



Оригинальная статья

УДК 621.774.353

DOI 10.17073/0368-0797-2022-1-28-34



## МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ В МНОГОВАЛКОВОМ СТАНЕ

Ж. Я. Ротенберг<sup>1</sup>, А. С. Будников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Уральский научно-исследовательский технологический институт» (Россия, 620133, Екатеринбург, ул. Луначарского, стр. 31, оф. 304)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Анализ процесса винтовой прокатки показал, что изменение осевой скорости вала по длине калибра косовалкового стана не соответствует требуемому характеру изменения скорости деформируемой заготовки. Процесс протекает при интенсивном осевом сжатии, в результате чего значительная часть обжимаемого в контактной зоне металла вытесняется в межвалковую зону. Показано, что от величины угла наклона образующей рассматриваемого участка вала к оси прокатки зависит направление осевой силы в соответствующей зоне прокатного калибра. Предложена модернизация технологии винтовой прокатки, позволяющая осуществить деформацию заготовки под воздействием внутриочагового осевого растяжения. Поставленная задача осуществляется путем применения калибровки валков, при которой в начале расположен гребневой участок вала, на котором осевая сила направлена против направления прокатки, а за ним – тянущий, на котором направление осевой силы совпадает с направлением прокатки. Такая схема действия осевых сил в зоне интенсивного обжатия заготовки создает наиболее благоприятные условия для течения металла в осевом направлении. Предложено техническое решение для осуществления стадии захвата заготовки валками, приведено описание указанной стадии и стационарной фазы процесса. Существенное в результате модернизации кардинальное изменение условия деформации заготовки позволяет снизить силовую нагрузку на рабочие валки, повысить их работоспособность и уменьшить энергетические затраты при прокатке. Это обеспечит прокатку сплошной заготовки в обжимном стане с большей вытяжкой, создаст предпосылки для расширения размерного и марочного ассортимента при получении прутков в станах радиально-сдвиговой прокатки, а при производстве труб в прокатных линиях со станом Ассела диапазон готовой продукции может быть существенно расширен за счет изготовления тонкостенных, высокоточных труб.

**Ключевые слова:** винтовая прокатка, многовалковый стан, угол подачи, раскатной стан, рабочий валок, гребневая калибровка, осевое растяжение, вытяжка

**Для цитирования:** Ротенберг Ж.Я., Будников А.С. Модернизация технологии винтовой прокатки в многовалковом стане // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 28–34. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-28-34>

Original article

## MODERNIZATION OF SCREW ROLLING TECHNOLOGY IN A MULTI-ROLL MILL

Zh. Ya. Rotenberg<sup>1</sup>, A. S. Budnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC Ural Scientific Research Technological Institute (room 304, bld. 31, Lunacharskogo Str., Yekaterinburg 620133, Russian Federation)

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

**Abstract.** Analysis of the screw rolling process showed that change in axial speed of the roll along the length of the roll groove of cross rolling mill does not correspond to the required character of change in the speed of deformed billet. The process proceeds under intense axial compression, as a result of which a significant part of the metal crimped in the contact zone is displaced into the inter-roll area. It is shown that direction of the axial force in the corresponding zone of the roll groove depends on the value of inclination angle of the considered roll section generatrix to the rolling axis. The proposed modernization of screw rolling technology makes it possible to carry out deformation of the billet under the influence of intra-focal axial tension. The task is accomplished by rolls calibration when at the beginning there is a ridge section of the roll on which the axial force is directed against rolling direction; and behind it, a pulling one, on which the direction of the axial force coincides with rolling direction. Such a scheme of the axial forces action in the zone of intensive billet reduction creates the most favorable conditions for the metal flow in axial direction. A technical solution is proposed for the implementation of the stage of the billet gripping by rolls, and description of this stage and the process stationary phase is given. The cardinal change in the billet deformation condition after modernization makes it possible to reduce the power load on the work rolls, increase their efficiency and reduce energy costs during rolling. This will ensure the rolling of a solid billet in a roughing mill with a higher stretch, create the preconditions for expanding the size and grade assortment when obtaining rods in radial-displacement rolling mills and at production of pipes in rolling lines with the Assel mill. The range of finished products can be significantly expanded due to the production of thin-walled high-precision pipes.

**Keywords:** screw rolling, multi-roll mill, feed angle, rolling mill, work roll, ridge calibration, axial stretching, rolling-out

**For citation:** Rotenberg Zh. Ya., Budnikov A.S. Modernization of screw rolling technology in a multi-roll mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 1, pp. 28–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-28-34>

## ВВЕДЕНИЕ

При производстве длинномерных металлических изделий круглой формы (трубы, редуцированные сплошные заготовки, прутки) используются различные технологические процессы [1], среди которых широкое применение находит способ винтовой прокатки в многовалковом стане, калибр которого образован тремя и более валками без направляющего инструмента. Их достоинствами являются возможность быстрой перенастройки при переходе на новый размер и высокая точность геометрических размеров прокатываемых изделий.

Детальное изучение скоростных параметров косоустановленных рабочих валков [1, 2], исследование особенности формоизменения при раскатке [3, 4] и анализ напряженно-деформированного состояния заготовок при разных схемах винтовой прокатки [5] позволили проработать вариант модернизации процесса.

Наряду с исследованиями процесса винтовой прокатки при изготовлении бесшовных труб [6–9], широко изучаются процессы винтовой прошивки труб [7–9] и прокатки прутков широкого размерного и марочного сортамента, реализуемой с применением больших углов подачи в диапазоне  $15–25^\circ$ , которая известна как радиально-сдвиговая прокатка (РСП). В работах [10–16] приведены исследования прокатки прутков из цветных металлов и сплавов в условиях РСП. Исследование многовалковой винтовой и близкой к ней поперечной прокатки также описаны в работах [17–22], где подробно представлены кинематические параметры прокатки и предложены различные технические решения для улучшения условий деформирования.

Основная задача любого процесса прокатки состоит в том, чтобы действующие в прокатном калибре условия деформации наиболее эффективно преобразовать в требуемое течение металла. Течение металла при деформации заготовки в косоустановленном стане определяется калибровкой валков, скоростью инструмента и действующими силами. При винтовой прокатке применяются калибровки, которые функционально состоят из входного (тянущего), рабочего и калибрующего участков. Нужно отметить, что выбор рациональных режимов деформации с использованием известных типов калибровки валков во многом исчерпан в связи с большим опытом применения существующих косоустановленных станов.

Детальное изучение скоростных параметров косоустановленных рабочих валков [2, 3], исследование особенности формоизменения при раскатке [4, 5] и анализ напряженно-деформированного состояния за-

готовок при разных схемах винтовой прокатки [6] позволили проработать вариант модернизации процесса.

## ОСОБЕННОСТЬ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

Известные способы винтовой прокатки обладают существенными технологическими недостатками, которые связаны со специфическими кинематическими и деформационными условиями в косоустановленном валке, выполненный в работах [5, 6], показывает, что по длине прокатного калибра характер изменения осевой компоненты скорости валков различных типов (бочковидный, конический или дисковидный) идентичен характеру изменения осевой скорости бочковидного валка и не соответствует требуемому характеру изменения осевой скорости деформируемого металла по длине прокатного калибра. Это делает проблематичной прокатку в косоустановленных станах тонкостенных гильз со значительной вытяжкой.

Для понимания сущности предложенных изменений в технологии винтовой прокатки рассмотрим упрощенную схему действия сил на контактной поверхности. На рис. 1 показаны:  $\alpha$  – угол наклона образующей валка к оси прокатки;  $N$  – нормальная сила, действующая перпендикулярно поверхности валка;  $N_x$  – осевая компонента нормальной силы;  $R_M$  – проекция силы трения на образующую валка;  $R_x$  – осевая компонента силы трения;  $F$  – результирующая осевая сила,  $F = R_x - N_x$ .

Используем понятие предельного угла наклона образующей валка к оси прокатки  $\alpha_G$ , при котором условия осевого захвата заготовки перестают выполняться, т. е. результирующая осевая сила, действующая на рассматриваемом участке валка,  $F = 0$ .

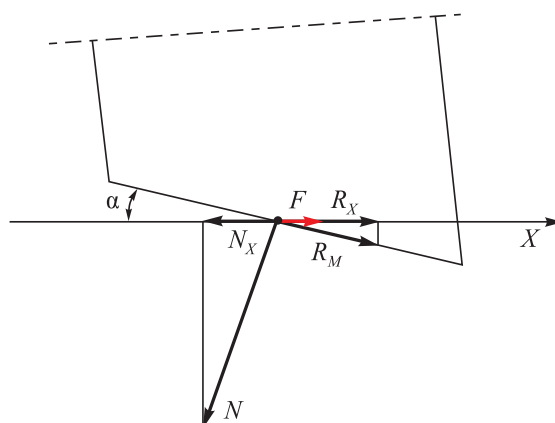


Рис. 1. Упрощенная схема действия сил на контактной поверхности

Fig. 1. Simplified diagram of the forces action on the contact surface

При  $\alpha < \alpha_G$  результирующая осевая сила  $F > 0$  и действует в направлении прокатки (тянущая сила).

При  $\alpha > \alpha_G$  результирующая осевая сила  $F < 0$  и действует противоположно направлению прокатки.

Характерным для способа Ассела является применение рабочего участка валка в форме гребня, как показано на рис. 2, где на ограниченном участке происходит значительное изменение диаметра валка. При этом основная деформация гильзы концентрируется в узкой зоне прокатного калибра, что в сочетании с имеющимся на входе «жестким концом» подката, который сдерживает истечение металла в тангенциальном направлении, позволяет получить существенную вытяжку.

Для реализации требуемых деформационных условий, угол наклона гребня к оси прокатки выполняют существенно большим ( $30 - 50^\circ$ ), чем предельный угол  $\alpha_G$  наклона образующей валка к оси прокатки, при котором нарушаются условия осевого захвата заготовки валками ( $\alpha_T \gg \alpha_G$ ). Поэтому на рабочем участке валка условия осевого втягивания заготовки не соблюдаются.

При классическом процессе Ассела [23, 24] первичный осевой захват заготовки валками происходит на тянущем участке, который располагается перед рабочим участком. При этом на контактной поверхности тянущего участка валка в результате деформации заготовки возникают и аккумулируются силы трения, суммарная осевая составляющая которых формирует тянущую силу  $F_T$ , необходимую как для обеспечения устойчивости вторичного захвата, связанного с преодолением лобового противодействия гребня  $F_G$ , так и для протекания стационарной фазы процесса. Кроме того, проекция контактных сил трения на направление вращения заготовки (тангенциальное направление) обеспечивает выполнение условия вращения прокатываемой заготовки [24].

Под влиянием осевой тянущей силы, которая действует на входном участке, основная деформация ме-

талла на рабочем (гребневом) участке протекает при интенсивном осевом сжатии, а, следовательно, при двухосном сжатии в радиальном и осевом направлениях. Такая схема деформации заготовки в зоне рабочего участка валка в совокупности с наличием незакрытой части калибра в межвалковом пространстве приводит к тому, что значительная часть обжимаемого металла течет в тангенциальном направлении. Отмеченный характер течения металла в трехвалковых станах отражен в работах [7, 8], где приведено описание исследования винтовой прокатки труб на оправке и без нее. В качестве показателя, характеризующего течение металла в межвалковое пространство, применялся коэффициент овальности, равный отношению максимального радиуса раската в зазоре к радиусу калибра очага деформации в рассматриваемом поперечном сечении. Максимального значения коэффициент овальности достигает на калибрующем участке, который располагается за рабочим (гребневым) участком. Такая особенность распределения коэффициента овальности указывает на склонность при прокатке гильз к образованию раструба, а также к внеконтактному утолщению стенки.

При винтовой прокатке формоизменение металла происходит в условиях циклической, знакопеременной радиальной деформации, на которую расходуется до 30 % и более затрачиваемой на процесс мощности. Следствием указанного является снижение вытяжной способности прокатного стана и повышение энергетических затрат при прокатке.

## НАПРАВЛЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

Для устранения указанных недостатков предложен новый способ кривой прокатки [25], при котором существенно изменяются условия деформации заготовки при прокатке в многовалковом стане с гребневой калибровкой валков. Целью является обеспечение в косовалковом

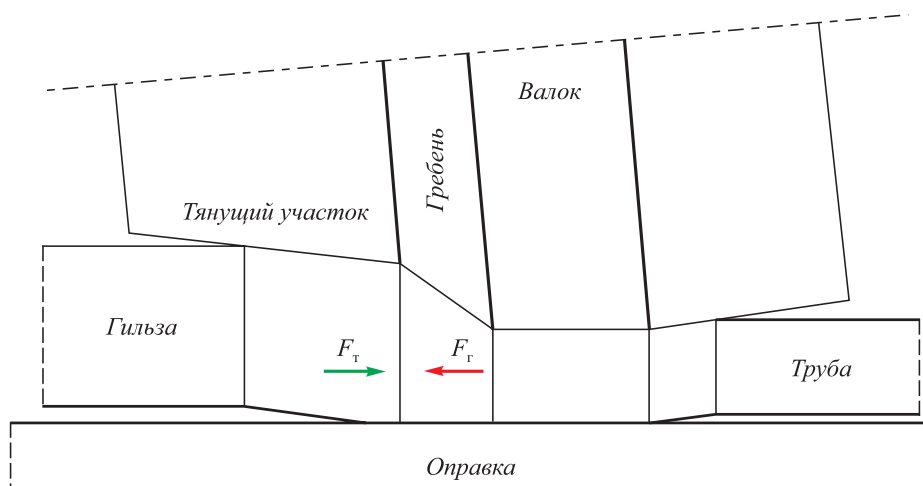


Рис. 2. Возникновение сжимающих напряжений при прокатке в стане Ассела

Fig. 2. Occurrence of compressive stresses during rolling in the Assel mill

стане основной деформации заготовки под воздействием осевого растягивающего напряжения. Для этого предложено в направлении прокатки поменять расположение тянущего и рабочего участков валка. Для осуществления стадии захвата заготовки валками использована заготовка с редуцированным передним концом.

Осуществление предлагаемого способа косой прокатки поясняется схемой, представленной на рис. 3, и последующим описанием предлагаемой технологии на примере прокатки сплошной заготовки.

На рис. 3 показано положение валков (1) (представлены условно два рабочих валка) и заготовки (2) в прокатном калибре при стационарной фазе процесса. Как видно, в начале каждого из валков (1) выполняют рабочий участок (11), у которого угол наклона образующей к оси прокатки  $\alpha_1$  превышает предельную величину угла  $\alpha_G$  наклона образующей валка, при которой нарушаются условия осевого вытягивания заготовки. За ним выполняют тянущий участок (12) валка, у которого угол  $\alpha_2$  наклона образующей к оси прокатки выбирают меньшим угла  $\alpha_G$ , чтобы гарантированно обеспечить условия осевого вытягивания заготовки в стан и стабильное протекание стационарной фазы процесса. Затем на валке выполняют калибрующий участок.

Участки валков образуют соответствующие деформационные зоны прокатного калибра: рабочую  $K_1$  и тянущую  $K_2$ , расположение которых на рис. 3 обозначены пунктирными линиями. В новом способе прокатки тя-

нущая зона  $K_2$ , в которой реализуются условия осевого вытягивания заготовки, расположена за противодействующей зоной  $K_1$ , в которой эти условия не соблюдаются. Поэтому для осуществления стадий первичного и вторичного осевого захвата заготовки предложено применение ее с редуцированным передним концом. Диаметр редуцированной части заготовки выбирают меньшим диаметра калибра  $D_{K_2}$ , который соответствует началу тянущей зоны при исходной настройке стана на диаметр калибра в сечении пережима –  $D_K$ . Это обеспечивает в момент задачи заготовки (2) толкателем (3) ее первичный контакт с валком в тянущей зоне калибра. Благодаря выбранной длине редуцированной части заготовки, первоначальный контакт ее основной нередуцированной части с противодействующим участком валка наступает тогда, когда на тянущем участке валка, в результате деформации редуцированного конца, создается резерв осевой тянущей силы  $F_2$ , необходимой для преодоления осевого противодействия  $F_1$ . После выполнения условия вторичного осевого захвата происходит заполнение металлом всех деформационных зон калибра стана и осуществляется стационарная фаза процесса прокатки с осевой скоростью заготовки  $V_2$ .

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

В отличие от известных технологических решений в предлагаемом способе косой прокатки, вследствие

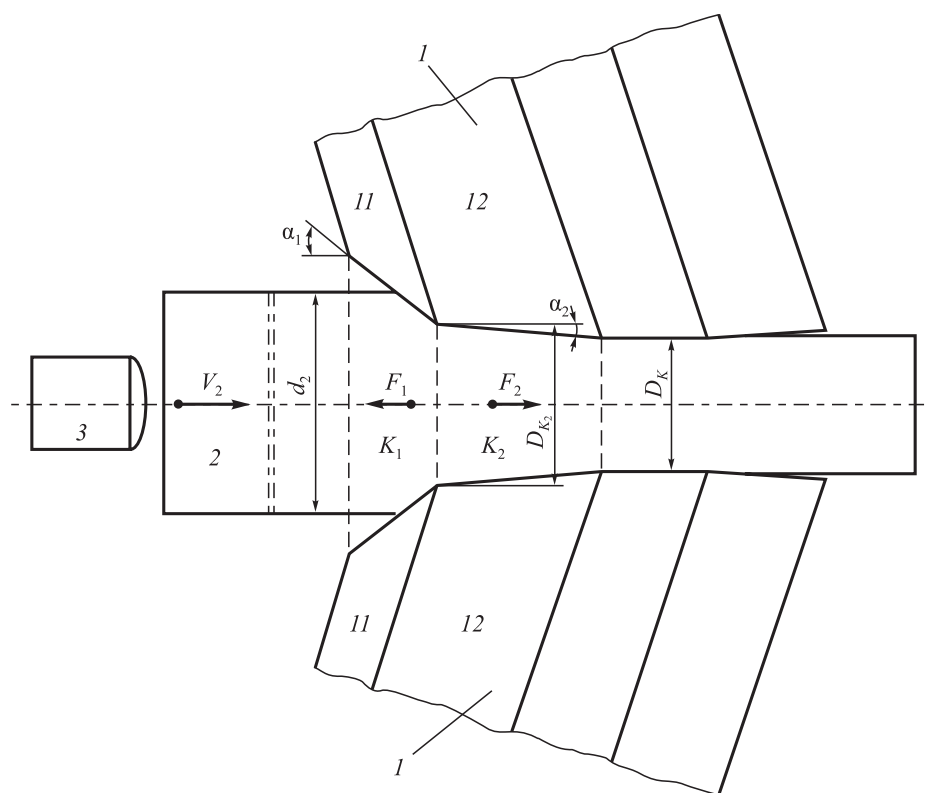


Рис. 3. Стационарная фаза процесса

Fig. 3. Stationary phase of the process

расположения рабочего участка валка (11) перед тянущим (12), существенно изменяются условия деформации заготовки во всех фазах процесса.

При этом основная деформация заготовки, которая осуществляется рабочим участком (11), протекает не под воздействием осевого подпора, что характерно для известного способа прокатки с гребневой калибровкой валка, а при наличии осевого растяжения, как показано на рис. 3. Таким образом, в рассматриваемом способе криволинейной прокатки гребневой участок валка дополнительно выполняет новую технологическую функцию – обеспечение внутриочагового растягивающего напряжения.

Такая схема действия сил в зоне интенсивного обжатия заготовки создает гораздо более благоприятные условия для течения металла в осевом направлении при большой радиальной деформации заготовки. В результате этого в деформационной зоне калибра  $K_1$ , образованной рабочим участком валка (11), снизится внеконтактное утолщение металла, а, следовательно, уменьшится ширина площади контакта с валком на этом участке, что приведет к значительному улучшению условия вращения прокатываемой заготовки. Как следствие этого, появляется возможность увеличить общее обжатие заготовки в стане, т. е. увеличить вытяжку, не нарушая стабильности процесса прокатки.

Такое кардинальное изменение условия деформации на участке основного обжатия заготовки позволит существенно снизить силовую нагрузку на рабочие валки, повысить их работоспособность и уменьшить энергетические затраты при прокатке. В совокупности это обеспечивает прокатку сплошной заготовки с большей вытяжкой, а при производстве труб в прокатных линиях со станом Ассела диапазон готовой продукции может быть существенно расширен за счет изготовления тонкостенных, высокоточных труб.

## ОБЛАСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ

Модернизированная технология криволинейной прокатки может быть реализована в криволинейных станах различного типа: с бочковидными валками, развернутыми относительно оси прокатки только на угол подачи, а также с коническими валками, наклоненными дополнительно к оси прокатки под углом раскатки, обеспечивающими как дивергентное, так и конвергентное положения оси валка относительно оси прокатки.

## Выводы

Предлагаемая инновационная технология криволинейной прокатки открывает перспективы для расширенного использования криволинейного стана при производстве цилиндрических изделий для машиностроения, а также в качестве раскатного агрегата в трубопрокатных установках, который при определенных условиях может составить конкуренцию стану продольной прокатки, например, заменить автоматический стан.

Предлагаемое технологическое решение может также использоваться в обжимном стане, установленном в начале линии трубопрокатного агрегата для получения цилиндрических заготовок различного диаметра, предусмотренного таблицами прокатки труб, из партий непрерывнолитого подката с ограниченным размером наружного диаметра. Это позволит при производстве труб сократить зависимость от внешних поставщиков и конъюнктуры рынка, повысить контроль за издержками производства, освоить мелкие серии и более сложный сортамент, оптимизировать режимы деформации в станах, входящих в трубопрокатный агрегат, обеспечить высокое качество готовых труб.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Ротенберг Ж.Я. Скорость подачи валка стана винтовой прокатки. Реферат рукописи // Библиографический указатель ВИНТИ «Депонированные научные работы». 1988. № 10. С. 187.
2. Bellman M., Kümmerling R. Optimierung des Spreizwinkels von Lochschrägwalzwerken für die Herstellung nahtloser Rohre // Stahl und Eisen. 1993. Vol. 113. No. 9. P. 111–117.
3. Алешенко А.С., Будников А.С., Харитонов Е.А. Исследование формоизменения металла в процессе редуцирования труб на трехвалковом стане // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 10. С. 756–762. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-756-762>
4. Романцев Б.А., Харитонов Е.А., Будников А.С., Ле В.Ч., Чан Б.Х. Исследование процесса винтовой раскатки труб в четырехвалковом стане // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 9. С. 686–690. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-686-690>
5. Скрипаленко М.М., Чан Б.Х., Романцев Б.А., Галкин С.П., Самусев С.В. Исследование особенностей напряженно-деформированного состояния заготовок при разных схемах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования // Сталь. 2019. № 2. С. 35–39.

1. Rotenberg Zh.Ya. Roll feed rate of screw rolling mill. Abstract of the manuscript. *VINITI Bibliographic Index "Deposited Scientific Works"*. 1988, no. 10, p. 187. (In Russ.).
2. Bellman M., Kümmerling R. Optimierung des Spreizwinkels von Lochschrägwalzwerken für die Herstellung nahtloser Rohre. *Stahl und Eisen*. 1993, vol. 113, no. 9, pp. 111–117. (In Germ.).
3. Aleshchenko A.S., Budnikov A.S., Kharitonov E.A. Metal forming during pipes reduction on a three-high rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 10. pp. 756–762. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-756-762>
4. Romantsev B.A., Kharitonov E.A., Budnikov A.S., Le V.Ch., Chan B.Kh. Screw rolling of pipes in a four-high rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 9, pp. 686–690. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-686-690>
5. Skripalenko M.M., Chan B.Kh., Romantsev B.A., Galkin S.P., Samusev S.V. Investigation of the features of billet stress-strain state at different screw rolling schemes using computer simulation. *Stal'*. 2019, no. 2, pp. 35–39. (In Russ.).

6. Зиновьев А.В., Кошмин А.Н., Часников А.Я. Влияние параметров процесса непрерывного прессования на формирование микроструктуры и механические свойства прутков круглого сечения из сплава М1 // *Металлург*. 2019. № 4. С. 94–98.
7. Фомин А.В., Алешченко А.С., Масленников И.М., Галкин С.П., Никулин А.Н. Структурно-аналитическая оценка интенсивности деформации и ее составляющих в процессе винтовой прошивки заготовки при различных углах подачи // *Металлург*. 2019. № 5. С. 48–54.
8. Patent DE 102010047868. MPK B21B 19/04. Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines Hohlblocks aus einem Block / Pehle H.J., Krahn M.V., Horst Ch.A. Опубликовано 07.10.2010.
9. Ротенберг Ж.Я., Осадчий В.Я., Нодев Э.О., Урин Ю.Л. Аналитическая модель процесса винтовой прошивки // *Совершенствование процессов обработки металлов давлением: Межвузовский сборник научных трудов ВЗМИ*. Москва: 1982. С. 78–92.
10. Shurkin P.K., Akopyan T.K., Galkin S.P., Aleshchenko A.S. Effect of radial shear rolling on the structure and mechanical properties of a new-generation high-strength aluminum alloy based on the Al – Zn – Mg – Ni – Fe system // *Metal Science and Heat Treatment*. 2019. Vol. 60. No. 11–12. P. 764–769.  
<http://doi.org/10.1007/s11041-019-00353-x>
11. Akopyan T.K., Gamin Y.V., Galkin S.P., Prosviryakov A.S., Aleshchenko A.S., Noshin M.A., Koshmin A.N., Fomin A.V. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: Finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties // *Materials Science and Engineering A*. 2020. Vol. 786. Article 139424.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139424>
12. Карпов Б.В., Скрипаленко М.М., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Самусев С.В., Чан Б.Х., Павлов С.А. Исследование нестационарных стадий радиально-сдвиговой прокатки заготовок с профилированными торцами // *Металлург*. 2017. № 4. С. 18–24.
13. Goncharuk A.V., Fadeev V.A., Kadach M.V. Seamless pipes manufacturing process improvement using mandreling // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 402–407.
14. Naizabekov A., Arbuz A., Lezhnev S., Panin E. Study of technology for ultrafine-grained materials for usage as materials in nuclear power // *New Trends in Production Engineering*. 2019. Vol. 2. No. 2. P. 114–125.
15. Лежнев С.Н., Найзабеков А.Б., Панин Е.А., Волокитина И.Е., Арбуз А.С. Получение градиентной микроструктуры в нержавеющей аустенитной стали при радиально-сдвиговой прокатке // *Металлург*. 2020. №11. С. 46–54.
16. Wang F.-J., Shuang Y.-H., Hu J.-H., Wang Q.-H., Sun J.-C. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. No. 8. P. 1597–1604.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.002>
17. Mashekov S., Nurtazaev E., Masheкова A., Abishkenov M. Extruding aluminum bars on a new structure radial shear mill // *Metallurgija*. 2021. Vol. 60. No. 3–4. P. 427–430.
18. Mashekov S.A., Absadykov B.N., Masheкова A.S. Investigation of the kinematics of rolling ribs and pipes on a continuous radial-shifting mill of a new construction // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2018. Vol. 3. No. 430. P. 98–109.
19. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts // *Metallurgija*. 2015. Vol. 54. No. 4. P. 627–630.
20. Patent DE 10107567. МПК B21B19/06. Verfahren zum Kaltwalzen von nahtlosen Kupferrohren / Roller E. Опубликовано 29.08.2002.
21. Lü C.Q., Guo D., Gao H.F., Yang Z.L., Ju Y.H. Effect of helical deformation on fatigue life of torsion shaft by rolling // *Suxing Gongcheng Xuebao Journal of Plasticity Engineering*. 2019. Vol. 26. No. 2. P. 177–184.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2012.2019.02.023>
6. Zinov'ev A.V., Koshmin A.N., Chasnikov A.Ya. Effect of continuous extrusion parameters on alloy M1 round section bar microstructure and mechanical property formation. *Metallurgist*. 2019, vol. 63, no. 3–4, pp. 422–428. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00838-3>
7. Fomin A.V., Aleshchenko A.S., Maslenniko I.M., Galkin S.P., Nikulin A.N. Structural and analytical evaluation of the strain intensity and its components during cross-roll piercing at different feed angles. *Metallurgist*. 2019, vol. 63, no. 5–6, pp. 477–486.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-019-00848-1>
8. Pehle H.J., Krahn M.V., Horst Ch.A. *Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines Hohlblocks aus einem Block*. Patent DE 102010047868, MPK B21B 19/04. Publ. 07.10.2010. (In Germ.).
9. Rotenberg Zh.Ya., Osadchii V.Ya., Noddev E.O., Urin Yu.L. Analytical model of screw piercing process. In: *Improvement of Metal Forming Processes: Interuniversity Transactions of All-Un. CEI*. Moscow: 1982, pp. 78–92. (In Russ.).
10. Shurkin P.K., Akopyan T.K., Galkin S.P., Aleshchenko A.S. Effect of radial shear rolling on the structure and mechanical properties of a new-generation high-strength aluminum alloy based on the Al – Zn – Mg – Ni – Fe system. *Metal Science and Heat Treatment*. 2019, vol. 60, no. 11–12, pp. 764–769.  
<http://doi.org/10.1007/s11041-019-00353-x>
11. Akopyan T.K., Gamin Y.V., Galkin S.P., Prosviryakov A.S., Aleshchenko A.S., Noshin M.A., Koshmin A.N., Fomin A.V. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: Finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. 2020, vol. 786, article 139424. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139424>
12. Karpov B.V., Skripalenko M.M., Galkin S.P. Studying the nonstationary stages of screw rolling of billets with profiled ends. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 3–4, pp. 257–264.  
<http://doi.org/10.1007/s11015-017-0486-9>
13. Goncharuk A.V., Fadeev V.A., Kadach M.V. Seamless pipes manufacturing process improvement using mandreling. *Solid State Phenomena*. 2021, vol. 316, pp. 402–407.
14. Naizabekov A., Arbuz A., Lezhnev S., Panin E. Study of technology for ultrafine-grained materials for usage as materials in nuclear power. *New Trends in Production Engineering*. 2019, vol. 2, no. 2, pp. 114–125.
15. Lezhnev S.N., Naizabekov A.B., Panin E.A., Volokitina I.E., Arbuz A.S. Graded microstructure preparation in austenitic stainless steel during radial-shear rolling. *Metallurgist*. 2021, vol. 64, no. 11–12, pp. 1150–1159. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01100-5>
16. Wang F.-J., Shuang Y.-H., Hu J.-H., Wang Q.-H., Sun J.-C. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 8, pp. 1597–1604.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.002>
17. Mashekov S., Nurtazaev E., Masheкова A., Abishkenov M. Extruding aluminum bars on a new structure radial shear mill. *Metallurgija*. 2021, vol. 60, no. 3–4, pp. 427–430.
18. Mashekov S.A., Absadykov B.N., Masheкова A.S. Investigation of the kinematics of rolling ribs and pipes on a continuous radial-shifting mill of a new construction. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2018, vol. 3, no. 430, pp. 98–109.
19. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts. *Metallurgija*. 2015, vol. 54, no. 4, pp. 627–630.
20. Roller E. *Verfahren zum Kaltwalzen von nahtlosen Kupferrohren*. Patent DE 10107567, MPK B21B19/06. Publ. 29.08.2002. (In Germ.).
21. Lü C.Q., Guo D., Gao H.F., Yang Z.L., Ju Y.H. Effect of helical deformation on fatigue life of torsion shaft by rolling. *Suxing Gongcheng Xuebao Journal of Plasticity Engineering*. 2019, vol. 26, no. 2, pp. 177–184.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2012.2019.02.023>

22. Cao Q., Hua L., Qian D. Finite element analysis of deformation characteristics in cold helical rolling of bearing steel-balls // *Journal of Central South University*. 2015. Vol. 22. No. 4. P. 1175–1183. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2631-6>
23. Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб. Москва: Металлургия, 1968. 440 с.
24. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. Москва: Металлургия, 1971. 368 с.
25. Patent DE 102012007379. МПК В 21 В 27/037. Verfahren zum Schrägwalzen von zylindrischen Erzeugnissen / Rotenberg Zh. Опубликовано 29.12.2016.
22. Cao Q., Hua L., Qian D. Finite element analysis of deformation characteristics in cold helical rolling of bearing steel-balls. *Journal of Central South University*. 2015, vol. 22, no. 4, pp. 1175–1183. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2631-6>
23. Shevakin Yu.F., Gleiberg A.Z. *Pipe Production*. Moscow: Metallurgiya, 1968, 440 p. (In Russ.).
24. Teterin P.K. *Theory of Screw Rolling*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 368 p. (In Russ.).
25. Rotenberg Zh. *Verfahren zum Schrägwalzen von zylindrischen Erzeugnissen*. Patent DE 102012007379, МПК В 21 В 27/037. Publ. 2016.12.29. (In Germ.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Жозеф Яковлевич Ротенберг**, к.т.н., доцент, ООО «Уральский научно-исследовательский технологический институт»

**E-mail:** zhozef.rotenberg@mail.ru

**Алексей Сергеевич Будников**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

**E-mail:** budnikov.as@misis.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Zhozef Ya. Rotenberg**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., LLC Ural Scientific Research Technological Institute

**E-mail:** zhozef.rotenberg@mail.ru

**Aleksei S. Budnikov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming", National University of Science and Technology "MISIS"

**E-mail:** budnikov.as@misis.ru

#### Вклад авторов

**Ж. Я. Ротенберг** – теоретическое исследование винтовой прокатки, описание кинематических условий процесса винтовой прокатки, разработка калибровки рабочих валков, модернизация винтовой прокатки.

**А. С. Будников** – теоретические исследования винтовой прокатки, изучение формоизменения металла в очаге деформации трехвалкового стана, разработка калибровки валков, модернизация винтовой прокатки.

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Zh.Ya. Rotenberg** – theoretical studies of screw rolling, description of the kinematic conditions of screw rolling process, development of work roll calibration, modernization of screw rolling.

**A. S. Budnikov** – theoretical studies of screw rolling, investigation of metal shape change in the deformation zone of a three-roll mill, development of roll calibration, modernization of screw rolling.

Поступила в редакцию 08.09.2021

После доработки 02.12.2021

Принята к публикации 25.12.2021

Received 08.09.2021

Revised 02.12.2021

Accepted 25.12.2021