

От редакции

В магнитогорской школе прокатчиков развернуто новое научное направление, связанное с асимметричными процессами пластической деформации, которое в настоящее время возглавляет А.М. Песин.

В работах В.М. Салганика и А.М. Песина показана необходимость учета поворота входных и выходных сечений очага деформации, вызванного крутящим моментом от противоположного действия сил трения на контактной поверхности в смешанной кинематической зоне.

Совместно с ОАО «ММК», при активном участии бывшего начальника листопрокатного цеха Дригуна Э.М., разработан и впервые в мире внедрен новый процесс получения крупногабаритных тел вращения в линии толстолистового стана.

Показана необходимость и возможность учета поперечного течения металла при прокатке ленты. Предложены новые технические решения, позволившие более чем в два раза снизить исходную клиновидность подката.

В последние годы установлено и активно развивается международное сотрудничество с ведущими научными школами по асимметричной прокатке, специалистами Ченстоховского технологического университета (Польша) и Донбасской государственной машиностроительной академии (Украина).

УДК 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

Песин А.М.¹, Дья Х.², Кавалек А.², Сжинский П.², Пустовойтов Д.О.¹, Сатонин А.В.³, Чуруканов А.С.³

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

² Ченстоховский технологический университет, Польша

³ Донбасская государственная машиностроительная академия, Украина

Аннотация. Выполнено исследование влияния скоростной асимметрии на структуру металла и силовые параметры процесса холодной прокатки латунной ленты. Показано, что с увеличением степени скоростной асимметрии максимально возможные суммарные до появления трещин обжатия возросли с 64 до 79%. При толстолистовой прокатке установлено, что применение двух противоположно направленных факторов асимметрии позволяет существенно снизить усилие прокатки, а также обеспечить получение листов без кривизны.

Ключевые слова: научная школа, международное сотрудничество, асимметричная прокатка, структура металла, скоростная асимметрия, конечно-элементное моделирование, напряженно-деформированное состояние металла, ski-эффект.

Введение

Магнитогорский государственный технический университет (МГТУ), Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА) и Ченстоховский технологический университет (ЧТУ) на протяжении многих лет являются одними из лидеров по исследованию и разработке технологий асимметричной прокатки.

В работах магнитогорских исследователей показана необходимость учета поворота входных и выходных сечений очага деформации, вызванного крутящим моментом от противоположного действия сил трения на контактной поверхности в смешанной кинематической зоне [1-10]. Предложены и внедрены новые совмещенные процессы асимметричной прокатки и пластической гибки [11-14].

Крамовской школой разработаны теоретические основы процесса ДНПВ, предложены различные варианты и определены условия реализации этого процесса [15-21].

Специалистами Ченстоховского технологического университета выполнены обширные численные и экспериментальные исследования различных процессов листовой асимметричной прокатки [22-27].

В последние годы международное сотрудничество наших университетов усилилось. Только за последний год выполнены следующие совместные работы:

1. Исследование влияния скоростной асимметрии на структуру металла и силовые параметры процесса холодной прокатки ленты (МГТУ-ДГМА)

Скоростная асимметрия, с одной стороны, приводит к снижению отрицательного влияния контактных сил трения и, как следствие, возможности увеличения деформаций сжатия при прокатке, с другой стороны, в очаге создаются значительные сдвиговые деформации. При симметричной прокатке деформация металла является монотонной (рис. 1, а). В свою очередь, в асимметричном очаге деформации (рис. 1, б), в особенности в предельном случае, когда на одном валке реализуется только зона отставания, а на другом – только зона опережения, деформации сдвига существенно возрастают. Наличие больших сдвиговых деформаций является необходимым условием для получения ультрамелкозернистой структуры металла.

Для исследования влияния скоростной асимметрии на структуру металла и силовые параметры процесса холодной прокатки ленты был проведен эксперимент на лабораторно-промышленном стане дуо 100×100 (диаметр и длина бочки рабочих валков

100 мм, допустимая сила прокатки 50 кН) (рис. 2) кафедр «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии (г. Краматорск, Украина). Исследование проводили для латунной ленты.

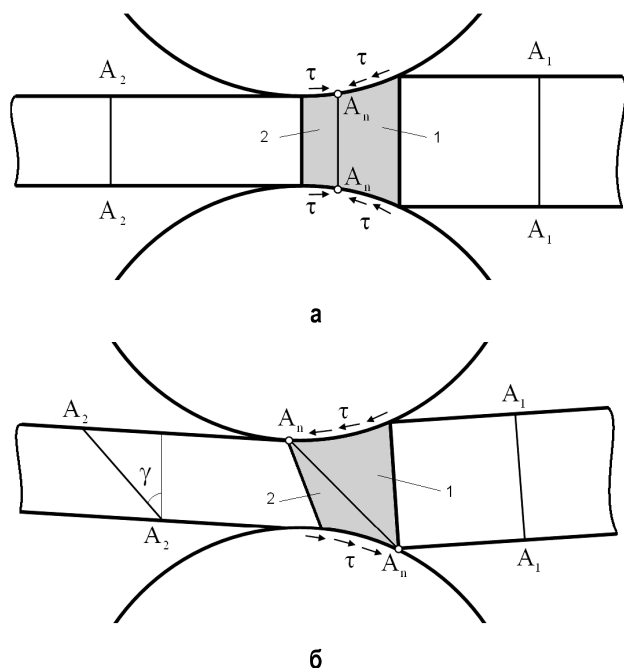


Рис. 1. Упрощенная схема симметричной (а) и асимметричной (б) прокатки: 1 – зона отставания; 2 – зона опережения; A_1A_1 – линия Лагранжа до деформации; A_2A_2 – линия Лагранжа после деформации; A_n – нейтральные точки; τ – силы контактного трения; γ – угол сдвига



Рис. 2. Общий вид лабораторно-промышленного стана дуо 100×100

Скоростная асимметрия создавалась за счет использования сменных зубчатых колес шестеренной клетки главной линии прокатного стана. Ведущая зубчатая шестерня, имеющая 25 зубьев, размещалась на приводном валу. Сменные зубчатые колеса, имеющие 25, 29 и 50 зубьев, размещались на ведомом валу. При этом степень скоростной асимметрии, определяемая

как соотношение окружных скоростей нижнего и верхнего рабочих валков, была равной 1,0; 1,16; 2,0. Измерение моментов прокатки на каждом из рабочих валков проводилось при помощи тензометрических датчиков сопротивления, наклеенных на тела соответствующих универсальных шпинделей главной линии рабочей клетки.

Прокатку проводили по режимам в соответствии с данными табл. 1-3. Образцы латунной ленты до и после деформации представлены на рис. 3.

Таблица 1

Изменение толщины ленты по проходам при симметричной прокатке

Номер образца	Толщина ленты после деформационного прохода, мм							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0,80	0,55	-	-	-	-	-	-
2	0,80	0,57	0,46	-	-	-	-	-
3	0,80	0,57	0,49	0,42	-	-	-	-
4	0,80	0,59	0,54	0,49	0,44	0,35	0,33	0,29

Таблица 2

Изменение толщины ленты по проходам при прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков на уровне 16%

Номер образца	Толщина ленты после деформационного прохода, мм						
	0	1	2	3	4	5	6
1	0,80	0,53	-	-	-	-	-
2	0,80	0,54	0,46	-	-	-	-
3	0,80	0,55	0,41	0,37	-	-	-
4	0,80	0,52	0,40	0,33	0,31	-	-
5	0,80	0,49	0,41	0,32	0,28	0,25	-
6	0,80	0,48	0,45	0,35	0,25	0,22	0,20

Таблица 3

Изменение толщины ленты по проходам при прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков на уровне 50%

Номер образца	Толщина ленты после деформационного прохода, мм					
	0	1	2	3	4	5
1	0,80	0,35	-	-	-	-
2	0,80	0,35	0,28	-	-	-
3	0,80	0,39	0,23	0,17	-	-
4	0,80	0,50	0,41	0,34	0,30	0,27

По результатам исследований получено: 1) с увеличением степени скоростной асимметрии возрастают максимально возможные единичные (с 31,25 до 56,25%) и суммарные, до появления трещин, (с 63,75 до 78,75%) обжатия; 2) в сравнении с симметричным процессом усилия прокатки снижаются на величину до 10%. Асимметричная прокатка с рассогласованием окружных скоростей валков на уровне 50% позволила получить фрагментированную структуру (рис. 4).



Рис. 3. Образцы латунной ленты до деформации (а) и после асимметричной прокатки (б)

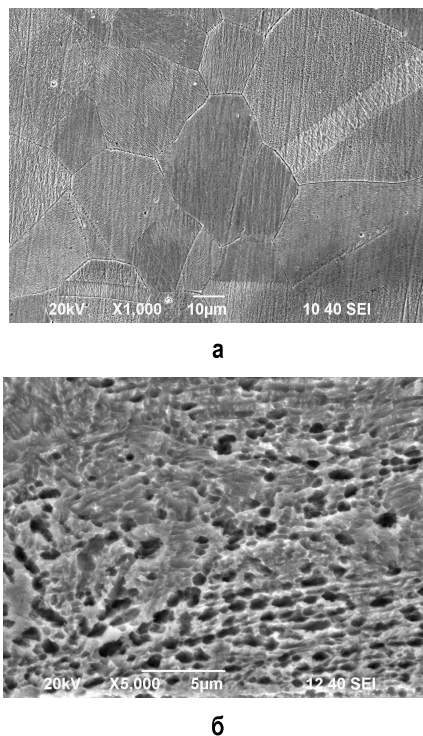


Рис. 4. Исходная (а) и конечная (б) структуры латунной ленты после асимметричной прокатки

2. Конечно-элементное моделирование ски-эффекта при асимметричной толстолистовой прокатке (МГТУ-ЧТУ)

Моделирование проводилось методом конечных элементов в специализированном инженерном программном комплексе DEFORM для следующих условий: 1) толщина подката 20, 40, 60, 80 мм; 2) относительное обжатие по толщине 5, 10, 15, 25, 35%; 3) скорость прокатки 3,5 м/с; 4) рассогласование окружных скоростей рабочих валков 1, 3, 5%; 5) температура металла 800°C; 6) диаметр рабочих валков 1200 мм.

Принятые допущения: схема деформированного состояния – двумерная; процесс – изотермический; валки – несжимаемые (абсолютно жёсткие); деформируемая среда – вязкопластическая; деформируемый материал – однородный и изотропный; напряжения трения пропорциональны пределу текучести на сдвиг; показатель трения постоянный. В качестве начальных условий приняты следующие параметры: радиус рабочих валков; угловые скорости вращения рабочих валков; кривая текучести деформируемого материала; температура металла; начальная скорость заготовки; показатель трения на контакте с рабочими валками; количество деформационных проходов и распределение обжатий по проходам.

В результате решения задачи определяли следующие величины: кривизну листа после прокатки; характеристики напряженно-деформированного состояния металла.

В качестве материала для моделирования процесса асимметричной прокатки была выбрана низколегированная сталь, сопротивление деформации которой описывается уравнением:

$$\sigma_s = 1530u^{0.1019}\varepsilon^{0.1344}\exp(-0.00253T), \quad (1)$$

где u – скорость деформации, s^{-1} ; ε – истинная (логарифмическая) деформация; T – температура металла, °C.

По результатам конечно-элементного моделирования в DEFORM (рис. 5, 6) показано, что чем больше толщина подката, тем при большей величине относительного обжатия происходит изменение знака кривизны переднего конца листа. Так, например, при рассогласовании окружных скоростей валков 3% знак кривизны меняется на противоположный для подката толщиной 20 мм при относительном обжатии 10%, для подката 40 мм – 17,5%, для подката 60 мм – 30%, для подката 80 мм – 31,3%. Чем больше рассогласование скоростей и меньше толщина подката, тем максимальная кривизна переднего конца листа выше.

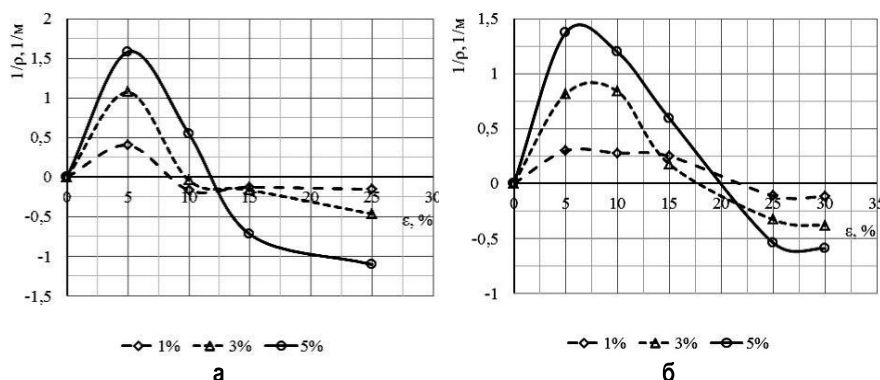


Рис. 5. Изменение кривизны переднего конца листа в зависимости от относительного обжатия при рассогласовании окружных скоростей валков 1, 3, 5% для подката толщиной 20 мм (а) и 40 мм (б)

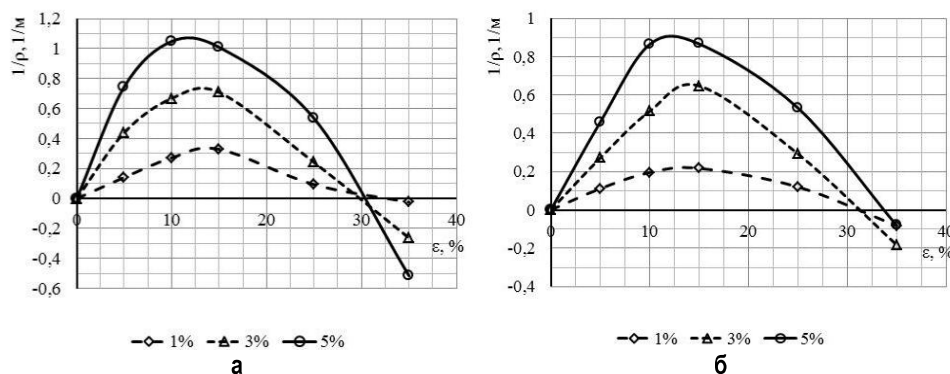


Рис. 6. Изменение кривизны переднего конца листа в зависимости от относительного обжатия при рассогласовании окружных скоростей валков 1, 3, 5% для подката толщиной 60 мм (а) и 80 мм (б)

Образование ski-эффекта сопровождается значительными пластическими деформациями (рис. 7) и напряжениями (рис. 8).

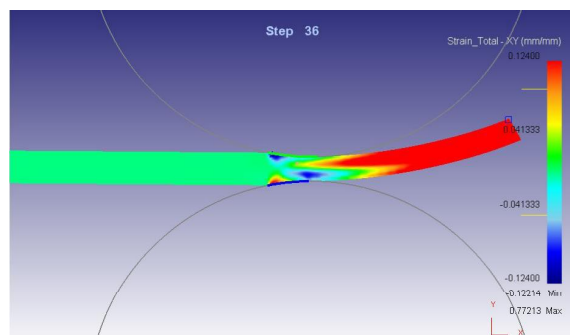


Рис. 7. Поле деформаций в очаге деформации при асимметричной прокатке

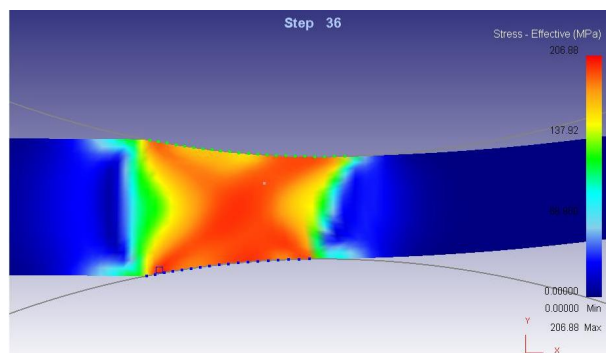


Рис. 8. Поле интенсивности напряжений в очаге деформации

При асимметричной прокатке листов толщиной более 40 мм наблюдается существенное увеличение длины дуги контакта со стороны вала, вращающегося с меньшей скоростью, при этом скорость течения металла здесь снижается.

Увеличение длины дуги контакта приводит к возрастанию контактных нормальных напряжений на этом участке и, соответственно, возрастанию силы прокатки.

Деформация металла со стороны вала, вращающегося с большей скоростью, выше (рис. 9). Удлине-

нию нижних слоев вызывает изгиб переднего конца листа в вертикальной плоскости, т.е. образование ski-эффекта.

Установлено (рис. 10), что при толщине листа менее 40 мм введение скоростной асимметрии снижает силу прокатки до 8%. Начиная с толщины листа 40 мм, увеличение разности скоростей вызывает повышение силы прокатки до 4%. Это объясняется тем, что передний конец листа под дей-

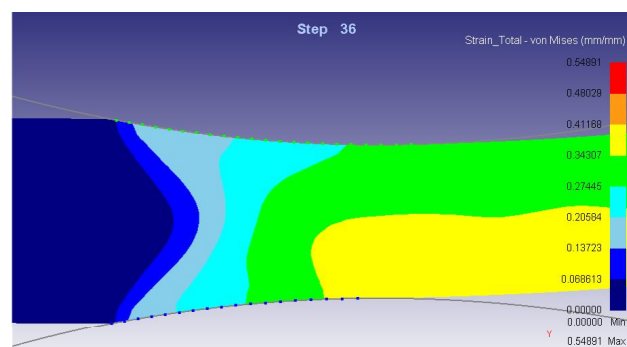


Рис. 9. Поле деформаций

Исследование совместного влияния двух факторов асимметрии проводили для следующих условий: марка стали 18G2A (аналог 17Г1С), коэффициент трения 0,3, частота вращения валков 80 об/мин, диаметр валков 970 мм. Асимметричную прокатку проводили согласно режимам, приведённым в табл. 4.

Таблица 4

Режимы прокатки

Режимы прокатки	Начальная толщина листа H_0 , мм	Относительная деформация ϵ , %	Температура, °C
1	70	25	880
2	120	20	900

Прокатку проводили с использованием следующих вариантов асимметрии: 1) применяли скоростную асимметрию (уменьшали частоту вращения верхнего вала на 10%); 2) применяли геометрическую асимметрию (уменьшали диаметр нижнего вала с 970 до 870 мм); 3) одновременно применяли два указанных выше фактора асимметрии, направленных в противоположные стороны.

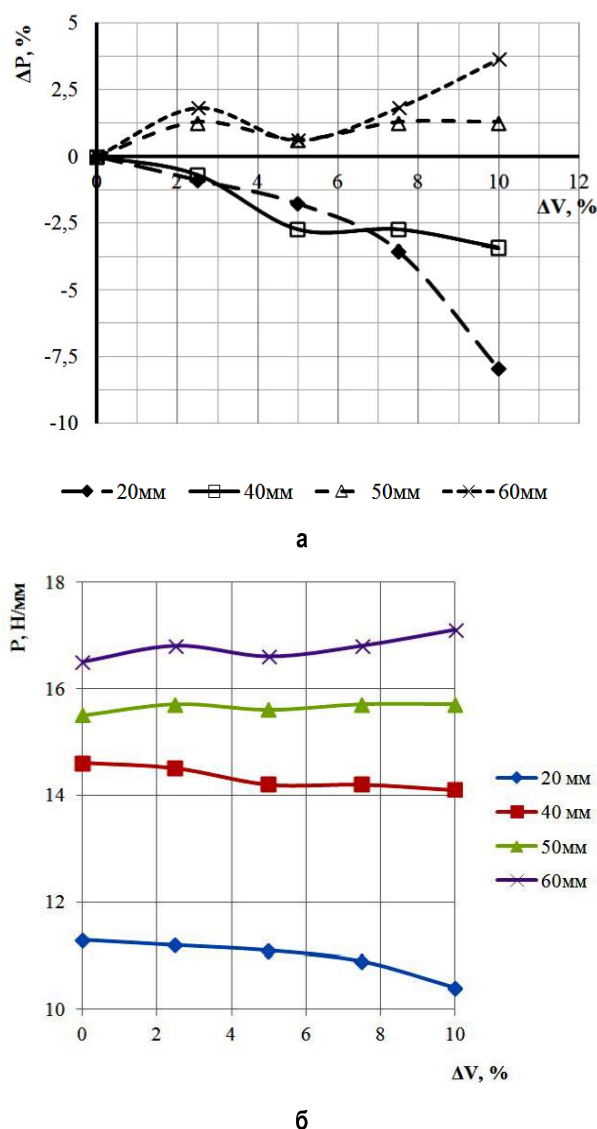


Рис. 10. Влияние уровня рассогласования скоростей валков на относительное (а) и абсолютное (б) изменение силы прокатки при деформации листов различной толщины

Получены следующие результаты. Прокатка по первому и второму вариантам не позволила существенно уменьшить усилие прокатки. В третьем варианте усилие прокатки снизилось на ~5%, а мощность прокатки на ~10%. При этом лист был получен без кривизны.

Список литературы

1. Песин А.М. Закономерности асимметричного деформирования и повышение эффективности процесса холодной листовой прокатки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1989. 21 с.
2. Салганик В.М., Песин А.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения. М.: МИСиС, 1997. 192 с.
3. Песин А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2003. 395 с.
4. Песин А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2002. №1. С. 107-113.

5. Pesin A.M. Scientific school of asymmetric rolling in Magnitogorsk // Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University. 2013. №5. P. 23-28.
6. Внедрение новых технологий асимметричной прокатки в ОАО «ММК» / Салганик В.М., Песин А.М., Трахтенгерц Е.Л., Дригун Э.М., Смирнов П.Н., Куницын Г.А. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2002. №1. С. 128-133.
7. Песин А.М., Дригун Э.М., Чикишев Д.Н. Развитие технологии совмещенного процесса прокатки и пластической гибки // Труды шестого конгресса прокатчиков. Липецк, 2005. С. 76-81.
8. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Свездлик М.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1(41). С. 65-68.
9. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhovich A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling // Advanced Materials Research. 2013. T. 742. С. 476-481.
10. Процессы асимметричной прокатки: теория и технологические решения: учеб. пособие / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев, Г.А. Бережная, Д.О. Пустовойтов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 128 с.
11. Салганик В.М., Песин А.М., Черняховский М.Б. Математическое моделирование и развитие процессов асимметричной тонколистовой прокатки // Производство проката. 1998. №4. С. 9-15.
12. Песин А.М., Чикишев Д.Н., Блинов С.В., Пустовойтов Д.О. Устройство для асимметричной прокатки толстолистового металла: патент на полезную модель 87649 РФ. 2009.
13. Pesin A., Salganik V., Trahtengert E. Mathematical modeling of the stress-strain state in asymmetrical flattening of metal band / Proceedings of the 9th international conference on metal forming «Metal Forming 2002» (The University of Birmingham, UK, 9-11 September 2002) // Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science B.V., Amsterdam-London-New York-Oxford-Paris-Shannon-Tokyo. V. 125-126 (2002). P. 689-694.
14. Pesin A., Salganik V., Trahtengert E., Drigun E. Development of the asymmetric rolling theory and technology // Proceedings of the 8-th International Conference on Metal Forming. Krakow/ Poland/ 3-7 September 2000. Metal Forming 2000. Balkema / Potterdam/ Brookfield/2000. P. 311-314.
15. Федоринов В.А. Процесс ДНПВ: теория, технология, конструкции. Краматорск: ДГМА, 2003. 316 с.
16. Потапкин В.Ф., Федоринов В.А., Сатонин А.В. Элементы оптимизации технологии деформации полос между неподвижным и приводным валками // Цветные металлы. 1983. №11. С. 56-58.
17. Потапкин В.Ф., Сатонин А.В. Запас пластичности медных сплавов при несимметричной прокатке // Цветные металлы. 1984. №1. С. 79-80.
18. Потапкин В.Ф., Сатонин А.В., Добронос Ю.К. Математическая модель механических свойств и запаса пластичности меди и медно-цинковых сплавов при холодной прокатке // Изв. вузов. Черная металлургия. 1986. №7. С. 58-61.
19. Потапкин В.Ф. Напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при прокатке широких полос: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 32 с.
20. Федоринов В.А. Исследование и внедрение процесса холодной деформации металла между неподвижным и приводным валками: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краматорск, 1981. 24 с.
21. Сатонин А.В. Оптимизация технологических параметров процесса деформации тонких полос между неподвижным и приводным валками и совершенствование механического оборудования для его реализации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краматорск, 1984. 16 с.
22. Pesin A.M., Salganik V.M., Dyja H., Chikishev D.N., Pustovoytov D.O., Kawalek A. Asymmetric rolling: theory and technology // HUTNIK-WIADOMOŚCI HUTNICZE. 2012. No 5. P. 358-363.
23. Dyja H., Wilk K. Asymetryczne walcowanie blach i tasm. Seria: Metallurgia Nr 2. Wydawnictwo Wydziału Metallurgii i Inżynierii Materialowej. Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa. 1998. 268 p.
24. Dyja H., Salganik W.M., Piesin A.M., Kawalek A. Asymetryczne walcowanie blach cienkich: teoria, technologia i nowe rozwiazania. Seria: Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2008. 345 s.
25. Использование целенаправленно создаваемой скоростной асимметрии при прокатке биметалла Ti-Ni / Чукин М.В., Песин А.М., Рыдз Д., Торбус Н., Полякова М.А., Гулин А.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4. С. 49-50.
26. Использование двух факторов асимметрии при толстолистовой прокатке / Песин А.М., Дья Х., Кавалек А., Сжинский П., Пустовойтов Д.О. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4. С. 50-51.
27. Kawalek A. Asymetryczne walcowanie blach grubych w walcowni dwuklatkowej. Seria: Monografie nr 11. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2011. 186 s.

THE INVESTIGATION OF SPEED ASYMMETRY EFFECT ON PARAMETERS OF VARIOUS SHEET ROLLING PROCESSES

Pesin Alexander Moiseevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

Satonin Alexander Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Donbass State Machine-Building Academy, Ukraine.

Dyja Henrik – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa University of Technology, Poland. E-mail: dyja@wip.pcz.pl.

Kawalek Anna – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Czestochowa University of Technology, Poland. E-mail: kawalek@wip.pcz.pl.

Pustovoytov Denis Olegovich – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519)29-85-25. E-mail: pustovoytov_den@mail.ru.

Szyński Paweł – Postgraduate Student, Czestochowa University of Technology, Poland. E-mail: szynski@wp.pl.

Churukanov Alexander Sergeevich – Postgraduate Student, Donbass State Machine-Building Academy, Ukraine. E-mail: amm@dgma.donetsk.ua.

Abstract. The effect of speed asymmetry on the metal structure and force parameters of brass band cold rolling has been investigated. It is shown that with the speed asymmetry increasing the maximum possible summary (before cracking) reduction was increased from 64 to 79%. It was determined in plate rolling that the application of two opposing asymmetry factors permits to reduce the rolling force, as well as to provide the resulting plate without curvature.

Keywords: academic scholar, international collaboration, asymmetric rolling, metal structure, speed asymmetry, finite element modeling, stress-strain state of a metal, ski-effect.

References

1. Pesin A.M. *Zakonomnosti asimetrichnogo deformirovaniya i povysheniye effektivnosti holodnoy listovoi prokatki* [Asymmetric deformation processes laws and development for sheet cold rolling efficiency increase:]. Abstracts of PhD diss. Magnitogorsk, 1989. 21 p.
2. Salganik V.M., Pesin A.M. *Asimetrichnaya tonkolistovaya prokatka: razvitiye teorii, tekhnologii i novye resheniya* [Asymmetric sheet rolling: theory development, technologies and new solutions]. Moscow: MISIS, 1997, 192 p.
3. Pesin A.M. *Modelirovaniye i razvitiye processov asimetrichnogo deformirovaniya dlya povysheniya effektivnosti listovoi prokatki*. [Asymmetric deformation processes modeling and development for sheet rolling efficiency increase:]. Dis. PhD of technical sciences. Magnitogorsk, 2003. 395 p.
4. Pesin A.M. *Modelirovaniye i razvitiye processov asimetrichnogo deformirovaniya dlya povysheniya effektivnosti listovoi prokatki* [Asymmetric deformation processes modeling and development for sheet rolling efficiency increase]. *Modelirovaniye i razvitiye processov OMD* [Metal Forming Processes Modeling and Development]. 2002, no. 1. pp. 107-113.
5. Pesin A.M. Scientific school of asymmetric rolling in Magnitogorsk. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013, no. 5, pp. 23-28.
6. Salganik V.M., Pesin A.M., Trahtengertz E.L., Drigun E.M., Smirnov P.N., Kunitsin G.A. Vnedreniye novykh tekhnologii asimetrichnoi prokatki na OAO MMK [Introduction of new asymmetric rolling technologies at OJSC MMK]. *Modelirovaniye i razvitiye processov OMD* [Metal Forming Processes Modeling and Development]. 2002, no. 1, pp. 128-133.
7. Pesin A.M., Drigun E.M., Chikishev D.N. Razvitiye tekhnologii sovmeshchennogo processa prokatki i plasticheskoigibki [Development of technology of combined rolling and bending plastic process]. *Trudy VI Congressa prokatchikov* [Proceedings of the VI Rolling Congress]. Lipetsk, 2005, pp. 76-81.
8. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Perehogih A.A., Sverdluk M.K. Modelirovaniye sdvigovykh deformatsiy v predelnom sluchae asimetrichnoi tonkolistovoi prokatki [Simulation of shear strain in the extreme case of asymmetric sheet rolling]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no 1, pp. 65-68.
9. Sverdluk M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhovich A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 742, pp. 476-481.
10. Salganik V.M., Pesin A.M., Chikishev D.N., Bereznaya G.A., Pustovoytov D.O. *Processy asimetrichnoi prokatki: teoriya i tekhnologicheskie resheniya* [Asymmetric rolling processes: theory and technological solutions]. Magnitogorsk: Nosov State Technical University, 2013. 128 p.
11. Salganik V.M., Pesin A.M., Chernyahovsky M.B. Matematicheskoe modelirovaniye i razvitiye processov asimetrichnoy tonkolistovoi prokatki [Mathematical modeling and development of asymmetric thin rolling processes]. *Proizvodstvo prokata*. [Rolled Products Manufacturing]. 1998, no. 4, pp. 9-15.
12. Pesin A.M., Salganik V.M., E.M. Drigun, Chikishev D.N. *Ustroystvo dlya asimetrichnoi prokatki tololistovogo metalla* [Device for asymmetrical rolling metal plate]. Patent RF, no. 87649, 2009.
13. Pesin A., Salganik V., Trahtengertz E. Mathematical modeling of the stress-strain state in asymmetrical flattening of metal band / Proceedings of the 9th international conference on metal forming «Metal Forming 2002» (The University of Birmingham, UK, 9-11 September 2002). Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science B.V., Amsterdam-London-New York-Oxford-Paris-Shannon-Tokyo. V. 125-126. 2002. pp. 689-694.
14. Pesin A., Salganik V., Trahtengertz E., Drigun E. Development of the asymmetric rolling theory and technology/ Proceedings of the 8-th International Conference on Metal Forming. Krakow/ Poland/ 3-7 September 2000. Metal Forming 2000. Balkema / Potterdam/ Brookfield/2000. P. 311-314.
15. Fedorin V.A. *Process DNPV: teoriya, tekhnologiya, konstruchiy* [DNPV process: theory, technology, construction]. Kramatorsk: DSMA, 2003, 316 p.
16. Potapkin V.F., Fedorin V.A., Satonin A.V. Elementy optimizatsii tekhnologii deformatsii polos mezhdu nepodvizhnym i privodnym valkami. [Elements of optimization of bands deformation between the fixed and the drive rollers technology]. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals]. 1983, no. 11. pp. 56-58.
17. Potapkin V.F., Satonin A.V. Zapasy plastichnosti mednykh splavov pri nesymmetrichnoy prokatke. [Copper alloys plasticity reserve at asymmetrical rolling]. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals]. 1984, no. 1, pp. 79-80.
18. Potapkin V.F., Satonin A.V., Dobronosov U.K. Matematicheskaya model mekhanicheskikh svoystv i zapasy plastichnosti medi i mednozinkovykh splavov pri holodnoy prokatke [A mathematical model of the mechanical properties and of copper and copper-zinc alloys ductility reserves in the cold rolling]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izv. vuzov Ferrous metals]. 1986, no. 7, pp. 58-61.
19. Potapkin V.F. *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye v ochage deformatsii pri prokatke shirokikh polos* [Stress-strain state in the deformation zone during rolling wide strips]. Abstracts of D.Sc. diss. Moscow, 1981, 32 p.
20. Fedorin V.A. *Issledovaniye i vnedreniye processa holodnoi deformatsii metalla mezhdu nepodvizhnym i privodnym valkami* [Research and introduction of cold metal deformation between the fixed and the drive rollers]. Abstracts of PhD diss. Kramatorsk, 1981, 24 p.
21. Satonin A.V. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov processa deformatsii tonkikh polos mezhdu nepodvizhnym i privodnym valkami i sovershenstvovaniye mekhanicheskogo oborudovaniya dlya ego realizatsii*. [Optimization of technological parameters of deformation of thin strips between the fixed and the drive rolls and improvement of mechanical equipment for its implementation]. Abstracts of PhD diss. Kramatorsk, 1984, 16 p.
22. Pesin A.M., Salganik V.M., Dyja H., Chikishev D.N., Pustovoytov D.O., Kawalek A. Asymmetric rolling: theory and technology. HUTNIK-WIADOMOŚCI HUTNICZE. 2012. No 5. P. 358-363.
23. Dyja H., Wilk K. Asymetryczne walcowanie blach i tasm. Seria: Metallurgia Nr 2. Wydawnictwo Wydziału Metallurgii i Inżynierii Materialowej. Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 1998. 268 p.
24. Dyja H., Salganik W.M., Pesin A.M., Kawalek A. Asymetryczne walcowanie blach cienkich: teoriya, tekhnologiya i nowe rozwiazania. Seria: Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2008. 345 p.
25. Chukin M.V., Pesin A.M., Rydz D., Torbus N., Polyakova M., Gulik A.E. Ispolzovaniye tselenapravlenno sozdavaemoi skorostnoy asymetrii pri prokatke bimetalla Ti-Ni [Using a purposefully created speed asymmetry in the rolling of bimetal Ti-Ni]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 4, pp. 49-50.
26. Pesin A.M., Dyja H., Kawalek A., Szyński P., Pustovoytov D.O., Ispolzovaniye dvukh faktorov asymetrii pri tololistovoi prokatke. [Using two factors asymmetry in plate rolling]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 4, P. 50-51.
27. Kawalek A. Asymetryczne walcowanie blach grubych w walcowni dwukładowej. Seria: Monografie nr 11. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2011. 186 p.