

DOI: 10.17516/1999-494X-0432

УДК 621.771.011

## Analysis of the Bending of an Aluminum Strip with a High Deformation Focus Using Computer Modeling

Denis N. Klepov\*,  
Vasilii V. Yashin, Eugenio V. Arishenskiy,  
Fedor V. Grechnikov and Ilia A. Latyshkin  
*Samara National Research University  
named after Academician S. P. Korolev  
Samara, Russian Federation*

Received 24.08.2022, received in revised form 07.09.2022, accepted 20.09.20222

**Abstract.** Hot rolling simulation model was built considering the influence of such factors as: the difference in coefficient of friction on the upper and lower work rolls, different angle of slab entry into the deformation zone, and the amount of strip bending strain in the vertical plane. The numerical experiment was carried out by finite element simulation in the DEFORM 2D software package. The degree of influence of the above factors and their impact patterns on the rolling process were determined. It was shown that the strip slope value affects the asymmetry more than the difference in friction conditions on the lower and upper rolls. In addition, it was found that the amount of bending can be significantly reduced by increasing the amount of strain. This is due to the fact that a higher amount of strain gives less asymmetry in the rolling zone.

**Keywords:** hot rolling; strip bending; finite element method; aluminum alloys; strain inhomogeneity.

**Acknowledgements.** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 18–79–10099-P, <https://rscf.ru/project/21–79–03041/>

Citation: Klepov, D.N., Yashin, V.V., Arishenskiy, E.V., Grechnikov, F.V., Latyshkin I. A. Analysis of the bending of an aluminum strip with a high deformation focus using computer modeling. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(6), 739–748. DOI: 10.17516/1999-494X-0432

# Анализ изгиба алюминиевой полосы с высоким очагом деформации с помощью компьютерного моделирования

Д. Н. Клепов, В. В. Яшин,  
Е. В. Арышенский, Ф. В. Гречников, И. А. Латушкин  
*Самарский национальный исследовательский университет  
им. акад. С. П. Королева  
Российская Федерация, Самара*

**Аннотация.** Построена имитационная модель горячей прокатки, учитывающая влияние таких факторов, как различие в коэффициенте трения на верхнем и нижнем рабочих валках, различный угол входа заготовки в очаг деформации и степень деформации на изгиб полосы в вертикальной плоскости. Численный эксперимент проводили моделированием методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM 2D. Определены закономерности влияния вышеперечисленных факторов на процесс прокатки. Показано, что величина наклона полосы влияет на асимметрию больше, чем разница в условиях трения на нижнем и верхнем валке. Кроме того, установлено, что величина изгиба может быть значительно снижена за счёт увеличения степени деформации. Это вызвано тем, что рост степени деформации ведет к снижению асимметрии по очагу прокатки.

**Ключевые слова:** горячая прокатка; изгиб полосы; метод конечных элементов; алюминиевые сплавы; неравномерность деформации.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18–79–10099–П, <https://rscf.ru/project/21–79–03041/>

Цитирование: Клепов, Д. Н. Анализ изгиба алюминиевой полосы с высоким очагом деформации с помощью компьютерного моделирования / Д. Н. Клепов, В. В. Яшин, Е. В. Арышенский, Ф. В. Гречников, И. А. Латушкин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(6). С. 739–748. DOI: 10.17516/1999-494X-0432

## Введение

Алюминиевые сплавы характеризуются высокой удельной прочностью, малой массой, коррозионной стойкостью и технологичностью при обработке давлением, что и предопределило их широкое распространение практически во всех сферах хозяйственной деятельности [1–3]. Наиболее востребованы в современной промышленности сплавы 5xxx, плоские листы и плиты из которых получают горячей прокаткой. Одной из актуальных проблем в производстве проката является изгиб полосы в вертикальной плоскости на выходе из межвалкового пространства, что зачастую приводит к остановке прокатки, а также может привести к большим материальным затратам вследствие вывода из строя производственного оборудования.

Очевидно, загиб полосы происходит, если условия деформации в верхней и нижней половине заготовки асимметричны. Обычно асимметрию классифицируют по типу фактора, которым она вызвана. Можно выделить следующие факторы асимметрии: геометрические, поверхностные, кинематические и физико-механические. Геометрическая асимметрия может быть вызвана различием размеров валков [4–5], наклонной подачей полосы в валки из-за несоответствия уровня станинного ролика уровню нижнего рабочего валка. Поверхностная

асимметрия появляется при наличии разных условий трения на контактах полосы с верхним и нижним валками и на практике обусловлена разницей шероховатости валков, неравномерностью подачи смазки, наличием окалины при прокатке черного металла и заалюминивания при прокатке алюминиевых сплавов. Кинематические условия, вызывающие асимметрию, связаны с наличием разницы окружных скоростей валков или их моментов [6]. Под физико-механическими условиями, вызывающими асимметрию, понимается разница свойств металла по высоте очага деформации из-за неравномерного прогрева слитка [7–8]. Однако из-за того, что алюминиевые сплавы обладают высокой теплопроводностью, асимметрия этого типа фактора будет незначительной.

Таким образом, на асимметрию деформации полосы, а, следовательно, и её загиб, влияет много факторов, для учета которых целесообразно разработать математическую модель процесса. Инженерные теории [9–11], основанные на применении гипотезы плоских сечений, здесь не могут быть применены для анализа причин изгиба, так как они не позволяют рассчитать неравномерность по высоте очага деформирования.

Кроме того, расчет изгиба с использованием аналитических формул требует массива данных, полученных в результате экспериментальных прокаток при определенных, заранее заданных условиях. Зачастую возникает ряд проблем, связанных с проведением таких опытов на реальном объекте, из-за больших материальных затрат и вероятности повреждения дорогостоящего производственного оборудования. Во избежание этого в настоящее время исследование различных технологических процессов тесно связывают с использованием пакетов прикладных программ, моделирующих ту или иную ситуацию и дающих практически полную сходимость с экспериментальными данными, что безопаснее, экономичнее и позволяет более детально анализировать тот или иной процесс, нежели лабораторный эксперимент [12–14]. Работа этих программ основана на методе конечных элементов – разбиении тела на заданное количество элементов и поиске решения поставленной задачи. Реализация такой модели возможна в ряде программных комплексов, одним из которых является DEFORM. Такая имитационная модель учитывает максимально возможное количество факторов и фактически служит цифровым двойником процесса прокатки.

Цель данной работы – изучение влияния геометрической и поверхностной асимметрии деформирования на загиб полосы при прокатке алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния с помощью имитационной модели процесса реверсивной прокатки в программном комплексе DEFORM. Достижение данной цели позволит установить связь поверхностной и геометрической асимметрии с особенностями напряженно-деформированного состояния процесса прокатки, условиями трения и углом наклона подачи полосы в валки.

### Постановка задачи

В работе был проведён полный факторный эксперимент процесса горячей прокатки полос, основанный на компьютерном моделировании с использованием метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM. Толщина раската из алюминиевого сплава 5182 на входе – 55 мм, на выходе – 35÷45 мм (при температуре заготовки 480 °С с коэффициентами трения от 0,4 до 0,3). Деформационный акт с такими параметрами в последнем проходе типичен при прокатке алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния.

При полном факторном эксперименте реализуются все возможные сочетания факторов и их уровней при минимальном количестве опытов (табл. 1), что позволяет четко оценить влияние каждого фактора (и их комбинаций) на процесс прокатки.

С целью описания объекта исследования использован метод «черного ящика» [15]. Переменные: относительная деформация в процентах, различные условия трения на контактных поверхностях, угол наклона заготовки на входе в очаг деформации в градусах.

Угол может быть положительным и отрицательным (если задний конец полосы выше или ниже оси прокатки). Поскольку эти случаи симметричны, рассмотрим только один вариант, когда задний конец полосы выше оси прокатки (рис. 1).

Таблица 1. Планирование эксперимента

Table 1. Experiment planning

Параметр варьирувания	Угол наклона заготовки на входе, °	Относительная деформация, %	Абсолютная деформация, мм	мв/мм
Диапазон варьирувания	[0;+5]	[22–36]	[10;20]	[0,75;1,25]

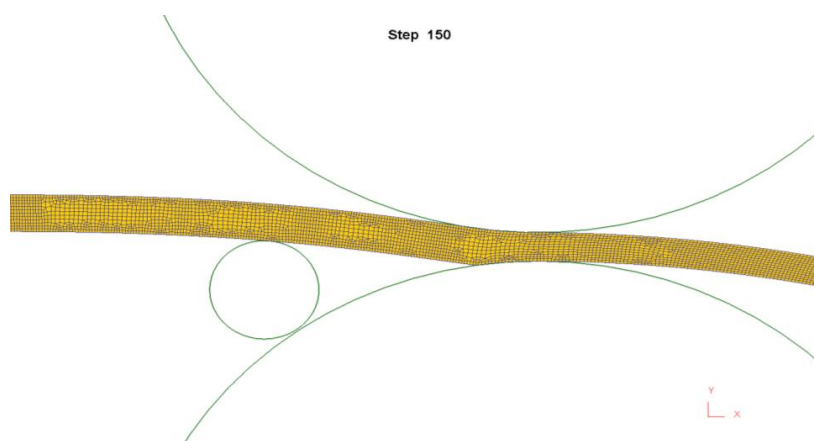


Рис. 1. Расположение ролика, задающего угол наклона заготовки

Fig. 1. The location of the roller that sets the angle of inclination of the work piece

Были использованы следующие допущения:

- принята схема плоского деформированного состояния;
- принято условие изотропности механических свойств металла;
- заготовка определена как пластическое тело в соответствии с общепринятым законом упрочнения для горячей деформации алюминиевых сплавов по модели, разработанной Селларсом [16]:

$$\sigma_m = \frac{1}{\alpha} \left( \operatorname{arcsh} \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right),$$

коэффициенты  $a$ ,  $n$ ,  $A$  для уравнения получены регрессионным анализом кривых, построенных в ходе испытаний горячей деформацией на модуле Hydrawege физического симулятора Gleeble 3800 [17],  $Z$  – параметр Зинера-Холломона, который описывает деформационное поведение металлических материалов при горячей деформации:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right),$$

$\dot{\epsilon}$  и  $T$  – соответственно скорость ( $s^{-1}$ ) и абсолютная температура ( $^{\circ}K$ ) деформации,  $R = 8,314$  Дж/моль  $\cdot$   $^{\circ}K$  – газовая постоянная, а  $Q$  – энергия активации (Дж/моль) процесса, контролирующего горячую деформацию;

- прокатные валки определены как абсолютно жесткое тело (сплющивание валка не учитывалось);
- оценка результатов моделирования проводилось в декартовой системе координат;
- тип моделирования – анализ Лагранжа;
- представление матрицы жесткости – Skyline [2D];
- метод итераций – Ньютона-Рафсона.

Число конечных элементов в валке – 2500, в заготовке – 5000, окружная скорость валка – 2 рад/сек, или 900 мм/с. Ролик на входе диаметром 120 мм. Для заталкивания заготовки в раствор валков смоделирован толкатель, который не оказывает влияния на процесс деформации. Скорость толкателя – 500 мм/сек с шагом 0,005 сек, 500 шагов. Длина раската – 1500 мм.

В результате расчетов была определена величина кривизны переднего конца в зависимости от различных параметров деформации.

Для определения кривизны находили радиус загиба полосы ( $r$  – величина, обратная кривизне) по трем точкам (рис. 2).

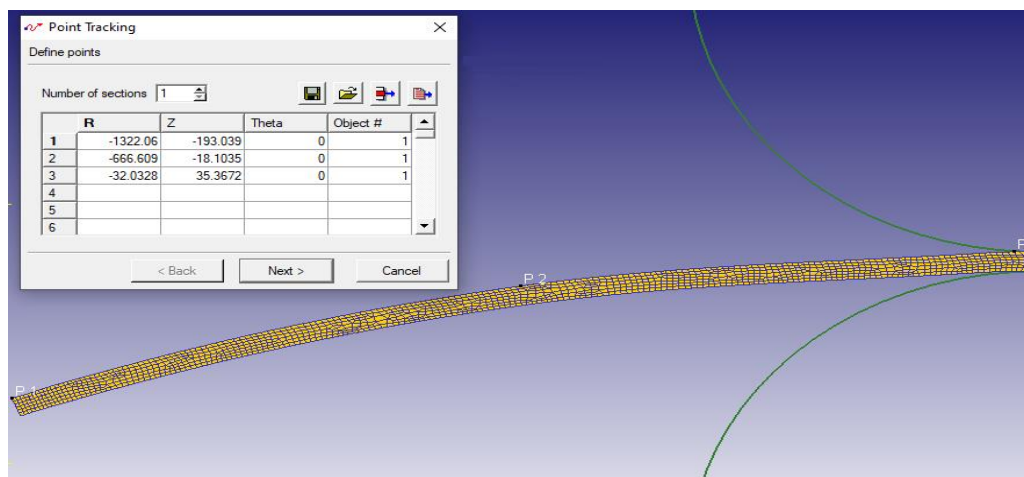


Рис. 2. Определение радиуса загиба

Fig. 2. Determination of the bend radius

Координаты трех точек  $[x_i, y_i]$ , получаемые в результате моделирования процесса, позволяют построить систему из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} r^2 = (x_1 - h)^2 + (y_1 - k)^2 \\ r^2 = (x_2 - h)^2 + (y_2 - k)^2 \\ r^2 = (x_3 - h)^2 + (y_3 - k)^2 \end{cases}$$

где  $h$  и  $k$  – координаты центра окружности.

Точность модели оценивали путём сравнения расчётных данных с фактическими взятыми с мониторинговых систем стана по силе прокатки на каждом проходе. Силу прокатки измеряли штатными месдозами фирмы Kelk, установленными под подушками нижних опорных валков. Погрешность измерения – 0,1 % с индикацией значения силы прокатки на панели оператора (рис. 3).

Критерием оценки выбрана величина среднеквадратичного отклонения:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{\text{расч}})^2}}{n},$$

$$S = \frac{s}{P_{\text{ср}}} \cdot 100\%.$$

### Результаты моделирования

На рис. 3 представлено сравнение силы, рассчитанной с помощью моделирования и измеренной экспериментально.

Наибольшее среднеквадратичное отклонение составило 2,6 %. Точность имитационной модели достаточна для применения результатов на практике.

По результатам моделирования построены графики, представленные на рис. 4.

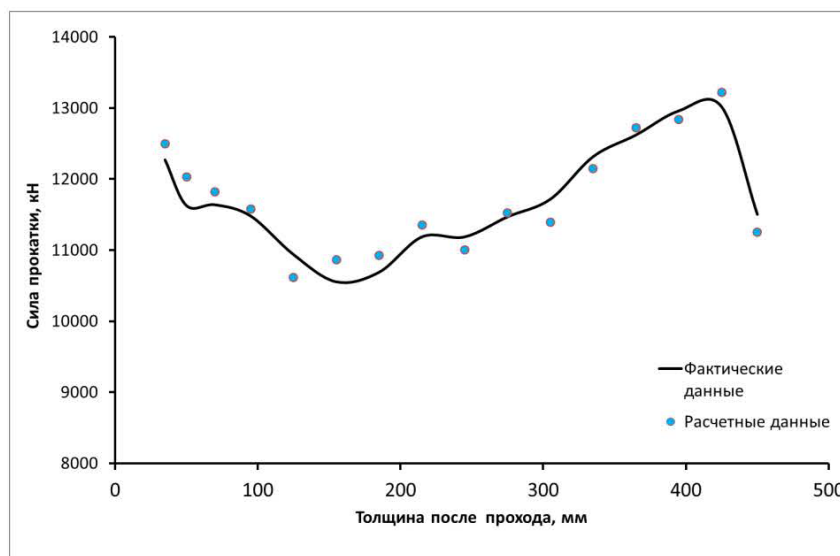


Рис. 3. Сравнение расчетных и фактических данных

Fig. 3. Comparison of calculated and actual data

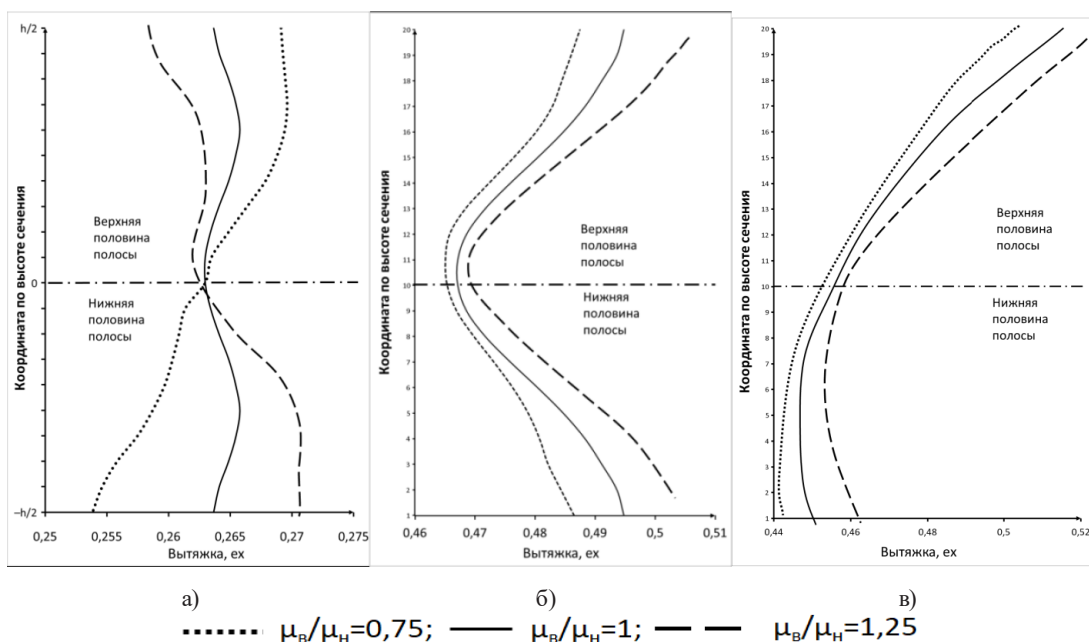


Рис. 4. Деформации  $e_x$  по сечению заготовки в зависимости от отношения коэффициентов трения на верхней и нижней контактных поверхностях: а) – деформация 22 %, без наклона заготовки на входе; б) – деформация 36 %, без наклона на входе; в) – деформация 36 %, с наклоном заготовки 5°

Fig. 4.  $e_x$  deformations along the section of the workpiece depending on the ratio of the friction coefficients on the upper and lower contact surfaces: а) – deformation of 22 %, without inclination of the workpiece at the inlet; б) – deformation of 36 %, without inclination at the entrance; в) – deformation of 36 %, with a 5° inclination of the workpiece

Из графиков видно, что в процессе прокатки при одинаковых коэффициентах трения на верхней и нижней поверхностях и без угла наклона заготовки вытяжка  $e_x$  имеет симметричное распределение относительно оси образца, распределение угловой деформации  $\gamma_{xy}$  имеет также симметричный вид, но с переменной знака.

Из сравнения 4а и 4б следует, что при увеличении деформации (следовательно, и длины дуги захвата) все больше начинает сказываться подпирательное действие силы трения. Кривая распределения деформаций принимает немонотонный вид (парабола) с экстремумом в середине заготовки. Кроме того, при увеличении степени деформации её распределение по очагу прокатки, в случае различия коэффициентов трения на верхнем и нижнем валках, становится более симметричным.

Изменение условий трения приводит к изменению характера распределения деформации: при относительной деформации 22 % увеличение коэффициента трения на верхнем валке приводит к снижению линейных деформаций в верхней половине заготовки и увеличению в нижней и наоборот. В случае прокатки с относительной деформацией 36 % при варьировании трения на валках изменяется величина деформации, а её распределение неизменно.

Влияние угла входа в очаг деформации на компоненты тензора деформаций показано на рис. 4в. Экстремум кривой распределения деформации смещается в сторону наклона заготовки ( $-h/8$ ). Таким образом, неравномерность деформаций приобретает более явный вид.

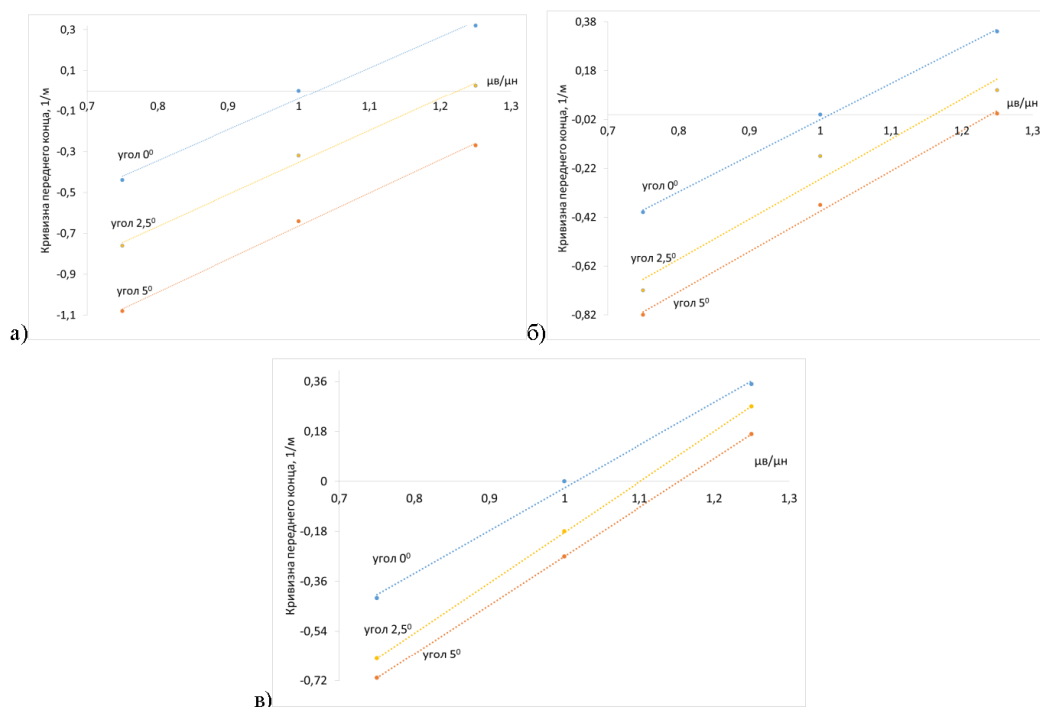


Рис. 5. Кривизна переднего конца в зависимости от относительной степени деформации, отношения коэффициентов трения и угла наклона заготовки на входе в очаг деформации: а) – деформация 22 %; б) деформация 30 %; в) деформация 36 %

Fig. 5. The curvature of the front end depending on the relative degree of deformation, the ratio of the coefficients of friction and the angle of inclination of the workpiece at the entrance to the deformation center: а) – deformation 22 %; б) deformation 30 %; в) deformation 36 %

Из вышесказанного следует, что угол наклона заготовки на входе оказывает большее из всех исследуемых параметров влияние на загиб переднего конца полосы.

На рис. 5 показана зависимость радиуса кривизны (ось ординат) от отношения между коэффициентами трения (ось абсцисс) для различных углов наклона полосы и степени деформации.

Изменение угла наклона с  $0^\circ$  до  $5^\circ$  приводит к увеличению кривизны выходного конца раската. Наибольший изгиб (внутри исследуемого диапазона) можно наблюдать при обжатии заготовки 10 мм ( $\epsilon=22\%$ ) с углом входа в очаг деформации  $5^\circ$ . Увеличение степени деформации за счет повышения симметричности её распределения по очагу позволяет снизить кривизну загиба. Такой же эффект по снижению степени загиба можно получить за счет варьирования коэффициентами трения на верхней и нижней поверхностях.

### Заключение

В работе с помощью имитационной модели в конечно-элементном комплексе DEFORM 2D исследовано влияние на величину изгиба заготовки таких факторов, как отношение коэффициентов трения на верхней и нижней контактных поверхностях, угол входа заготовки и степень деформации по сравнению с коэффициентом трения. Моделирование показало, что величина изгиба может быть изменена путем соответствующего выбора этих параметров.



Установлено, что угол наклона полосы имеет наибольшее влияние на изгиб при прокатке по сравнению с коэффициентом трения. Увеличением степени деформации можно снизить несимметричность её распределения по очагу прокатки и уменьшить тем самым величину её изгиба.

### Список литературы / References

[1] Белов Н. А. и др. Экономнолегированные алюминиевые сплавы нового поколения. *Металлург*, 2010, 5, 62–66 [Belov N. A. et al. Economically alloyed aluminum alloys of a new generation. *Metallurg*, 2010, 5, 62–66 (in Russian)].

[2] Сизяков В. М., Бажин В. Ю., Власов А. А. Состояние и перспективы развития производства алюминия. *Металлург*, 2010, 7, 4–7 [Sizyakov V. M., Bazhin V. Yu., Vlasov A. A. Status and prospects for the development of aluminum production status and prospects for the production of aluminum, *Metallurg*, 2010, 7, 4–7 (in Russian)]. EDN MUDLUX.

[3] Деев В. Б., Селянин И. Ф., Войтков А. П. Технологии обработки алюминиевых сплавов в процессе их приготовления. *Литейное производство*, 2006, 9, 13–15 [Deev V. B., Selyanin I. F., Voitkov A. P. Processing technologies for aluminum alloys during their preparation. *Foundry production*, 2006, 9, 13–15 (in Russian)]. EDN HVJKFH.

[4] Грудев А. П. *Теория прокатки*: учебник для вузов. М., Металлургия, 1988, 240 с. [Grudev A. P. *Theory of rolling*. Moscow, 1988, 240 p. (in Russian)].

[5] Николаев В. А., Васильев А. А. Изгиб полосы и другие параметры несимметричной прокатки. *Сталь*, 2013, 7, 42–49. [Nikolaev V. A. and Vasil'ev V. A. Strip bending and other parameters of asymmetric rolling. *Steel*, 2013, 7, 42–49 (in Russian)]. EDN QESKQR.

[6] Карпицкий В. С., Карпицкий Ю. В. *Факторы, влияющие на изгиб полосы и неравномерность распределения крутящих моментов между вальцами при несимметричной прокатке*, 2013. [Karpitsky V. S. and Karpitsky Yu. V. *Factors influencing strip bending and uneven distribution of torques between rolls during asymmetric rolling*, 2013 (in Russian)].

[7] Вронски С. и соавт. Трёхмерный анализ асимметричной прокатки с плоским и наклонным входом. *Архив металлургии и материалов*, 2014, 59 [Wronski S. et al. Three-dimensional analysis of asymmetric rolling with flat and inclined entry. *Archive of metallurgy and materials*, 2014, 59 (in Russian)].

[8] Шиинский П. и др. Анализ изменения силы давления и изгиба полосы при прокатке толстых листов в чистовой клетке. *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении*. Екатеринбург, 2014 [Shiinsky P. et al. Analysis of the change in the pressure force and bending of the strip during rolling of thick sheets in the finishing stand. *Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering*. Yekaterinburg, 2014 (in Russian)].

[9] Тутышкин Н. Д., Гвоздев А. Е., Трегубов В. И. [и др.]. *Комплексные задачи теории пластичности*. 2-е изд., перераб. и доп. Тула: Тульский гос. ун-т, 2015, 408 с. [Tutyshkin N. D., Gvozdev A. E., Tregubov V. I. [et al.]. *Complex problems of the theory of plasticity*. 2nd ed., revised and enlarged. Tula, 2015, 408 p. (in Russian)]. ISBN 978–5–7679–3163–7. EDN ULPBAR.

[10] Трусов П. В., Швейкин А. И. *Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019, 605 с. [Trusov P. V., Shveikin A. I. *Multilevel models of mono- and polycrystalline materials: theory, algorithms, examples of application*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2019, 605 p. (in Russian)].

*algorithms, application examples*. Novosibirsk, 2019, 605 p. (in Russian)]. ISBN 978–5–7692–1661–9. DOI 10.15372/MULTILEVEL2019TPV. EDN BCSSTZ. EDN BCSSTZ.

[11] *Теория пластических деформаций металлов* / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. М., Машиностроение, 1983, 598 с. [*Theory of plastic deformations of metals*. By E. P. Unksov, W. Johnson, V. L. Kolmogorov and others; ed. by E. P. Unksov, A. G. Ovchinnikov. Moscow, 1983, 598 p. (in Russian)].

[12] Дема Р. Р., Платов С. И., Козлов А. В. [и др.]. Компьютерное моделирование и исследование процесса горячей прокатки на базе программного комплекса DEFORM-3D. *Производство проката*, 2018, 11, 36–40. [Dema, R.R., Platov, S.I., Kozlov, A. V. Computer simulation and study of the hot rolling process based on the DEFORM-3D software package *Proizvodstvo prokata*, 2018, 11, 36–40 (in Russian)]. DOI 10.31044/1684–257X-2018–11–36–40. EDN SKSVOD.

[13] Дриц А. М., Нуждин В. Н., Слюсаренко А. Л. [и др.] Исследование процесса нагартовки плит из алюминиевого сплава 1565 ч системы Al-Mg. *Технология легких сплавов*, 2013, 2, 85–88 [Drits A. M., Nuzhdin V. N., Slyusarenko A. L. [et al.] Study of the process of hardening of plates from aluminum alloy 1565ch of the Al-Mg system. *Technology of light alloys*, 2013, 2, 85–88 (in Russian)]. EDN RARXUH. EDN RARXUH.

[14] Пенкин А. В. Расчет величины истинной деформации при поперечно-винтовой прокатке: моделирование методом конечных элементов. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика*, 2013, 26(169), 169–175 [Penkin A. V. Calculation of the true strain value in helical rolling: finite element modeling. *Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics*, 2013, 26(169), 169–175 (in Russian)]. EDN SFRWHZ.

[15] Башев А. А. О выборе математических моделей, идентификации и адекватности динамических систем. *Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-тех. ст., посвященный 80-летию со дня рождения проф. С. В. Хватова*, Нижний Новгород, 21 декабря 2018 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2018, 66–69 [Bashev A. A. On the choice of mathematical models, identification and adequacy of dynamic systems. *Actual problems of the electric power industry: a collection of scientific and technical articles: dedicated to the 80th anniversary of prof. S. V. Khvatov*, Nizhny Novgorod, December 21. Nizhny Novgorod, 2018, 66–69 (in Russian)]. EDN XTPIDJ.

[16] Rushchits S. V. et al. Modeling the hot deformation behavior of 1565ch aluminum alloy. *Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd*, 2016, 684, 35–41.

[17] Yashin V. V. et al. Development of a Mathematical Model of Plate Rolling on Hot Reversing Mills. *Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd*, 2017, 746, 48–55.