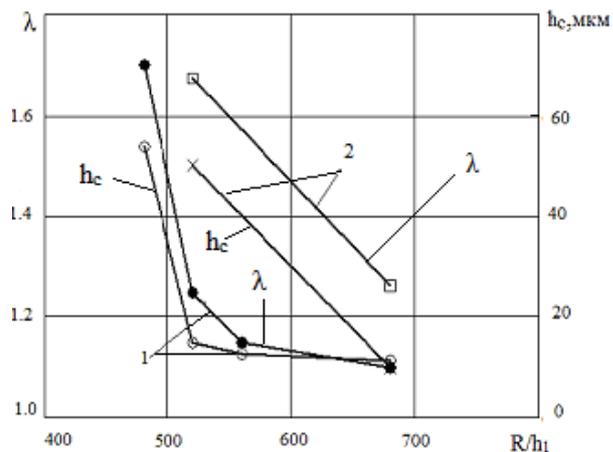


Рис. 2. К анализу начала контакта валков на края бочек: $P_{max} = 370 \text{ кН} = \text{const}$; 1 – $K_p = 1$ за 4 прохода; 2 – $K_p = 1,07$ за 2 прохода; сталь 08КП; $h_0 \times b = 0,3 \times 50 \text{ мм}$

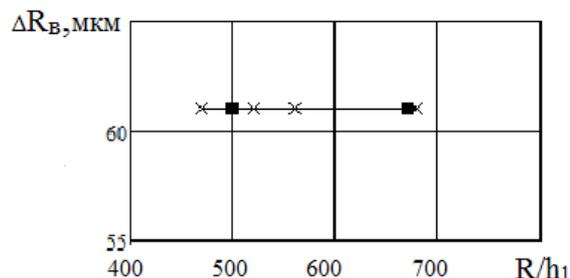


Рис. 3. Радиальная деформация валков при ОП и НП с одинаковыми усилиями прокатки: ■ – $K_p = 1,07$; × – $K_p = 1,0$; $P = 370 \text{ кН}$; сталь 08КП; $h_0 \times b = 0,3 \times 50 \text{ мм}$

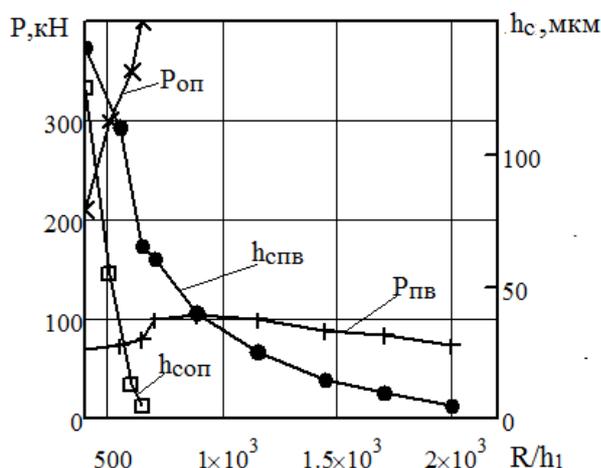


Рис. 4. Зависимость усилия прокатки и величины меж-валкового зазора при ПВ и ОП с одинаковыми вытяжками в проходах: сталь 08КП; $h_0 \times b = 0,3 \times 50 \text{ мм}$; $\lambda = 1,18$

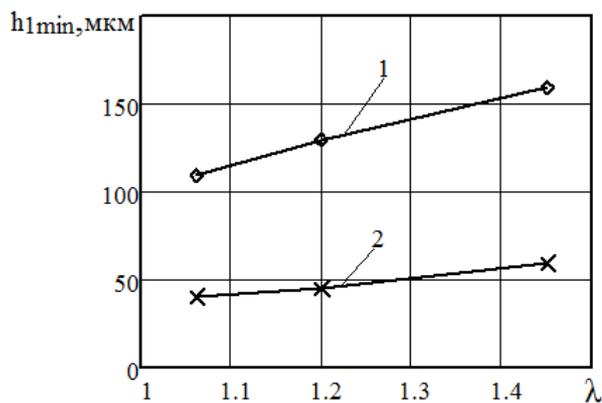


Рис. 5. Зависимость h_{1min} при ПВ с одинаковыми вытяжками в проходе: 1 – сталь 12X18H10T; 2 – сталь 08КП; $h_0 \times b = 0,5 \times 40 \text{ мм}$

Здесь следует отметить, что при прокатке полос ОП и НП при одинаковых усилиях прокатки контакт валков на краях бочек начинается при одной и той же толщине. В данном случае для условий прокатки, показанных на рис. 2, контакт валков возникает при толщине 0,13 мм.

Следует также отметить, что при ОП и НП при деформации полосы с одинаковыми усилиями прокатки в проходах, равных 370 кН, величина радиальной деформации валков, определяемая по выражению ($\Delta R_b = 0,5(h_1 - h_c)$), постоянна (рис. 3).

2. Максимальное снижение усилия прокатки по сравнению с обычным способом прокатки достигается при процессе ПВ. Так, согласно данным, представленным на рис. 4, при прокатке полосы с одинаковыми вытяжками в проходах, равными $\lambda = 1,18$, усилие

прокатки при ПВ от прохода к проходу изменяется в диапазоне 60–100 кН, что существенно меньше допустимых значений для стана Дуо-200.

Поскольку при ОП усилия прокатки практически в 3 раза выше, чем при ПВ, то и контакт валков на краях бочек возникает при толщине, в три раза большей. При ПВ контакт валков достигается при $R/h_1 = 2000$ ($h_1 = 0,045 \text{ мм}$), а при ОП – при $R/h_1 = 670$ ($h_1 = 0,13 \text{ мм}$). Совершенно очевидно, что большее усилие прокатки при ОП вызывает и большую радиальную деформацию и изгиб валков по сравнению с ПВ.

3. Увеличение вытяжки полосы при ПВ в проходе приводит к возрастанию усилия прокатки и упругих деформаций валков. При этом минимальная толщина полосы возрастает (рис. 5).

Так, при прокатке стали 08КП $h_0 \times b = 0,3 \times 50$ мм при $\lambda = 1,18$, $h_{1\min} = 0,045$ мм, а при $\lambda = 1,45$ – $h_{1\min} = 0,06$ мм, т. е. в 1,3 раза больше. Таким образом, чем меньше вытяжка полосы в проходе при ПВ, тем меньшую минимальную толщину полосы можно достичь.

С увеличением сопротивления металла полосы возрастает усилие прокатки и упругие деформации валков. В связи с этим толщина полосы, при которой возникает контакт валков на краях бочек, возрастает. Как видно из данных, приведенных на рис. 5, для полосы из стали 08КП контакт валков возникает при толщинах в 2,5 раза меньших, чем для полосы из стали 12Х18Н10Т. На такую же величину сопротивление деформации стали 08КП меньше по сравнению со сталью 12Х18Н10Т [10].

4. Экспериментальные данные по прокатке полосы способом ПВ и ОП говорят о том, что контакт валков при ПВ достигается при толщине в 2,5–3 раза меньше, чем при обычном способе прокатки.

5. Образование контакта валков на краях бочек вызывает резкое увеличение усилия прокатки [6]. Однако для условий стана Дуо-200 его устранение при обычном процессе прокатки позволяет снизить минимальную толщину ненамного. Так, если при прокатке стали 08КП с исходными размерами $h_0 \times b = 0,3 \times 50$ мм при наличии контакта на краях бочек достигнута минимальная толщина 0,13 мм, то устранение контакта валков (по существу длина бочки после шлифовки была

равна 60 мм) позволило достичь минимальную толщину полосы 0,10 мм, т. е. в 1,3 раза меньше.

Таким образом, для достижения меньшей толщины полосы при обычном способе прокатки возможно устранение краевого контакта валков. Однако на практике это мероприятие практически не используют. Как правило, применяют валки меньшего диаметра и, естественно, станы, в которых обеспечивается требуемая прочность валкового узла [11]. Однако наиболее эффективным мероприятием по получению полос меньшей толщины и расширения технических возможностей действующих станов является применение несимметричных процессов прокатки с различными окружными скоростями, частным случаем которых считается процесс ПВ [9, 12].

6. В таблице приведены расчетные и экспериментальные данные минимальной толщины полосы при ПВ. Расчеты выполнены по методике, изложенной в работе [13].

Формула для определения минимальной толщины полосы в проходе при ПВ, при которой возникает контакт валков на краях бочек, имеет вид

$$h_{1\min} = 2DK_c^2 \left[\frac{8(\Theta_B + \Theta_{II})}{K_c} + \lambda - 1 \right] \times \left[1,15\sigma_{sc} \left(1 - \frac{\ln \lambda}{2} \right) - \sigma_0 \right]^2, \quad (1)$$

где Θ_B, Θ_{II} – параметры, учитывающие упругие характеристики валков и полосы:

Экспериментальные и расчетные значения $h_{1\min}$ при ПВ для стана Дуо-200 ЮУрГУ ($D_B = 180$ мм)

№	Материал	σ_{sc} , МПа	λ	$h_{1\min}^3$, мм	$h_{1\min}^p$, мм	$h_{1\min}^3/h_{1\min}^p$
1	Сталь 08КП $h_0 \times b = 0,3 \times 50$ мм	675	1,18	0,045	0,04	1,13
		695	1,45	0,06	0,05	1,2
		720	1,07	0,04	0,05	0,8
2	Сталь 08КП $h_0 \times b = 0,5 \times 40$ мм	695	1,45	0,06	0,05	1,2
3	Сталь 12Х18Н10Т $h_0 \times b = 0,5 \times 40$ мм	1165	1,07	0,11	0,11	1,0
		1165	1,18	0,13	0,12	1,08
		1145	1,45	0,155	0,165	0,94
4	Латунь Л63 $h_0 \times b = 0,3 \times 50$ мм	800	1,45	0,05	0,56	0,9
5	Латунь Л90 $h_0 \times b = 0,3 \times 50$ мм	600	1,45	0,04	0,043	0,93
6	Бронза КМц 3-1 $h_0 \times b = 0,5 \times 50$ мм	970	1,45	0,08	0,076	1,05

$$\Theta_B = \frac{1 - \nu_B^2}{\pi E_B}; \quad \Theta_{II} = \frac{1 - \nu_{II}^2}{\pi E_{II}},$$

здесь $\nu_B, \nu_{II}, E_B, E_{II}$ – коэффициенты Пуассона и модули упругости валков и полосы;

σ_{sc} – среднее сопротивление деформации:

$$\sigma_{sc} = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{s1}}{2};$$

σ_0 – заднее удельное натяжение полосы;

K_c – коэффициент, учитывающий упругие характеристики валка и условия прокатки. Коэффициент K_c целесообразно выбирать из следующих соображений [13]:

а) $\sigma_{s0} \leq 500$ МПа и $\lambda < 1,5$,

$$K_c = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2/\text{Н};$$

б) $\sigma_{s0} \leq 500$ МПа и $\lambda \geq 1,5$,

$$K_c = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2/\text{Н};$$

в) $\sigma_{s0} \geq 500$ МПа и $\lambda < 1,5$,

$$K_c = 1,40 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2/\text{Н};$$

г) $\sigma_{s0} \geq 500$ МПа и $\lambda \geq 1,5$,

$$K_c = 1,35 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2/\text{Н}.$$

Формула (1) предполагает использование профилировки валков при полной компенсации прогибов валков и неравномерного их теплового расширения по длине бочек.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает их достаточно удовлетворительную сходимость. Максимальное различие для условий опытного стана Дуо-200 ЮУрГУ составляет 20 %.

Выражение (1) может быть использовано для определения диаметра валков при ПВ при заданной минимальной толщине ленты в пла-

нируемом сортаменте и максимальной вытяжке в проходе с целью обеспечения требуемой производительности стана.

Для общего случая несимметричной тонколистовой прокатки минимальная толщина в проходе, исходя из условия контакта рабочих валков на краях бочек, должна определяться из условия

$$h_{l\min} = f_{II} + y_c + \Delta, \quad (2)$$

где f_{II} – суммарная разность прогибов в середине и у края бочки рабочих валков [14];

y_c – суммарная радиальная деформация рабочих валков в очаге деформации [15–17];

Δ – суммарная станочная профилировка рабочих валков.

Выводы

1. Процессы прокатки с различными окружными скоростями валков позволяют интенсифицировать режимы деформаций. При этом минимальная толщина полосы из условия контакта валков на краях бочек достигается за меньшее число проходов.

2. Минимальная толщина при ПВ в 2,5–3 раза меньше, чем при обычном процессе прокатки. При этом чем меньше вытяжка в проходе при ПВ, тем меньшую толщину можно получить.

3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных для условий опытного стана Дуо-200 ЮУрГУ, говорит об их удовлетворительной сходимости. Расчетные инженерные методики могут быть рекомендованы для расчета режимов деформаций и выбора параметров валков при несимметричной прокатке.

Литература

1. Николаев, В.А. Несимметричная тонколистовая прокатка / В.А. Николаев., В.Н. Скороходов., В.П. Полухин – М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
2. Сеницын, В.Г. Несимметричная прокатка листов и лент / В.Г. Сеницын – М.: Металлургия, 1984. – 167 с.
3. Выдрин, В.Н. Опыт прокатки фольги из титановых сплавов и нержавеющей сталей способом прокатки-волоочения / В.Н. Выдрин [и др.] // Теория и технология прокатки. – Челябинск: ЧПИ, 1978. – С. 66–70.
4. Опыт прокатки тончайшей ленты из латунных сплавов способом прокатки-волоочения / Л.М. Агеев [и др.] // Теория и технология прокатки. – Челябинск: ЧПИ, 1978. – С. 13–17.
5. Характеристики новых прокатных станков для процессов прокатки-волоочения и промежуточной прокатки-волоочения // Исикавадзима – Харима гихо. – 1980. – Т. 20, №3. – С. 154–159.
6. Выдрин, В.Н. О минимальной толщине при прокатке / В.Н. Выдрин, А.П. Пелленен, В.Г. Сосюрко // Теория и технология прокатки. – Челябинск: ЧПИ, 1978. – С. 70–80.

7. Валки листовых станов холодной прокатки / В.Н. Новиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1970. – 336 с.
8. Галлай, Я.С. Влияние величины обжатия стальной ленты на сплющивание валков / Я.С. Галлай, И.М. Мершин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 10. – С. 59–62.
9. Выдрин, В.Н. Принципиальные и теоретические основы нового процесса «прокатка-волочение» / В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев // Теория и технология прокатки. – Челябинск: ЧПИ, 1971. – С. 3–21.
10. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1974. – 224 с.
11. Прокатка на многовалковых станах / П.И. Полухин [и др.]. – М.: Металлургия, 1981. – 248 с.
12. Судаков, Н.В. Резервы холодной листовой прокатки / Н.В. Судаков, А.П. Пелленен // Металлург. – 2018. – № 11. – С. 47–51.
13. Агеев, Л.М. Проектирование с использованием ЭВМ параметров валковых узлов станов холодной прокатки: учебное пособие / Л.М. Агеев, А.П. Пелленен, Е.А. Остсемин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1990. – 81 с.
14. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т.3: Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учеб. для вузов / А.И. Целиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1981. – 576 с.
15. Pellenen, A.P. Research of Radial Flattening of Rolls in the Deformation Zone during Sheet Rolling / A.P. Pellenen, R.A. Lisovsky, M.A. Zhudov // RusMetalCon 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 969. – 012088. DOI: 10.1088/1757-899X/969/1/012088
16. Настройка, стабилизация и контроль тонколистовой прокатки / Г.Г. Григорян, Ю.Д. Железнов, В.А. Черный и др. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
17. Ковальский, Б.С. Контактная задача в инженерной практике / Б.С. Ковальский // Известия вузов. Машиностроение. – 1960. – № 6. – С. 81–97.

Пелленен Анатолий Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; pellenenap@susu.ru.

Поступила в редакцию 3 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/met210207

STUDY OF THE MINIMUM STRIP THICKNESS FOR NON-SYMMETRIC ROLLING

A.P. Pellenen, pellenenap@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The asymmetric rolling process with different circumferential speeds of rotation of the work rolls expands the technological capabilities of cold rolling mills. By reducing the contact normal stresses in the deformation zone, the elastic deformations of the rolls are reduced, which makes it possible to use asymmetric rolling processes to obtain the thinnest strips and foil. However, the minimum thickness for these processes is limited by the contact of the rolls at the edges of the drums,

which is not permissible, because this circumstance leads to a sharp increase in the rolling force, an increase in the temperature of the rolls at the edges of the barrels, additional thermal stresses and breakdown of the rolls. The purpose of the study on the minimum strip thickness in asymmetric rolling is to establish the features of its achievement and to evaluate the calculated and experimental data. In this case, the minimum strip thickness in a pass during asymmetric rolling is understood to be such a thickness at which the work rolls, due to their radial deformation and bending, come into contact at the edges of the drums. It has been established that the minimum thickness during asymmetric rolling, in particular during rolling-drawing, is 2–3 times less than in the conventional rolling process. In this case, the less the strip stretching in the passage, the smaller the strip thickness can be obtained. A comparison of the experimental and calculated values of the minimum strip thickness during rolling-drawing was carried out, which confirmed the possibility of using engineering techniques to determine the minimum strip thickness in the passage from the condition of the rolls contact at the edges of the barrels.

Keywords: cold strip rolling, minimum thickness, conventional rolling, asymmetric rolling, rolling-drawing, experimental study.

References

1. Nikolayev V.A., Skorokhodov V.N., Polukhin V.P. *Nesimmetrichnaya tonkolistovaya proklatka* [Asymmetrical sheet rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1993. 192 p.
2. Sinitsyn V.G. *Nesimmetrichnaya proklatka listov i lent* [Asymmetrical rolling of sheets and strips]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 167 p.
3. Vydrin V.N. et al. [Experience in rolling foil from titanium alloys and stainless steels by rolling-drawing method]. *Rolling theory and technology*. Chelyabinsk: ChPI, 1978, pp. 66–70. (in Russ.)
4. Ageyev L.M. et al. [Experience in rolling the thinnest strip of brass alloys by rolling-drawing method]. *Rolling theory and technology*. Chelyabinsk: ChPI, 1978, pp. 13–17. (in Russ.)
5. [Characteristics of new rolling mills for rolling-drawing and intermediate rolling-drawing processes]. *Isikavadzima – Kharima gikho*, 1980, vol. 20, no. 3, pp. 154–159.
6. Vydrin V.N., Pellenen A.P., Sosyurko V.G. [Minimum rolling thickness]. *Rolling theory and technology*. Chelyabinsk: ChPI, 1978, pp. 70–80.
7. Novikov V.N. et al. *Valki listovykh stanov kholodnoy proklatki* [Rolls of sheet mills for cold rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 336 p.
8. Gallay Ya.S., Meriin I.M. [Influence of the value of reduction of a steel strip on flattening of rolls]. *Proceedings of universities. Ferrous metallurgy*, 1961, no. 10, pp. 59–62. (in Russ.)
9. Vydrin V.N., Ageyev L.M. [Fundamental and theoretical foundations of the new rolling-drawing process]. *Rolling theory and technology*. Chelyabinsk: ChPI, 1971, pp. 3–21. (in Russ.)
10. Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskiye svoystva metallov i splavov pri obrabotke metallov davleniyem* [Mechanical properties of metals and alloys in the processing of metals by pressure]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 224 p.
11. Polukhin P.I. et al. *Proklatka na mnogovalkovykh stanakh* [Rolling on multi-roll mills]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 248 p.
12. Sudakov N.V., Pellenen A.P. [Cold sheet rolling reserves]. *Metallurgist*, 2018, no. 11, pp. 47–51. (in Russ.)
13. Ageyev L.M., Pellenen A.P., Ostsemin E.A. *Proyektirovaniye s ispol'zovaniyem EVM parametrov valkovykh uzlov stanov kholodnoy proklatki: uchebnoye posobiye* [Computer-aided design of parameters of roll units of cold rolling mills]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 1990. 81 p.
14. Tselikov A.I. et al. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3 t. T. 3: Mashiny i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata: ucheb. dlya vuzov* [Machines and units of metallurgical plants. In 3 v. Vol. 3: Machines and units for the production and finishing of rolled products: textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 576 p.
15. Pellenen A.P., Lisovsky R.A., Zhudov M.A. Research of Radial Flattening of Rolls in the Deformation Zone during Sheet Rolling. *RusMetalCon 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 969, 012088. DOI: 10.1088/1757-899X/969/1/012088

16. Grigoryan G.G., Zheleznov Yu.D., Chernyy V.A. *Nastroyka, stabilizatsiya i kontrol' tonkolistovoy prokatki* [Tuning, stabilization and control of sheet rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 368 p.

17. Koval'skiy B.S. [Contact problem in engineering practice]. *Proceedings of universities. Mechanical engineering*, 1960, no. 6, pp. 81–97. (in Russ.)

Received 3 March 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Пелленен, А.П. Исследование минимальной толщины полосы при несимметричной прокатке / А.П. Пелленен // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 70–77. DOI: 10.14529/met210207

FOR CITATION

Pellenen A.P. Study of the Minimum Strip Thickness for Non-Symmetric Rolling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 70–77. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210207
