

Листовая прокатка

ВЫБОР НАТЯЖЕНИЯ ПРИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.С. КОХАН, д-р техн. наук, проф., Ю.А. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, доц. *

А.В. ШУЛЬГИН, канд. техн. наук, доц.,

С.С. ХЛАМКОВА, канд. техн. наук, доц., Ю.Б. СЛАВГОРОДСКАЯ, аспирант
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
111250, Москва, Б. Семеновская, 38, т. 8(916)877-66-96*; akafest@mail.ru*

Производится исследование влияния натяжения на силовые параметры тонколистовой холодной прокатки композиционных материалов. Рассматривается переднее и заднее натяжение, обеспечивающие в совокупности симметричное и несимметричное нагружение очага деформации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: листовая прокатка, композит, натяжение, нейтральное сечение, давление прокатки.

Для повышения устойчивости прокатки и снижения разнотолщинности прокатываемой полосы в практике прокатного производства широко используется натяжение полосы – заднее или переднее

$$\xi_0 = \frac{\sigma_T - \sigma_0}{\sigma_{T0}} = 1,0 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{T0}} \quad ; \quad \xi_1 = \frac{\sigma_T - \sigma_1}{\sigma_{T1}} = 1,0 - \frac{\sigma_1}{\sigma_{T1}},$$

где ξ_0 , ξ_1 – коэффициенты заднего и переднего натяжений; σ_0 , σ_1 – заднее и переднее напряжения при натяжении полосы; σ_{T0} , σ_{T1} – сопротивление пластической деформации материала на входе и выходе из очага деформации.

По характеру действия на полосу, натяжения можно разделить:

- симметричные $\xi_0 = \xi_1$;
- смешанные ($\xi_0 = \text{var}$; $\xi_1 = 1,0$) и ($\xi_0 = 1,0$; $\xi_1 = \text{var}$), когда натяжение отсутствует на одной из сторон прокатки;
- несимметричные $\xi_0 \neq \xi_1$.

Для точного решения задачи о влиянии натяжения, необходимо исследовать кинематику очага деформации с учетом зон отставания и опережения. Границу между этими зонами устанавливаем коэффициентом, определяющим отношение начальной толщины h_0 к толщине полосы в нейтральном сечении h_n (рис. 1):

$$Z = h_0 / h_n .$$

Рассмотрим энергосиловые параметры холодной прокатки полосы из композиционных материалов толщиной $h_0 = 2,0$ мм в валках с катающим радиусом $R = 150$ мм и обжатием 10% без натяжения $\xi_0 = \xi_1 = 1,0$. Угол захвата полосы валками и параметр прокатки

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_0}{R}} \varepsilon = \sqrt{\frac{2,0}{150}} 0,1 = 0,03651 \text{ рад (2,092 град);}$$

$$\delta = \frac{2f}{\alpha} = \frac{2 \cdot 0,125}{0,03651} = 6,847 ,$$

где $f = 0,1 \dots 0,15$ – коэффициент трения при холодной прокатке.

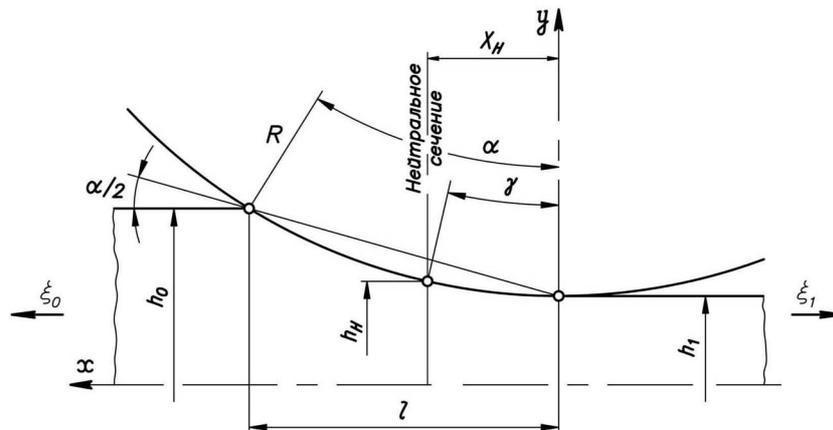


Рис. 1. Модель контакта вала и полосы

Приближенная зависимость положения нейтрального сечения при прокатке с натяжением [1]

$$Z = 1,73 \varepsilon + 0,957 - 0,416 \frac{\xi_0}{\xi_1} \varepsilon = 1,73 \cdot 0,1 + 0,957 - 0,416 \frac{1,0}{1,0} 0,1 = 1,088 .$$

Дополнительным итерационным перебором устанавливаем фактическое значение $Z = 1,0648$. Тогда толщина полосы и обжатие в нейтральном сечении

$$h_n = \frac{h_0}{Z} = \frac{2,0}{1,0648} = 1,8782 \text{ мм и } \varepsilon_n = \frac{h_0 - h_n}{h_0} = \frac{2,0 - 1,8782}{2,0} = 0,061 .$$

При толщине полосы на выходе из очага деформации

$$h_1 = h_0 (1,0 - \varepsilon) = 2,0 (1,0 - 0,1) = 1,8 \text{ мм,}$$

нейтральный угол

$$\gamma = \arccos \left(1,0 - \frac{h_i - h_1}{2R} \right) = \arccos \left(1,0 - \frac{1,8782 - 1,8}{2 \cdot 150} \right) = 1,308 \text{ град.}$$

В случае холодной прокатки ($f = 0,1 \dots 0,2$) заготовок из железного порошка ПЖР 3.200.28 начальное сопротивление пластической деформации $\sigma_{T0} = 200$ МПа и при деформации $\varepsilon = 0,5$, увеличивается до $\sigma_{T1} = 430$ МПа. Тогда степенной закон упрочнения [2-4]

$$\sigma_T = 200 + 430 \varepsilon^{0,75},$$

или, выражая через коэффициент упрочнения, $k_{\text{упр}} = 1,0 + 2,15 \varepsilon^{0,75}$.

Коэффициенты упрочнения в нейтральном сечении и на выходе из очага деформации:

$$k_H = 1,0 + 2,15 \varepsilon_H^{0,75} = 1,0 + 2,15 \cdot 0,061^{0,75} = 1,264;$$

$$k_\varepsilon = 1,0 + 2,15 \varepsilon^{0,75} = 1,0 + 2,15 \cdot 0,1^{0,75} = 1,382.$$

Средние коэффициенты упрочнения по зонам отставания и опережения:

$$K_0 = \frac{1,0 + k_H}{2} = \frac{1,0 + 1,264}{2} = 1,132 \text{ и } K_1 = \frac{k_H + k_\varepsilon}{2} = \frac{1,264 + 1,382}{2} = 1,323.$$

Относительное давление в нейтральном сечении по зонам отставания и опережения

$$\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \frac{K_0}{\delta + a_1 - 1,0} \left\{ [\xi_0 (\delta + a_1 - 1,0) - a_0] \left(\frac{h_0}{h_H} \right)^{\frac{\delta + a_1 - 1,0}{a_1}} + a_0 \right\} = 2,243; \quad (1a)$$

$$\bar{\sigma}_{z \text{ оп}} = \frac{K_1}{\delta - a_1 + 1,0} \left\{ [\xi_1 (\delta - a_1 + 1,0) + a_0] \left(\frac{h_H}{h_1} \right)^{\frac{\delta - a_1 + 1,0}{a_1}} - a_0 \right\} = 2,243, \quad (1б)$$

где $a_1 = 0,588$; $a_0 = 0,049$ – константы пористости железного порошка ПЖР 3.200.28 [5, 6].

Отсутствие различия определяет правильность выбора высоты нейтрального сечения и параметров прокатки, что позволяет перейти к расчетам кинематических и силовых параметров очага деформации.

Горизонтальная проекция дуги захвата определяет координату длины в нейтральном сечении и протяженность зон опережения и отставания (рис. 2):

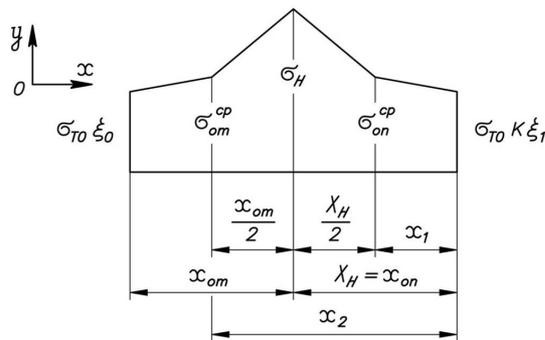


Рис. 2. Эпюра напряжений прокатки

$$l = \sqrt{R h_0 \varepsilon} = \sqrt{150 \cdot 2,0 \cdot 0,1} = 5,477 \text{ мм; } X_H = x_{\text{он}} = R \sin \gamma = 150 \sin 1,308 = 3,424 \text{ мм;}$$

$$x_{\text{от}} = l - x_{\text{он}} = 5,477 - 3,424 = 2,053 \text{ мм.}$$

Координаты середины каждой зоны [7]

$$x_1 = \frac{x_{\text{оп}}}{2} = \frac{3,424}{2} = 1,712 \text{ мм}, \quad x_2 = X_{\text{н}} + \frac{x_{\text{от}}}{2} = 3,424 + \frac{2,053}{2} = 4,451 \text{ мм}.$$

Полная толщина полосы по этим сечениям:

$$h_{\text{оп}}^{\text{cp}} = h_1 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x_1^2} \right) = 1,8 + 2 \left(150 - \sqrt{150^2 - 1,712^2} \right) = 1,82 \text{ мм};$$

$$h_{\text{от}}^{\text{cp}} = h_1 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x_2^2} \right) = 1,8 + 2 \left(150 - \sqrt{150^2 - 30,765^2} \right) = 1,932 \text{ мм}.$$

Относительное давление в середине каждой зоны (1):

$$\bar{\sigma}_{\text{от}}^{\text{cp}} = \frac{K_0}{\delta + a_1 - 1,0} \left\{ \xi_0 (\delta + a_1 - 1,0) - a_0 \left[\left(\frac{h_0}{h_{\text{от}}^{\text{cp}}} \right)^{\frac{\delta + a_1 - 1,0}{a_1}} + a_0 \right] \right\} = 1,649;$$

$$\bar{\sigma}_{\text{оп}}^{\text{cp}} = \frac{K_1}{\delta - a_1 + 1,0} \left\{ \xi_1 (\delta - a_1 + 1,0) + a_0 \left[\left(\frac{h_{\text{оп}}^{\text{cp}}}{h_1} \right)^{\frac{\delta - a_1 + 1,0}{a_1}} - a_0 \right] \right\} = 1,518.$$

С учетом давлений на участках отставания и опережения среднее давление:

$$\bar{\sigma}_{\text{от}} = \frac{\xi_0 + 2\bar{\sigma}_{\text{от}}^{\text{cp}} + \bar{\sigma}_{z \text{ от}}}{4} = \frac{1,0 + 2 \cdot 1,649 + 2,243}{4} = 1,635;$$

$$\bar{\sigma}_{\text{оп}} = \frac{\bar{\sigma}_{z \text{ оп}} + 2\bar{\sigma}_{\text{оп}}^{\text{cp}} + K_1 \xi_1}{4} = \frac{2,243 + 2 \cdot 1,518 + 1,323 \cdot 1,0}{4} = 1,651.$$

Общее среднее относительное давление прокатки при $\gamma/\alpha = 0,625$:

$$\bar{\sigma}_{\text{cp}} = \bar{\sigma}_{\text{от}} \left(1,0 - \frac{\gamma}{\alpha} \right) + \bar{\sigma}_{\text{оп}} \frac{\gamma}{\alpha} = 1,635 (1,0 - 0,625) + 1,651 \cdot 0,625 = 1,645.$$

Особенностью холодной прокатки является высокая жесткость металла, при которой часть давления прокатки расходуется на упругое сплющивание валков

$$\bar{\sigma}_{\text{c}} = \frac{\sqrt{(1,0 - \mu)^2 + f^2}}{1,0 - \mu} = \frac{\sqrt{(1,0 - 0,428)^2 + f^2}}{1,0 - 0,428} = 1,024,$$

где μ – коэффициент Пуассона: $\mu = \bar{\rho}^2 / 2 = 0,925^2 / 2 = 0,428$; $\bar{\rho} \approx 0,9 \dots 0,95$ – относительная плотность упрочненного композита.

Относительное давление прокатки: $\bar{\sigma}_{\text{np}} = \bar{\sigma}_{\text{cp}} + \bar{\sigma}_{\text{c}} = 1,645 + 1,024 = 2,669$.

Абсолютное давление прокатки:

$$\sigma_{\text{np}} = \bar{\sigma}_{\text{np}} \sigma_{T0} \rho^n = 2,669 \cdot 200 \cdot 0,925^{3,0} = 422,48 \text{ МПа},$$

где $n \approx 3,0$ – показатель пористости железного порошка ПЖР 3.200.28.

Аналогичные расчеты для других степеней обжатия, при указанных параметрах прокатки, приведены в табл. 1 и рис. 3, а.

Таблица 1. Параметры очага деформации при различных обжатиях

Обжатие, ε	Z	$\frac{h_0}{h_{\text{н}}}$	γ , град	$\frac{\gamma}{\alpha}$	$\bar{\sigma}_{z \text{ от}}$ ($\bar{\sigma}_{z \text{ оп}}$)	$\bar{\sigma}_{\text{cp}}$	$\bar{\sigma}_{\text{np}}$
0,1	1,0648	1,065	1,308	0,625	2,243	1,645	2,669
0,2	1,1456	1,146	1,786	0,604	3,397	2,178	3,202
0,3	1,2454	1,245	2,123	0,586	4,892	2,808	3,832

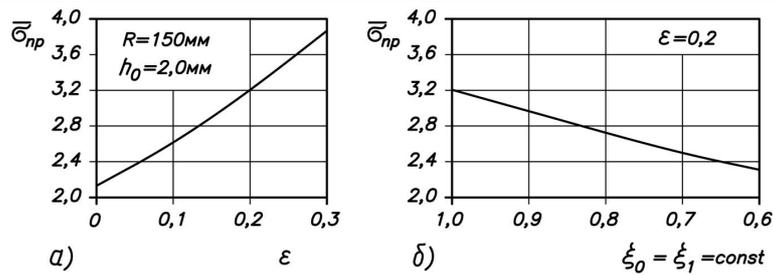


Рис. 3. Зависимость относительного давления прокатки от обжатия (а) и симметричного натяжения (б)

Кинематика очага деформации при прокатке с обжатием 20% и варьировании натяжения, приведена в табл. 2 [8].

Таблица 2. Параметры очага деформации при прокатке с натяжением при $\varepsilon = 0,2$

Натяжение		Z	$\frac{h_0}{h_n}$	γ , град	$\frac{\gamma}{\alpha}$	$\bar{\sigma}_{z\text{от}}$ ($\bar{\sigma}_{z\text{оп}}$)	$\bar{\sigma}_{\text{ср}}$	$\bar{\sigma}_{\text{пр}}$
ξ_0	ξ_1							
<i>Симметричное натяжение</i>								
0,8	0,8	1,1458	1,146	1,785	0,603	2,716	1,742	2,776
0,6	0,6	1,1462	1,146	1,781	0,602	2,038	1,307	2,331
<i>Смешанное натяжение</i>								
1,0	0,8	1,1304	1,130	1,925	0,651	3,034	1,896	2,920
	0,6	1,1113	1,111	2,090	0,706	2,622	1,579	2,603
0,8	1,0	1,1611	1,161	1,637	0,553	3,040	1,994	3,018
0,6		1,1816	1,182	1,424	0,481	2,632	1,758	2,782
<i>Несимметричное натяжение</i>								
0,8	0,6	1,1264	1,126	1,961	0,663	2,349	1,458	2,482
0,6	0,8	1,1659	1,166	1,589	0,537	2,352	1,551	2,575

Аналитическое исследование полученных результатов позволяет утверждать, что симметричное натяжение практически не влияет на кинематику очага деформации – изменение нейтрального угла весьма незначительное, однако при этом происходит существенное снижение давления прокатки (рис. 3, б):

$$\Delta = \frac{\bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi=1,0} - \bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi=0,6}}{\bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi=1,0}} = \frac{3,202 - 2,331}{3,202} 100\% = 27,2\% .$$

Использование смешанного натяжения характеризуется практически одинаковыми силовыми параметрами. Однако стоит отметить, что большую роль играет переднее натяжение, уменьшающее давление прокатки:

$$\Delta = \frac{\bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi_0=0,6, \xi_1=1,0} - \bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi_0=1,0, \xi_1=0,6}}{\bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi_0=0,6, \xi_1=1,0}} = \frac{2,782 - 2,603}{2,782} 100\% = 6,4\% .$$

В связи с этим дополнительно был произведен анализ несимметричного натяжения в комбинациях $\xi_0 = 0,8$; $\xi_1 = 0,6$ и наоборот (табл. 2). Сравнение результатов также позволяет утверждать о преобладающей роли переднего натяжения, снижающего давление прокатки

$$\Delta = \frac{\bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi_0=0,6, \xi_1=0,8} - \bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi_0=0,8, \xi_1=0,6}}{\bar{\sigma}_{\text{пр}}^{\xi_0=0,6, \xi_1=0,8}} = \frac{2,575 - 2,482}{2,575} 100\% = 3,6\% .$$

Итоговым результатом исследования является рекомендация холодной прокатки композиционных материалов с несимметричным натяжением, например, $\xi_0 = 0,8$; $\xi_1 = 0,6$, устанавливающее наименьшее давление прокатки

$$\bar{\sigma}_{пр} = 2,482,$$

и обеспечивающее наименьшую разнотолщинность полосы и меньший износ валков.

Л и т е р а т у р а

1. Кохан Л.С., Коростелев А.Б., Морозов Ю.А., Алдунин А.В., Белелюбский Б.Ф., Винокуров А.Я. Силовые и кинематические параметры продольной листовой прокатки. – М.: МГВМИ, 2012. – 432 с.
2. Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Роберов И.Г. Теория обработки давлением компактированных спеченных металлических порошков. – М.: МГВМИ, 2005. – 312 с.
3. Shima S., Oyane M. Plasticity Theory for Porous Metals// Int. J. Mechanical Science, 1976. – Vol.18. – P. 285-291.
4. Xiao-Mo Jiang, Hong Chen, J.Y. Richard Liew. Spread-of-plasticity analysis of three dimensional steel frames // Journal of Constructional Steel Research. – 2002. – Vol. 58, Iss. 2. – P. 193-212.
5. Kokhan L.S., Shul'gin A.V., Semenova L.M. Physico-mechanical properties of an iron-copper-zinc composite// Metallurgist. – 2010. – Vol. 54. – №7-8. – P. 468-471.
6. Кохан Л.С., Пунин В.И., Шульгин А.В., Морозов Ю.А. Производство гнутых слоистых коррозионно-стойких профилей // Заготовительные производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2014. – №2. – С. 35-40.
7. Кохан Л.С., Роберов И.Г., Кондрашов А.А., Белелюбский Б.Ф., Шульгин А.В. Определение среднего давления прокатки спеченных компактированных заготовок из металлических порошков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2006. – №. 1. – С. 96-101.
8. Кохан Л.С., Морозов Ю.А. Исследование механизма натяжения при прокатке // Механика XXI века. XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Сборник докладов. – Братск: БрГУ, 2012. – С. 77-82.

References

1. Kokhan, L.S., Korostelev, A.B., Morozov, Yu.A., Aldunin, A.V., Beleyubskij, B.F., Vinokurov A.Ya. (2012). *Silovye i Kinematicheskie Parametry Prodol'noj Listovoj Prokatki*, M.: MGVMI, 432 p.
2. Lukashkin, N.D., Kokhan, L.S., Roberov, I.G. (2005). *Teoriya Obrabotki Davleniem Skompaktirovannykh Spechennykh Metallicheskih Poroshkov*. Moscow: MGVMI, 312 p.
3. Shima, S., Oyane, M. (1976). Plasticity Theory for Porous Metals. *Int. J. Mechanical Science*, Vol. 18, p. 285-291.
4. Xiao-Mo Jiang, Hong Chen, J.Y. Richard Liew (2002). Spread-of-plasticity analysis of three dimensional steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, Iss. 2, p. 193-212.
5. Kokhan, L.S., Shul'gin, A.V., Semenova, L.M. (2010). Physico-mechanical properties of an iron-copper-zinc composite. *Metallurgist*, Vol. 54, № 7-8, p. 468-471.
6. Kokhan, L.S., Punin, V.I., Shul'gin, A.V., Morozov, Yu.A. (2014). Proizvodstvo gnutykh sloistykh korrozionno-stojkikh profilej. *Zagotovitel'nye Proizvodstva v Mashinostroenii*, № 2, p. 35-40.
7. Kokhan, L.S., Roberov, I.G., Kondrashov, A.A., Beleyubskij, B.F., Shul'gin A.V. (2006). Opredelenie srednego davleniya prokatki spechennykh skompaktirovannykh zagotovok iz metallicheskih poroshkov. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, № 1, p. 96-101.
8. Kokhan, L.S., Morozov, Yu.A. (2012). Issledovanie mekhanizma natyazheniya pri prokatke. *Mekhanika XXI veku. XI Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: Sbornik dokladov*, Bratsk: BrGU, p. 77-82.

TENSION CHOICE AT THIN-SHEET COLD ROLLING OF COMPOSITE MATERIALS

L.S. Kohun, Yu.A. Morozov, A.V. Shul'gin, S.S. Khlamkova, Yu.B. Slavgorodskaya
Moscow State Machine-Building University (MAMI), Moscow

Research of influence of a tension on power parameters of thin-sheet cold rolling of composite materials is made. The forward and back tension, the deformations providing in total symmetric and asymmetrical loading of the center is considered.

KEY WORDS: sheet rolling, composite, tension, neutral section, rolling pressure.