

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕМОНОТОННОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С РАССОГЛАСОВАНИЕМ СКОРОСТЕЙ ВАЛКОВ

Песин А.М.<sup>1</sup>, Пустовойтов Д.О.<sup>1</sup>, Швеева Т.В.<sup>1</sup>, Стеблянка В.Л.<sup>1</sup>, Федосеев С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### Аннотация

Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) применяются для получения ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов повышенной прочности. Однако известные методы ИПД представляются мало подходящими для практического применения, особенно для обработки конструкционных металлических материалов больших размеров, таких как лист или полоса. К методам ИПД иногда относят обычные методы обработки металлов давлением, например листовую прокатку, которая при определенных условиях также позволяет обрабатывать металлы с большой интенсивностью деформации. Однако между обычной листовой прокаткой и ИПД существует принципиальное отличие, которое заключается в том, что в первом случае реализуется монотонная деформация, а во втором – немонотонная. В этой связи актуальным является разработка нового процесса листовой прокатки, обеспечивающего немонотонный характер течения металла при его обработке. Перспективным с этой точки зрения является метод асимметричной тонколистовой прокатки с рассогласованием окружных скоростей валков. Целью работы являлось математическое моделирование и анализ взаимосвязи немонотонности течения металла с интенсивностью деформации при холодной асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков. Математическое моделирование проводили методом конечных элементов в объемной постановке задачи с использованием специализированного программного комплекса DEFORM 3D. В работе показано, что поворотная деформация и сдвиги обеспечивают значительное приращение интенсивности деформации металла при асимметричной тонколистовой прокатке, что является отличительной особенностью этого процесса как метода ИПД. Показано, что немонотонность течения металла, создаваемая при асимметричной прокатке, приводит к дополнительному увеличению интенсивности деформации (в 1,9 раза) в сравнении с обычной прокаткой при прочих равных условиях. Однако немонотонность течения металла является причиной вертикального изгиба полосы. Теоретические результаты данной работы могут быть использованы при разработке деформационных режимов асимметричной тонколистовой прокатки металлических материалов для получения в них УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, метод конечных элементов, немонотонность деформации, асимметричная прокатка, сдвиговая деформация, алюминиевый сплав.

*Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10030).*

### Введение

Для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов повышенной прочности применяют методы ИПД, позволяющие достичь больших деформаций материалов при относительно низких температурах [1]. Известные методы ИПД, как, например, равноканальное угловое прессование или кручение под высоким давлением, к настоящему времени достаточно хорошо изучены, однако, представляются мало подходящими для практического применения, особенно для обработки конструкционных металлических материалов больших размеров, таких как лист или полоса.

К методам ИПД иногда относят обычные методы обработки металлов давлением (ОМД), напри-

мер листовую прокатку, которая при определенных условиях также позволяет обрабатывать металлы с большой степенью деформации [1–3]. Однако между обычным методом деформации и ИПД существует принципиальное отличие, которое заключается в том, что первый приводит к формированию преимущественно субзернистой структуры, а второй – зернистой, что наделяет такие металлы особенно высокими механическими свойствами [1–3]. Указанное отличие обусловлено тем, что при ИПД применяется немонотонная деформация, а в обычных методах ОМД – монотонная [1–3].

В механике сплошной среды деформированное состояние материальной точки описывается тензором, представляющим собой сумму симметричного тензора деформации и кососимметричного тензора поворота, которые, в общем случае, учитывают все составляющие деформации: линейные, угловые и поворотные [1–3]. В теории ОМД во вни-

мание принимают лишь симметричный тензор деформации. Это обусловлено тем, что во многих процессах, например при обычной листовой прокатке, повороты малы и практически не влияют на формоизменение заготовки. Однако при больших немонотонных деформациях поворотная мода ответственна за формирование угловых разориентировок границ и получение ультрамелких зерен с равноосной формой [1–3]. Значительный вклад поворотной моды в общую деформацию и отличает методы ИПД от обычных методов монотонной деформации. Поэтому после ИПД металлы приобретают более изотропный и повышенный уровень механических свойств, чем после монотонного деформирования, приводящего к формированию анизотропной субзеренной структуры [1–3].

Перспективным методом ИПД с точки зрения возможности его практического применения является метод асимметричной тонколистовой прокатки [4–11]. Целенаправленная асимметрия процесса достигается за счет рассогласования окружных скоростей валков, при этом холодную прокатку осуществляют в условиях высокого контактного трения с большими разовыми деформациями. Фактор асимметрии, с одной стороны, приводит к снижению отрицательного влияния контактных сил трения и, как следствие, возможности увеличения деформаций сжатия при прокатке. С другой стороны, силы контактного трения становятся противоположно направленными, что обеспечивает создание значительных сдвиговых деформаций [4–11].

Целью данной работы является математическое моделирование и анализ взаимосвязи немонотонности течения металла с интенсивностью деформации при холодной асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков.

#### Материалы и метод исследования

Одним из эффективных методов численного решения задач механики и кинематики деформируемого твердого тела является метод конечных

элементов. Математическое моделирование процесса асимметричной тонколистовой прокатки проводили в объемной постановке задачи с использованием специализированного программного комплекса DEFORM 3D. При математическом моделировании процесса были приняты следующие допущения: 1) деформируемая среда – упрочняющаяся жесткопластическая; 2) рабочие валки – абсолютно жесткие; 3) условия – изотермические, поэтому прокатку проводили при низкой скорости деформирования (10 мм/с). Контактное трение описывали согласно закону Кулона:

$$\tau = \mu p \text{ при } \mu p < k, \quad (1)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение трения;  $\mu$  – коэффициент трения;  $p$  – контактное нормальное напряжение;  $k$  – предел текучести на сдвиг.

Деформируемый материал – алюминиевый сплав 5083, кривую текучести которого (при 20°C) задавали из библиотеки материалов DEFORM 3D. Реверсивную прокатку проводили без натяжений за два прохода с обжатиями по 50% по двум вариантам: 1) симметричная прокатка; 2) асимметричная прокатка. Исходные данные для моделирования процесса (рис. 1): 1) начальные размеры заготовки: толщина 2,0 мм, ширина 20 мм; длина 25 мм; 2) исходная заготовка состояла из 7110 восьмиузловых конечных элементов (brick) толщиной 0,33 мм; 3) температура деформируемого металла 20°C; 4) радиус валков  $R=100$  мм; 5) коэффициент трения  $\mu=0,1$  при симметричной прокатке и  $\mu=0,4$  при асимметричной прокатке. При симметричной прокатке окружные скорости нижнего ( $V_1$ ) и верхнего ( $V_2$ ) валков были одинаковые в каждом проходе и составляли 10 мм/с. При асимметричной прокатке задавали рассогласование окружных скоростей валков за счет снижения скорости верхнего валка  $V_2$  на 50% относительно окружной скорости нижнего валка  $V_1=10$  мм/с.

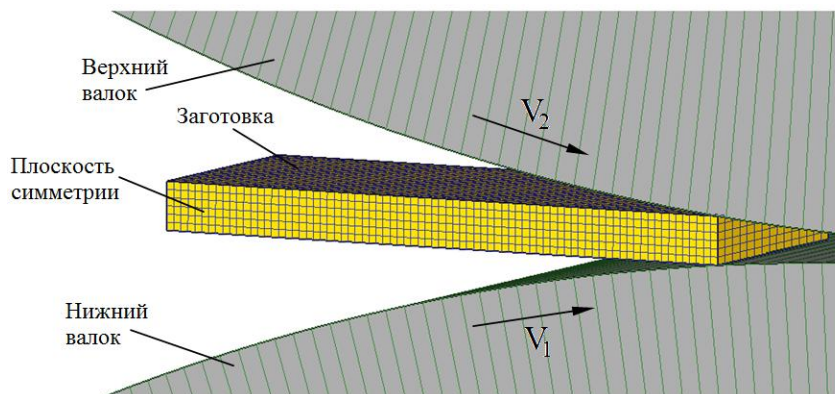


Рис. 1. Схема процесса тонколистовой прокатки

## Результаты моделирования и их обсуждение

Монотонность и немонотонность течения металла могут быть продемонстрированы на примере известных геометрических образов деформации. Образом симметричного тензора деформации является эллипс, а образом кососимметричного тензора – аксиальный вектор поворота, понижающий этот эллипс [1–3]. Если деформация монотонная, то вектор поворота мал, и он практически не оказывает существенного влияния на деформированное состояние металла. Оси эллипса в этом случае практически не изменяют своего положения в пространстве, заготовка вытягивается в направлении, совпадающем с большим диаметром эллипса (рис. 2). Этот случай соответствует обычному процессу симметричной тонколистовой прокатки, для которого справедлива формула оценки степени деформации в виде значения натурального логарифма

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (2)$$

где  $h_0$  – начальная толщина полосы;  $h_1$  – конечная толщина полосы.

Если же вектор поворота большой, деформация немонотонная, тогда эллипс непрерывно изменяет не только форму, но и направление своих осей в соответствии с изменением направления вытяжки заготовки (рис. 3). Этот случай соответствует процессу асимметричной тонколистовой прокатки, для которого при плоской деформации справедлива следующая формула оценки степени деформации, учитывающая угол сдвига (поворота) [11]:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left( \ln \frac{h_0}{h_1} \right)^2 + \left( \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол сдвига (поворота).

Характер деформации металла при симметричной и асимметричной прокатке существенно отличается (рис. 4).

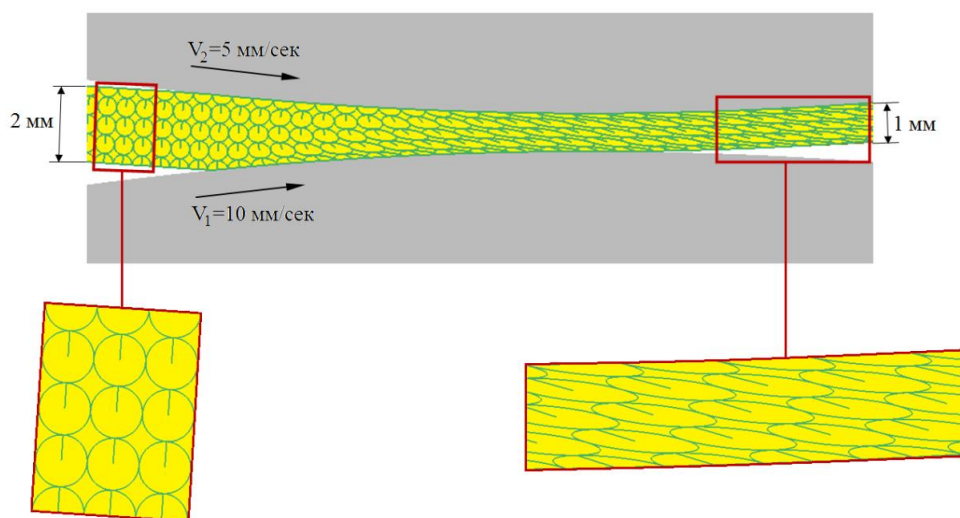


Рис. 2. Немонотонный характер течения металла при асимметричной прокатке (первый проход)

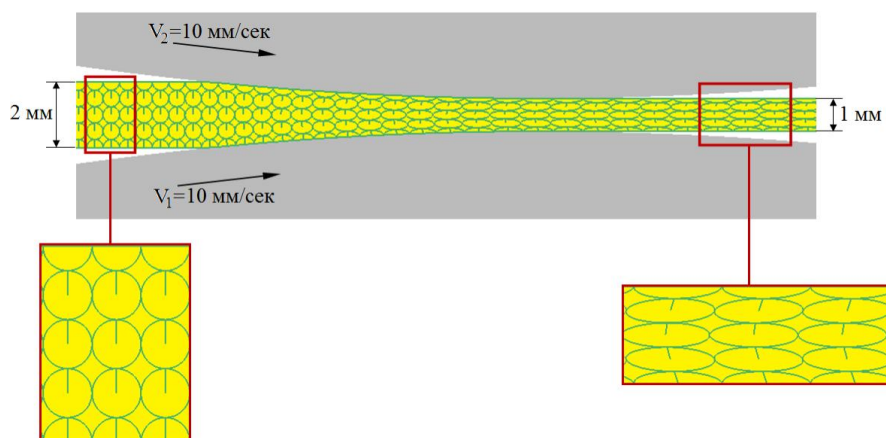


Рис. 3. Монотонный характер течения металла при симметричной прокатке (первый проход)

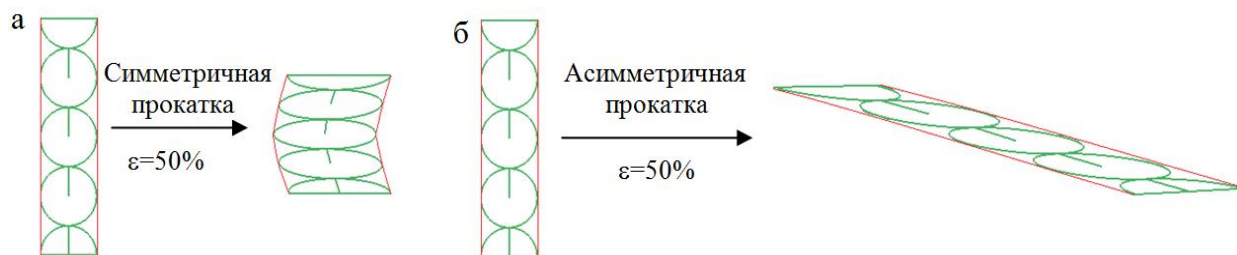


Рис. 4. Характер деформации металла при симметричной (а) и асимметричной (б) прокатке (первый проход)

На практике деформированное состояние металла при обработке давлением удобно оценивать не тензорами, а более простой инвариантной скалярной величиной – интенсивностью деформации. Известно, что основная роль в формировании структуры и свойств материала принадлежит механике процесса деформации. Значительная немонотонность течения металла при асимметричной прокатке приводит к существенному увеличению интенсивности деформации с 0,8 до 1,5 в сравнении с обычной прокаткой (рис. 5). Полученные значения интенсивности деформации металла для случая симметричной прокатки полностью согласуются с величиной, рассчитанной по формуле (2). В свою очередь, значения интенсивности деформации металла для случая асимметричной прокатки согласуются с формулой (3) при величине угла сдвига (поворота)  $65^\circ$ .

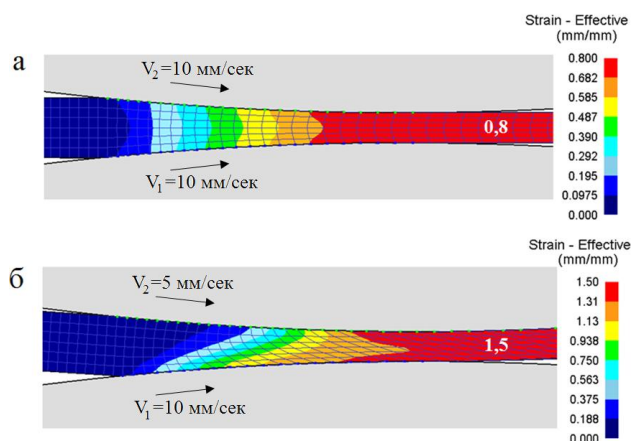


Рис. 5. Интенсивность деформации при симметричной (а) и асимметричной (б) прокатке (первый проход с относительным обжатием 50%)

Монотонный (ламинарный) характер течения металла сохраняется и во втором проходе при симметричной прокатке (рис. 6), хотя суммарное относительное обжатие составляет 75%. Такое течение металла, как указано в работах [1–3], приводит к образованию продольных деформационных полос. В свою очередь, при асимметричной прокатке после второго прохода немонотонность деформации только возрастает (рис. 7). Изменение направления максимального удлинения соответствует изменению положения большой оси эллипса. Характер деформации при больших сдвигах становится подобным турбулентному течению.

Немонотонность течения металла при асимметричной прокатке во втором проходе также приводит к существенному увеличению интенсивности деформации с 1,6 до 3,0 в сравнении с обычной прокаткой (рис. 8). Таким образом, существенная немонотонность течения металла достигается в наибольшей степени при использовании процесса асимметричной прокатки, основанного на схеме сдвига.

Однако следует отметить, что в сравнении с обычным процессом при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков объемное деформированное состояние металла становится неоднородным по ширине полосы (рис. 9, 10). Максимальное значение интенсивности деформации наблюдается в центральной части полосы, что, очевидно, связано с плоскодеформированным состоянием металла в этой области. С увеличением ширины полосы равномерность распределения деформации будет возрастать. Кроме того, немонотонность течения металла, создаваемая за счет больших сдвиговых деформаций при асимметричной прокатке, приводит к вертикальному изгибу полосы (рис. 9, б и 10, б).



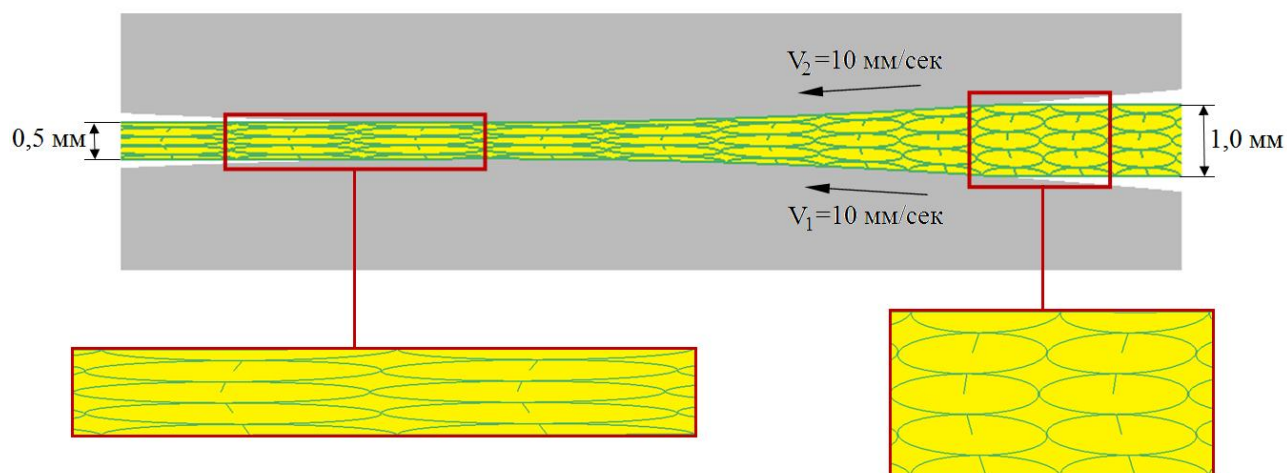


Рис. 6. Монотонный характер течения металла при симметричной прокатке (второй проход с относительным обжатием 50%)

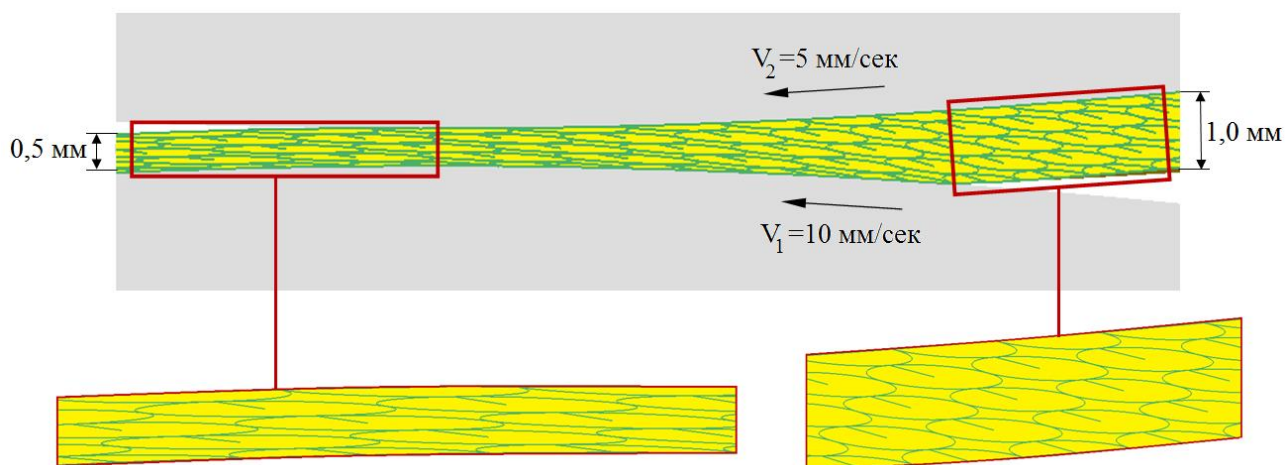


Рис. 7. Немонотонный характер течения металла при асимметричной прокатке (второй проход с относительным обжатием 50%)

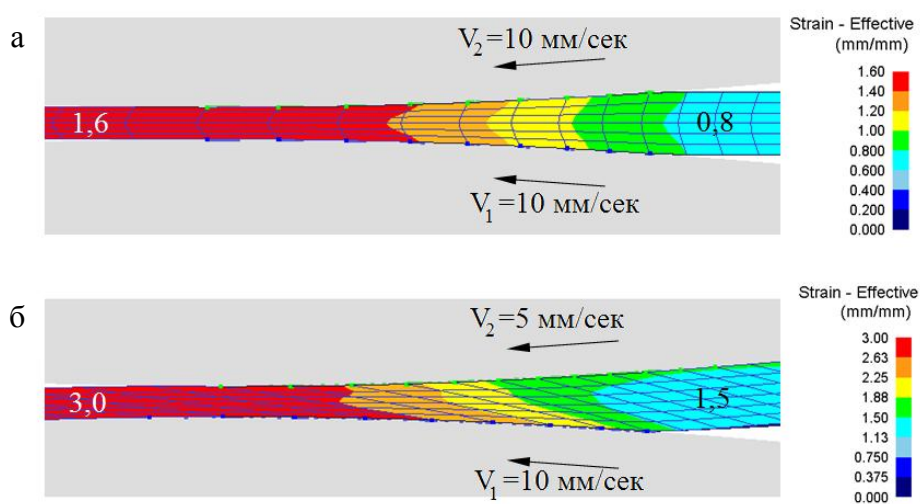


Рис. 8. Интенсивность деформации металла при симметричной (а) и асимметричной (б) прокатке (второй проход с относительным обжатием 50%)

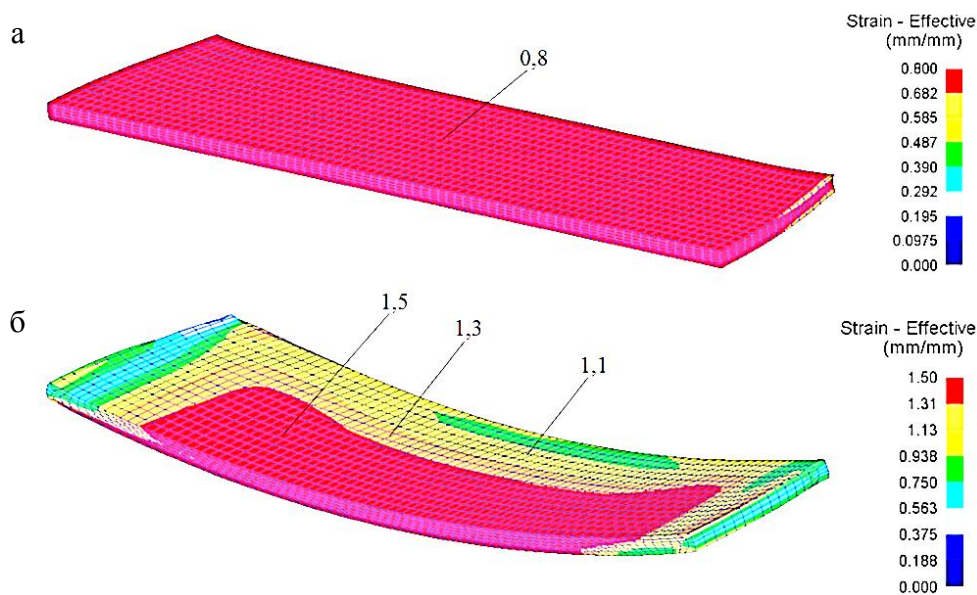


Рис. 9. Распределение интенсивности деформации в объеме заготовки после первого прохода: а – после симметричной прокатки; б – после асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков (относительное обжатие 50%)

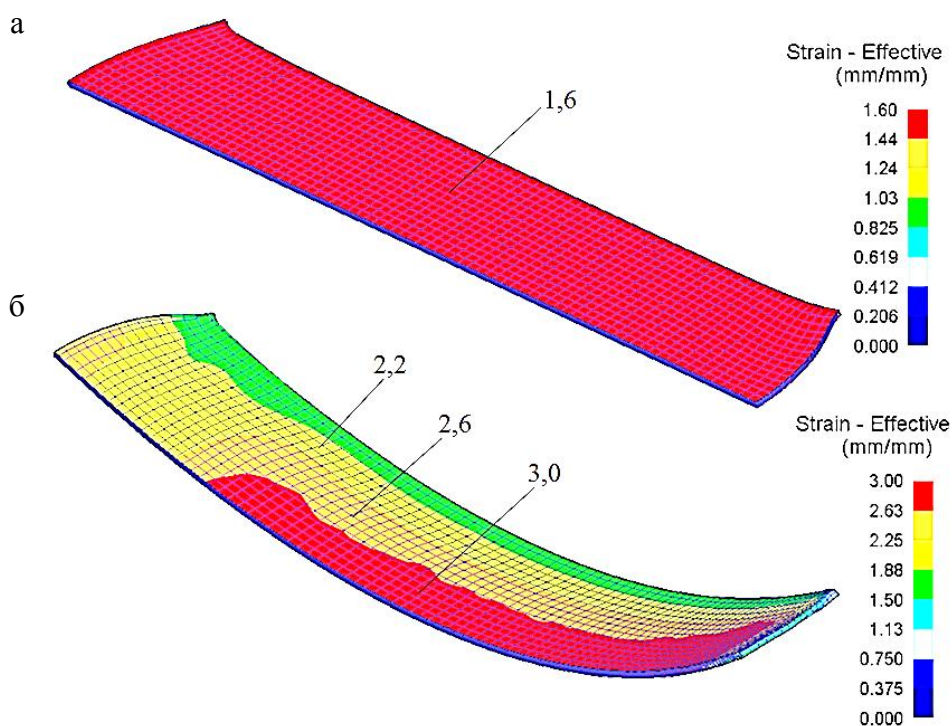


Рис. 10. Распределение интенсивности деформации в объеме заготовки после второго прохода: а – после симметричной прокатки; б – после асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков (суммарное относительное обжатие 75%)

### Выводы

1. В работе рассмотрена роль сдвиговой и поворотной составляющих деформации при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей валков. Показано, что поворотная деформация и

сдвиги обеспечивают значительное приращение интенсивности деформации металла, что является отличительной особенностью процесса асимметричной прокатки как метода ИПД.

2. Немонотонность течения металла при асимметричной прокатке приводит к дополни-

тельному увеличению интенсивности деформации в 1,9 раза (с 1,6 до 3,0) в сравнении с обычной прокаткой при равном суммарном относительном обжатии 75%.

3. При асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков объемное деформированное состояние металла становится неоднородным по ширине полосы. Максимальное значение интенсивности деформации наблюдается в центральной части полосы, находящейся в условиях плоскодеформированного состояния металла.

4. Немонотонность течения металла, создаваемая за счет больших сдвиговых деформаций при асимметричной прокатке, приводит к вертикальному изгибу полосы.

5. Теоретические результаты данной работы могут быть использованы при разработке деформационных режимов асимметричной тонколистовой прокатки металлических материалов для получения в них УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

#### Список литературы

1. Утяшев Ф.З. Кинематика течения и структурообразование металла при интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2013. Т. 23. № 1. С. 45–55.
2. Утяшев Ф.З. Теоретические и прикладные аспекты получения и применения объемных ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. №9. С. 12–18.
3. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2010. Т. 20. № 1. С. 7–25.
4. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // Materials Science and Engineering: A. Vol. 499. 2009. P. 14–17.
5. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Kralics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling // Mechanical Engineering. Vol. 56. 2012. P. 111–115.
6. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling // Scripta Materialia. Vol. 60. 2009. P. 905–908.
7. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling // Journal of Alloys and Compounds. Vol. 536S. 2012. P. S122–S125.
8. Cui Q., Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling // Materials Science and Technology. 2000. Vol. 16. P. 1095–1101.
9. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 18. 2008. P. 774–777.
10. Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 32–40.
11. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // Key Engineering Materials. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.

Материал поступил в редакцию 19.07.16.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63

## SIMULATION OF NONMONOTONIC METAL FLOW DURING ASYMMETRIC SHEET ROLLING WITH DIFFERENT VELOCITIES OF THE ROLLS

**Aleksander M. Pesin** – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5443-423X>

**Denis O. Pustovoytov** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pustovoytov\_den@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0496-0976>

**Tatiana V. Shveeva** – Research Engineer

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: asttv@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4726-6215>

**Valery L. Steblyanko** – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.steblyanko@mail.ru

**Sergei A. Fedoseev** – D.Sc. (Eng.), Professor

Perm State National Research Polytechnic University, Russia. E-mail: fsa@gelicon.biz

#### Abstract

**Problem Statement (Relevance):** Severe plastic deformation (SPD) techniques are used in the production of high-strength ultrafine-grained (UFG) metals and alloys. However, the existing SPD techniques seem to

be lacking in practicality, especially when processing large-size construction materials such as steel sheets or strips. Conventional metal forming processes (for example, sheet rolling) can sometimes be described as SPD techniques because, under certain conditions, they



can also cause high strains. However, there is an essential difference between the conventional sheet rolling and SPD as the former implies monotonic strain whereas the latter – nonmonotonic strain. Therefore, it appears to be important to develop a new sheet rolling process that would provide nonmonotonic flow of metal under processing. In this regard, an asymmetric sheet rolling process with different peripheral velocities of the rolls offers a great potential. **Objectives:** The aim of the research was to apply mathematical modeling to analyse the relationship between nonmonotonic metal flow and strain intensity during a process of cold asymmetric sheet rolling with different peripheral velocities of the rolls. **Methods Applied:** The finite element method was applied for mathematical modeling together with the DEFORM 3D specialized software. **Findings:** It is demonstrated that rotation strain and shear strain provide a significant increment to the intensity of strain during asymmetric sheet rolling, which differentiates this process as an SPD technique. It is shown that nonmonotonic metal flow caused by asymmetric rolling results in an increased strain intensity (1.9 times) versus conventional rolling, all other conditions being equal. At the same time, nonmonotonic metal flow can cause the strip to sweep. **Practical Relevance:** The results of this research can be used to develop deformation scenarios for asymmetric sheet rolling aimed at obtaining UFG structure and high strength in metallic material.

**Keywords:** Severe plastic deformation, finite element method, nonmonotonic strain, asymmetric rolling, shear strain, aluminum alloy.

*This research was carried out as part of the grant awarded by the Russian Science Foundation (Project #15-19-10030).*

## References

1. Utyashev F.Z. Metal flow and structure formation during severe plastic deformation. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [High pressure physics and technology]. 2013, vol. 23, no. 1, pp. 45–55. (In Russ.)
2. Utyashev F.Z. The theoretical and applied aspects of production and application of bulk ultrafine-grained and nanostructured materials. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and aerospace technology]. 2010, no. 9, pp. 12–18. (In Russ.)
3. Utyashev F.Z. The nanostructuring of metallic materials by severe plastic deformation. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [High pressure physics and technology]. 2010, vol. 20, no. 1, pp. 7–25. (In Russ.)
4. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, vol. 499, pp. 14–17.
5. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Kralics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling. *Mechanical Engineering*. 2012, vol. 56, pp. 111–115.
6. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling. *Scripta Materialia*. 2009, vol. 60, pp. 905–908.
7. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012, vol. 536S, pp. S122–S125
8. Cui Q., Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling. *Materials Science and Technology*. 2000, vol. 16, pp. 1095–1101.
9. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008, vol. 18, pp. 774–777.
10. Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4 (48), pp. 32–40. (In Russ.)
11. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 622–623, pp. 929–935.

Received 19/07/16

## Образец для цитирования

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Швеева Т.В., Стеблянко В.Л., Федосеев С.А. Моделирование немонотонности течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 56–63. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63

## For citation

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Shveeva T.V., Steblyanko V.L., Fedoseev S.A. Simulation of nonmonotonic metal flow during asymmetric sheet rolling with different velocities of the rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 56–63. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63