

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.771.016
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-48-53



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ПОЛОС ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

Горбунова В.С., Выдрин А.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация. В настоящее время тонкие биметаллические полосы, состоящие из труднодеформируемых сплавов, являются востребованной продукцией в современных высокотехнологических отраслях промышленности. Именно поэтому вопрос производства таких полос является актуальным и подлежит рассмотрению с технологической точки зрения. На основании чего данная статья посвящена экспериментальному исследованию процесса несимметричной холодной прокатки биметаллических полос, полученных сваркой взрывом и состоящих из слоя алюминия марки Д16 и слоя титана марки ВТ-1-0. Главной целью исследования является получение биметаллической полосы из указанных материалов толщиной 0,3 мм путем внедрения в процесс прокатки кинематической несимметрии, выраженной в рассогласовании окружных скоростей вращения рабочих валков. В свою очередь, научная новизна работы заключается в изучении факторов, влияющих на процесс деформирования таких полос. Результаты исследования выявили деформационные особенности при прокатке композита алюминий–титан, полученного сваркой взрывом. В частности, к данным особенностям относятся: послойная деформация, кривизна полос, условия захвата при несимметричной прокатке с индивидуальным приводом валков и с одним приводным валком. Дальнейшее рассмотрение данного вопроса, а также решение оптимизационной задачи позволит в будущем сформировать сначала опытную технологию получения подобных полос, а затем усовершенствовать её до производственной.

Ключевые слова: несимметричная прокатка, холодная прокатка, тонкие полосы, кривизна, труднодеформируемые сплавы, биметаллическая полоса алюминий–титан, качество поверхности, сварка взрывом

Исследования выполнены за счет гранта Виктора Христенко «Шаг в будущее» (договор пожертвования №240425 от 25.04.2024)

© Горбунова В.С., Выдрин А.В., 2025

Для цитирования

Горбунова В.С., Выдрин А.В. Экспериментальное исследование процесса холодной несимметричной прокатки тонких полос из труднодеформируемых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 48-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-48-53>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE PROCESS OF COLD ASYMMETRIC ROLLING OF THIN STRIPS OF DIFFICULT-TO-FORM ALLOYS

Gorbunova V.S., Vydrin A.V.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. Currently, thin bimetallic strips consisting of difficult-to-form alloys are in demand products in modern high-tech industries. That is why the issue of the production of such strips is relevant and should be considered from a technological point of view. Based on this, this article is devoted to an experimental study of the process of asymmetric cold rolling of bimetallic strips obtained by explosion welding and consisting of an aluminum layer of D16 grade and a titanium layer of VT-1-0 grade. The central objective of the study is to obtain a bimetallic strip made of mentioned materials with a thickness of 0.3 mm by introducing kinematic asymmetry into the rolling process, expressed in a mismatch of the circumferential rotational speeds of the working rolls. In turn, the scientific novelty of the work lies in the study of the factors influencing the deformation of such strips. The results of the study revealed deformation features during rolling of the aluminum-titanium composite obtained by explosion welding. In particular, these features include: layer-by-layer deformations, strip curvature, and capture conditions during asymmetric rolling with individual roller drive and with one drive roller. Further consideration of this issue, as well as solving the optimization problem, will make it possible in the future to first form an experimental technology for producing such strips, and then improve it to production.

Keywords: asymmetric rolling, cold rolling, thin strips, curvature, difficult-to-form alloys, bimetallic strip aluminum-titanium, surface quality, explosion welding

The research was carried out at the expense of Viktor Khristenko's "Step into the Future" grant (donation agreement No.240425 dated April 25, 2024)

For citation

Gorbunova V.S., Vydrin A.V. Experimental Research of the Process of Cold Asymmetric Rolling of Thin Strips of Difficult-To-Form Alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 48-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-48-53>

Введение

Несимметрична прокатка является перспективным направлением в развитии производства тонколистового проката [1, 2]. В частности, это относится к тонколистовому прокату из труднодеформируемых сплавов [3-5], которые могут входить в том числе в структуру биметаллических полос.

Полосовая биметаллическая заготовка, состоящая из разнородных материалов, имеет несимметричную структуру и может быть получена разными способами. По этой причине процесс получения готовой полосовой продукции из подобных заготовок с помощью симметричной прокатки может привести к наличию дефектов готовой полосы из-за различной по слойной деформации [6, 7]. Вариативность различных видов несимметрии, применяемых в прокатке, позволяет решить эту проблему. Так, например, кинематическая несимметрия, вызванная рассогласованием окружных скоростей прокатных валков, создает смещение нейтральных углов на контактных поверхностях полосы, что позволяет уменьшить неравномерность деформации при прокатке биметаллических полос. Кроме этого, рассогласование окружных скоростей валков приводит к снижению усилия прокатки

[8]. В свою очередь, снижение усилия прокатки способствует интенсификации режима деформаций и позволяет прокатывать более тонкие полосы, состоящие из разнородных материалов [9, 10].

Целью данного исследования является исследование процесса получения полос из труднодеформируемых сплавов, в частности биметаллических полос, имеющих в качестве компонентов алюминий Д16 и титан ВТ-1-0 путем холодной несимметричной прокатки.

Материалы и оборудование

В качестве образцов для проведения исследований использовались полосы, состоящие из алюминиевого и титанового слоев, полученные сваркой взрывом (рис. 1) [11, 12]. Образцы имели различное соотношение толщин слоев. Исходные размеры исследуемых образцов представлены в табл. 1.

В ряде экспериментов применялись смазочные материалы: аэрозольная молибденовая смазка и сульфид молибдена в виде порошка [13]. Варианты осуществления процесса несимметричной прокатки алюмотитановых образцов представлены в табл. 2.

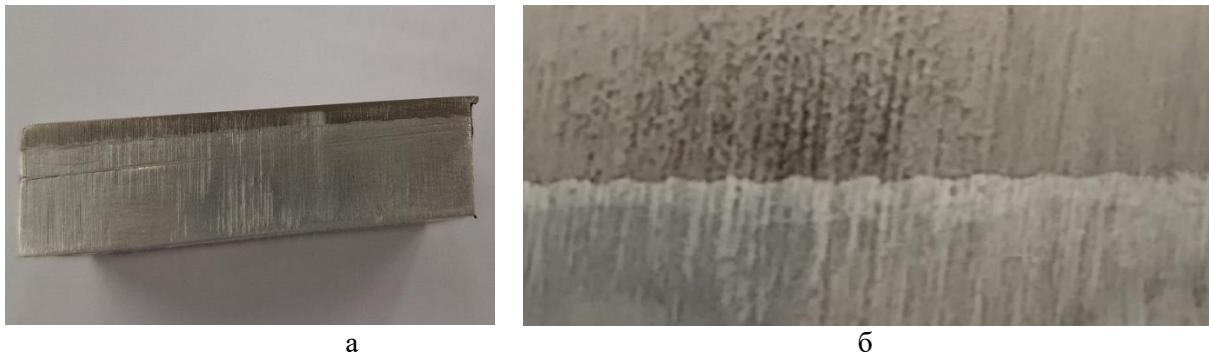


Рис. 1. Общий вид алюмотитанового образца (а) и вид линии сплавления (б)

Fig. 1. General view of the aluminum-titanium sample (a) and view of the fusion line (b)

Таблица 1. Геометрические параметры алюмотитановых образцов

Table 1. Geometric parameters of aluminum-titanium samples

| Номер образца | Материалы | | Размер образца | | | Количество |
|---------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------|------------|
| | Титановый слой | Алюминиевый слой | h_{oTi} , мм | h_{oAl} , мм | b , мм | |
| 1 | BT-1-0 | Д16 | 8,0 | 2,0 | 40,0 | 60,0 |
| 2 | | | 5,0 | 5,0 | 40,0 | 60,0 |
| 3 | | | 2,0 | 8,0 | 40,0 | 60,0 |

Таблица 2. Условия проведения эксперимента

Table 2. Experimental conditions

| Номер образца | h_{oTi} , мм | h_{oAl} , мм | Тип смазки | Кинематика валков | Кривизна, мм | Примечание |
|---------------|----------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------|----------------------------|
| 1 | 8,0 | 2,0 | Без смазки | Один приводной валок | 26 | |
| 2 | 5,0 | 5,0 | Без смазки | Один приводной валок | 25 | |
| 3 | 5,0 | 5,0 | Без смазки | Рассогласование скоростей валков 1,3 | 31 | До толщины 1,5 мм |
| | | | Аэрозольная молибденовая смазка | Один приводной валок | 30 | Прокатан до толщины 1,0 мм |
| 4 | 5,0 | 5,0 | Без смазки | Рассогласование скоростей валков 1,3 | 27 | До толщины 1,5 мм |
| | | | Дисульфид молибдена | Один приводной валок | 16 | Прокатан до толщины 0,3 мм |
| 5 | 2,0 | 8,0 | Без смазки | Один приводной валок | | |
| 6 | 2,0 | 8,0 | Аэрозольная молибденовая смазка | Один приводной валок | | |

Исследования проведены с использованием прокатного стана с индивидуальным приводом валков МГТУ им. Г.И. Носова и прокатного стана Дуо-200 ЮУрГУ. При прокатке всех образцов титановый слой контактировал с ведомым (более медленным) или неприводным валком, имеющим меньшую окружную скорость. Все образцы после суммарной деформации 50% подвергались разупрочняющему отжигу в течение 15 мин при температуре 400–450°C [14].

По результатам экспериментальных исследований оценивались кривизна полосы на выходе из очага деформации и степень деформации каждого слоя биметаллической полосы.

Кривизна полосы на выходе из очага деформации. В процессе прокатки исследуемые полосы прокатывались до толщины 1,5 мм. В качестве критерия кривизны в данном исследовании принималось мак-

симальное отклонение изогнутого образца от горизонтальной поверхности, на которую образец опирался своими концами. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Анализируя данные о кривизне, приведенные в табл. 2, можно заметить, что при прокатке образцов на стане с одним приводным валком кривизна образцов на выходе из очага деформации меньше, чем у образцов, прокатанных на стане с индивидуальным приводом валков. Также стоит отметить, что наилучший эффект по снижению кривизны заметен при прокатке полос с минимальной толщиной титанового слоя и максимальной толщиной алюминиевого слоя в клети с одним приводным валком.

Отношение толщин слоев в исходном образце и степень деформации каждого слоя. В серии экспериментов выяснилось, что допустимая суммарная

степень деформации биметаллической заготовки зависит от соотношения исходных толщин алюминиевого и титанового слоев. Было замечено, что при одинаковой толщине слоев биметаллической заготовки удалось получить готовую алюмотитановую полосу толщиной 0,3 мм без разрывов. В то же время при некоторых отличных соотношениях толщин слоев наблюдался разрыв титанового слоя при прокатке до толщины 1,5 мм (рис. 2). Однако при одинаковых исходных толщинах титанового и алюминиевого слоев, как было отмечено выше, наблюдается максимальная кривизна конечного продукта.



Рис. 2. Образец с разрывами титанового слоя
Fig. 2. A sample with fractures of the titanium layer

Исследование закономерностей изменения толщин титанового и алюминиевого слоев показало, что пластическая деформация титанового слоя заметна при исходном отношении толщины титанового слоя к толщине алюминиевого 1/1 и выше. В тех случаях, когда толщина титанового слоя меньше, чем алюминиевого, происходит деформация преимущественно алюминиевого слоя. При исходном соотношении

толщин слоев $\frac{1}{4}$ титановый слой практически не деформируется (рис. 3).

Заключение и выводы

Результаты эксперимента показали, что применение процесса прокатки с одним приводным валком способствует уменьшению кривизны биметаллических полос при прокатке. При этом чем меньше толщина более твердого – титанового слоя, тем меньше кривизна полосы. С другой стороны, уменьшение толщины титанового слоя затрудняет его деформацию при прокатке. Кроме того, было отмечено, что при определенных степенях деформации может происходить нарушение целостности титанового слоя, что ограничивает конечную толщину биметаллической полосы. Наиболее благоприятные условия с точки зрения получения минимальных толщин полос имеют место при прокатке биметаллической заготовки с одинаковой толщиной алюминиевого и титанового слоев.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что для определения наиболее эффективных условий прокатки биметаллических полос необходимо решать оптимизационную задачу, в которой в качестве управляющего параметра является исходное отношение толщин титанового и алюминиевого слоев, в качестве ограничения – целостность биметаллической полосы, а в качестве целевой функции – кривизна полосы.

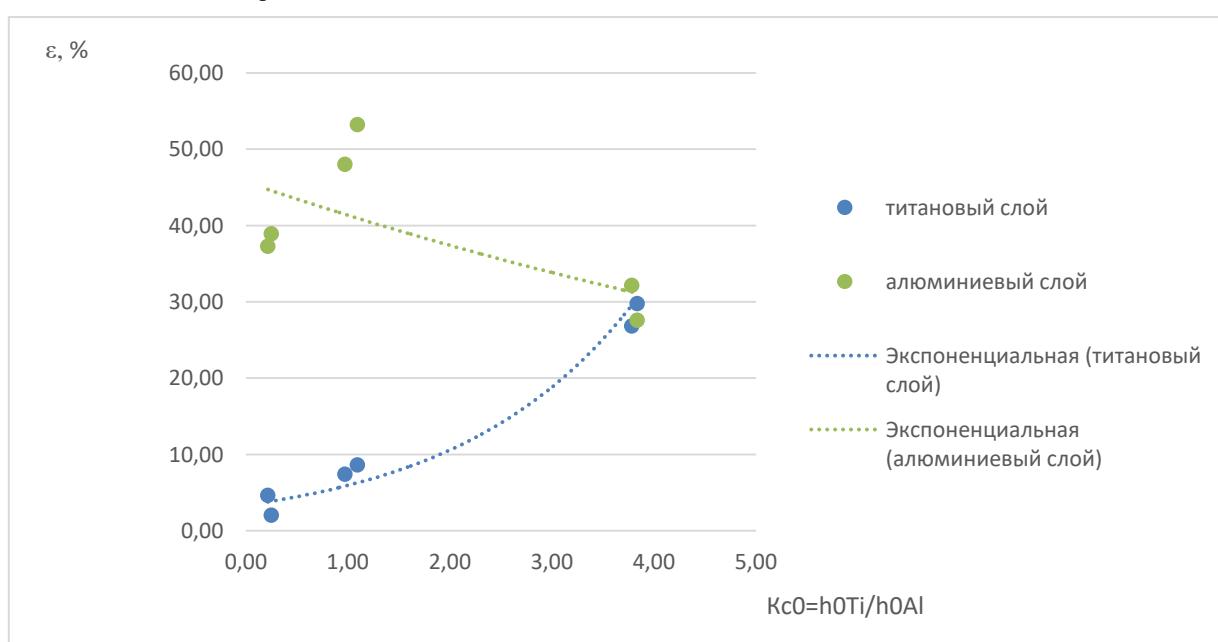


Рис. 3. Влияние исходного соотношения толщин слоев алюмотитанового образца на степень деформации слоев
Fig. 3. Effect of the initial thickness ratio of the aluminum-titanium sample layers on the degree of deformation of the layers

Список источников

1. Асимметрическая прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, №3. С. 81-96.
2. Смирнов В.М., Кондратенко В.А. Теория и технология несимметричной прокатки. М.: Металлургия, 1986. 160 с.
3. Алхимов В.И., Михайлов В.И. Технология и оборудование для прокатки титановых сплавов. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
4. Селиванов О.Г., Решетов Д.С. Особенности холодной прокатки тонких полос из алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2018. № 5. С. 77-82.
5. Лапшин В.П., Коротков А.А., Суханов А.В. Особенности деформации труднодеформируемых алюминиевых сплавов при совмещенных способах обработки давлением // Цветные металлы. 2021. № 3. С. 88-94.
6. Гудков А.А., Матвеев И.А., Муравьев В.В. Прокатка биметаллических полос в условиях несимметричного нагружения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 4 (44). С. 29-31.
7. Петренко С.П., Назаренко В.А. Особенности прокатки биметаллических заготовок // Обработка металлов давлением. 2015. № 1 (30). С. 45-52.
8. Рыжков А.А., Смирнов С.В. Моделирование процесса несимметричной прокатки для оценки снижения энергосиловых параметров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». 2022. Т. 22, № 1. С. 45-54.
9. Полухин В.П., Скороходов В.Н., Поляков М.Г. Эффективность несимметричного процесса прокатки тонких полос // Теория и технология деформации металлов: сборник научных трудов Московского института стали и сплавов. М., 1978. №110. С. 71-77.
10. Analysis of asymmetric rolling of Ti/Al composite plate considering tension and shear stress / Guan L., Bao Y., Wang X., Zhao J. // Journal of Materials Processing Tech. 2022, vol. 299, p. 117327.
11. Использование сварки взрывом для получения многослойных металлических композитов / Курбаналиев Р.К., Батаев В.А., Батаев А.А. и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87, № 2. С. 45-54.
12. Findik F. Recent developments in explosive welding // Materials & Design. 2021, vol. 201, p. 109540.
13. Смирнов С.В., Рыжков А.А., Иванов Д.А. Влияние условий трения на силовые параметры и неравномерность деформации при несимметричной прокатке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 2. С. 67-75.
14. Киселева Е.С., Аникин А.Ю., Горелик С.С. Режимы разупрочняющего отжига деформированных биметаллических материалов системы алюминий-титан // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 8. С. 32-38.

References

1. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Biryukova O.D., Kozhemayakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and tapes: history and prospects of development. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of SUSU. The Metallurgy series]. 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
2. Smirnov V.M., Kondratenko V.A. *Teoriya i tekhnologiya nesimmetrichnoy prokatki* [Theory and technology of asymmetric rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 160 p. (In Russ.)
3. Alkhimov V.I., Mikhailov V.I. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya prokatki titanovyh splavov* [Technology and equipment for rolling titanium alloys]. Moscow: Metalurgiya, 1985, 280 p. (In Russ.)
4. Selivanov O.G., Reshetov D.S. Features of cold rolling of thin strips of aluminum alloys. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2018;(5):77-82. (In Russ.)
5. Lapshin V.P., Korotkov A.A., Sukhanov A.V. Features of deformation of hard-to-form aluminum alloys with combined pressure treatment methods. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2021;(3):88-94. (In Russ.)
6. Gudkov A.A., Matveev I.A., Muravyev V.V. Rolling of bimetallic strips under asymmetric loading conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013;(4(44)):29-31. (In Russ.)
7. Petrenko S.P., Nazarenko V.A. Features of rolling bimetallic blanks. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal processing by pressure]. 2015;(1(30)):45-52. (In Russ.)
8. Ryzhkov A.A., Smirnov S.V. Modeling of the process of asymmetric rolling to assess the reduction of energy-strength parameters. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the South Ural State University. The series "Mechanical Engineering"]. 2022;22(1):45-54. (In Russ.)
9. Polukhin V.P., Skorokhodov V.N., Polyakov M.G. Efficiency of the asymmetric process of rolling thin strips. *Teoriya i tekhnologiya deformatsii metallov: sbornik nauchnyh trudov Moskovskogo instituta stali i splavov* [Theory and technology of metal deformation: collection of scientific papers of the Moscow Institute of Steel and Alloys]. Moscow, 1978;(110):71-77. (In Russ.)
10. Guan, L., Bao, Y., Wang, X., Zhao, J. Analysis of asymmetric rolling of Ti/Al composite plate considering tension and shear stress. *Journal of Materials Processing Tech.* 2022;299:117327.
11. Kurbanaliev R.K., Bataev V.A., Bataev A.A. et al. The use of explosion welding to produce multilayer metal composites. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Diagnostics of materials]. 2021;87(2):45-54. (In Russ.)
12. Findik F. Recent developments in explosive welding. *Materials & Design*. 2021;201:109540.
13. Smirnov S.V., Ryzhkov A.A., Ivanov D.A. Influence of friction conditions on force parameters and unevenness of deformation during asymmetric rolling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):67-75. (In Russ.)

14. Kiseleva E.S., Anikin A.Yu., Gorelik S.S. Modes of softening annealing of deformed bimetallic materials of the aluminum-titanium system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. 2020;(8):32-38. (In Russ.)

Поступила 26.08.2025; принята к публикации 17.10.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 26/08/2025; revised 17/10/2025; published 25/12/2025

Горбунова Виктория Сергеевна – аспирант кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.

Email: vika.salkova6039@gmail.com

Выдрин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.

Email: vydrinav@susu.ru

Victoria S. Gorbunova – Postgraduate Student, Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Email: vika.salkova6039@gmail.com

Alexander V. Vydrin – DrSc(Eng.), Professor, Head of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: vydrinav@susu.ru