



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.03

УДК 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ЗАГОТОВОК

Ж.А. Ашкеев¹, В.А. Андреященко¹, Ж.У. Буканов³

¹Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Екибастузский инженерно-технический институт им. акад. К. Сатпаева, Экибастуз, Казахстан

³Карагандинский технический университет, Караганда, Казахстан

О СТАТЬЕ

Получена: 20 октября 2020 г.
Принята: 20 декабря 2020 г.
Опубликована: 30 декабря 2020 г.

Ключевые слова:

несимметричная прокатка, напряжения, валки, деформация сдвига, напряженное состояние, усилие прокатки.

АННОТАЦИЯ

Процесс несимметричной прокатки хорошо зарекомендовал себя как способ снижения давления на валки и усилия прокатки, улучшения механических характеристик прокатываемого металла. В качестве факторов, обеспечивающих несимметричность процесса, обычно используют рассогласование окружных скоростей рабочих валков, различные диаметры прокатных валков, коэффициенты трения и др. Особенно перспективными являются методы, обеспечивающие изменение характера течения металла за счет воздействия рабочих элементов со специальной конфигурацией рабочей поверхности.

В данной статье изложены результаты исследования напряженного состояния, скоростных и силовых параметров при прокатке полосы в биконических валках с вогнутой и выпуклой поверхностями. Анализ результатов, полученных аналитическими методами, показал, что интенсивность скоростей деформации сдвига по ширине полосы составляет $0,36-0,65 \text{ с}^{-1}$, что невозможно реализовать при прокатке в гладких цилиндрических валках, где наблюдается интенсивное вытягивание зерен по направлению прокатки. Возникновение высоких значений интенсивности деформации сдвига создает в очаге деформации благоприятные условия для предотвращения вытягивания структуры и уменьшения опасных растягивающих напряжений.

Результаты исследования показали превалирование сжимающих напряжений в очаге деформации, которые препятствуют интенсивному вытягиванию зерен в продольном направлении, снижают растягивающие напряжения и способствуют выравниванию механических свойств, закрытию и завариванию внутренних дефектов. Предложены теоретические зависимости для расчета силовых параметров при несимметричной прокатке в биконических валках. Полученные модели напряженного состояния, годографа скоростей, силовых характеристик прогнозируют эффективность применения биконических валков в составе станов холодной и горячей прокатки.

© ПНИПУ

© Ашкеев Жасулан Аманжолович – к.т.н., доц., e-mail: jashkeev@mail.ru, ID: [0000-0001-8992-3984](https://orcid.org/0000-0001-8992-3984)

Андреященко Виолетта Александровна – к.т.н., ассоц. проф., проф., e-mail: Vi-ta.z@mail.ru, ID: [0000-0001-6933-8163](https://orcid.org/0000-0001-6933-8163)

Буканов Жанат Умиртаевич – магистр т.н., ст. преподаватель, e-mail: heissen69@mail.ru, ID: [0000-0001-6652-3654](https://orcid.org/0000-0001-6652-3654)

Zhassulan A. Ashkeyev – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Docent, e-mail: jashkeev@mail.ru,

ID: [0000-0001-8992-3984](https://orcid.org/0000-0001-8992-3984)

Violetta A. Andreyachshenko – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, e-mail: Vi-ta.z@mail.ru,

ID: [0000-0001-6933-8163](https://orcid.org/0000-0001-6933-8163)

Zhanat U. Bukanov – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, e-mail: heissen69@mail.ru,

ID: [0000-0001-6652-3654](https://orcid.org/0000-0001-6652-3654)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

RESEARCH OF THE ASYMMETRIC ROLLING OF WORKPIECES

Zh.A. Ashkeyev¹, V.A. Andreyachshenko², Zh.U. Bukanov³

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Ekibastuz technical and engineering institute named after the academician K.Satpayev, Ekibastuz, Kazakhstan

³Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

ARTICLE INFO

Received: 20 October 2020
Accepted: 20 December 2020
Published: 30 December 2020

Keywords:

asymmetric rolling, stresses, rolls, shear deformation, stress state, rolling force.

ABSTRACT

The asymmetric rolling process has proven itself well as a way to reduce the pressure on the rolls, reduce the rolling force, and improve the mechanical characteristics of the rolled metal. As the factors providing the asymmetry of the process, the mismatch of the circumferential speeds of the work rolls, the different diameters of the rolls, the coefficients of friction, and others are usually used. Methods that provide a change in the nature of the metal flow due to the action of working elements with a special configuration of the working surface are especially promising.

This article presents the results of the study of the stress state, speed and power parameters when rolling a strip in biconical rolls with concave and convex surfaces. Analysis of the results obtained by analytical methods show that the intensity of shear deformation rates along the strip width is 0.36-0.65 s⁻¹, which is impossible to implement when rolling in smooth cylindrical rolls, since there is an intense elongation of grains in the direction of rolling. The occurrence of the intensity of shear deformations creates favorable conditions in the deformation zone to prevent stretching of the structure and to reduce dangerous tensile stresses.

The results of the study showed the prevalence of compressive stresses in the deformation zone, which prevent the intensive elongation of grains in the longitudinal direction, reduce tensile stresses and contribute to the leveling of mechanical properties, closing and welding of internal defects. Theoretical dependencies are proposed to calculate the force parameters for asymmetric rolling in biconical rolls. The obtained models of the stress state, velocity hodograph, force characteristics predict the efficiency of using the biconical rolls in cold and hot rolling mills.

© PNRPU

Введение

При традиционной симметричной прокатке в гладких цилиндрических валках прокатываемая полоса в основном вытягивается в направлении интенсивного течения металла, что, в свою очередь, приводит к интенсивному вытягиванию зерен в этом направлении. Одновременно с этим происходит вытягивание в том же направлении межкристаллитных прослоек, содержащих вредные неметаллические включения, которые при больших степенях деформации принимают форму цепей, образуя так называемую полосчатость макроструктуры. Возникновение полосчатости макроструктуры приводит к различию механических свойств (анизотропии механических свойств). Например, показатели пластичности вдоль и поперек волокон значительно отличаются, причем разница в их значениях возрастает с увеличением удлинения полосы. Данное явление нежелательно, особенно при последующей холодной штамповке листового проката, например при вытяжке. Из-за различия механических свойств листового проката образуется волнистая кромка (фестоны) по краям вытянутого изделия, которая подлежит обрезке [1]. Хотя обрезаемая кромка (фестоны) имеет небольшую массу, при производстве штампованных изделий в несколько сот тысяч штук в месяц или миллионы штук в год расход металла на обрезку будет значительным.

При прокатке листового металла в промышленных условиях в большинстве случаев нейтральная ось поло-

сы не совпадает с нейтральной осью зазора между валками [2]. Кроме того, прокатка в калибрах всегда является несимметричной [3]. Авторами работы [4] отмечается широкая распространенность несимметричной прокатки. Несимметричность может быть целенаправленной и вынужденной. Вынужденная несимметричность прокатки, как правило, связана с неправильной настройкой стана, неточностями изготовления оборудования и т.д. Целенаправленная несимметричность может быть реализована посредством геометрической, кинематической и трибологической несимметричности. Кроме того, авторы предприняли попытку получения математической модели уравнения регрессии для определения усилия прокатки. Рассматриваемая авторами модель предусматривает реализацию прокатки с одновременной реализацией ряда видов несимметричности: прокатка в валках разного диаметра, изготовленных из различного материала, один валок приводной, а другой не приводной, задача полосы осуществлялась под углом. В качестве влияющих факторов авторы выделяют величину относительного обжатия, отношение коэффициентов трения, скорость вращения приводного валка, отношение радиусов валков и угол входа полосы в очаг деформации.

В работе [5] показано, что реализация несимметричности прокатки за счет увеличения скорости вращения ведущего (верхнего) валка способствует появлению зоны с противонаправленными силами трения. Такой подход способствует изменению составляющих скоро-

сти частиц металла по толщине полосы. В целом наблюдается снижение давления металла на валки и увеличение разовых обжатий. Однако при использовании несимметричной прокатки наблюдается изменение геометрии полосы в вертикальной и горизонтальной плоскостях при выходе из очага деформации [6]. При реализации несимметричной прокатки с различными диаметрами валков совокупность воздействия факторов, определяемых разностью окружных скоростей валков и разностью обжатий полосы каждым валком, будет регулировать положение конца полосы при выходе из зоны обжатия. При обжатиях до 15 % рассогласование скорости валков с фактором асимметрии 1,01–1,05 обеспечивает получение прямой полосы. Особенности выбора рациональных режимов несимметричной прокатки с контролируемым (варьируемым) углом наклона поперечного сечения полосы на выходе из очага деформации показаны в работах [7, 8].

В частности, эффективность применения несимметричной прокатки доказана для упрочнения биметаллических материалов типа алюминий + медь, сталь + титан, сталь + алюминий, сталь + цирконий, медь + титан [9]. Несимметричность процесса обеспечивается рассогласованием окружных скоростей прокатных валков и различием коэффициентов трения. Последнее, в свою очередь, обеспечивается различными условиями взаимодействия на контактных поверхностях металл – валок.

Исследованию напряженного состояния в очаге деформации при несимметричной прокатке также посвящена работа [10]. Приводятся закономерности изменения опережения при несимметричном процессе прокатки по скоростям валков, а также системная модель, включающая качественный характер и количественную оценку воздействия скоростной несимметрии. Авторами установлено снижение средних нормальных контактных напряжений на 10–15 % (по сравнению с симметричной прокаткой) при скоростной несимметрии в пределах 16 %.

В случае реализации несимметричной прокатки в рабочих валках с противоположным смещением их осей относительно оси станины обеспечивается снижение силы прокатки на 15–23 % по сравнению с симметричным процессом [11]. Также авторами представлен детальный анализ несимметричных процессов прокатки с указанием особенностей деформации металла и их влияния на изгиб переднего конца полосы, опережения и среднего нормального контактного напряжения.

Стоит отметить, что реализация кинематической несимметрии в промышленных условиях (соотношение скоростей вращения валков составляло 2–5 %) подтвердила эффективность использования несимметричной прокатки для улучшения качества продукции – прежде всего снижения продольной разнотолщинности и улучшения плоскостности полос [12]. Работы по промышленной реализации несимметричной прокатки с кинематической асимметрией выполнены на Магнитогорском, Новолипецком металлургических комбинатах

и на предприятиях Украины на станах холодной и горячей прокатки.

Перспективы заметного снижения анизотропности получаемого проката и заметного измельчения зерна при помощи манипулирования технологическими факторами несимметричной прокатки показано в работе [13]. Улучшение комплекса механических характеристик металла происходит благодаря включению сдвиговых компонентов деформации. Нарушение монотонного характера течения металла при несимметричном режиме прокатки листового металла также подтверждается результатами компьютерного моделирования процесса [14, 15]. Экспериментально доказано, что при несимметричной прокатке улучшается формуемость листа за счет сдвиговых компонентов текстуры. Исследования, выполненные при помощи EBSD-анализа, подтверждают специфическое влияние несимметричной прокатки на текстуру металла как после самого процесса прокатки, так и в течение последующего отжига [16].

Влияние сдвиговой деформации, внесенной несимметричной прокаткой, на деформационную микроструктуру в основном отражается на зернах с ориентацией $\{100\}$. Несимметричная прокатка может значительно увеличить запасенную энергию деформированных зерен с ориентацией $\{100\}$ и таким образом ослабить зависящее от ориентации распределение накопленной энергии. Повышенная рекристаллизационная способность зерен $\{100\}$ способствует гомогенизации микроструктуры отжига [17].

При реализации несимметричной прокатки наблюдается меньшая плоская анизотропия и более однородный металлический лист с более мелкими зёрнами после отжига [18–20].

Мультимасштабное моделирование [19] продемонстрировало, что напряженно-деформированное состояние при несимметричной прокатке низкоуглеродистых марок сталей благоприятно для формирования мелкозернистой структуры. Исследуемый процесс позволяет достичь высокого уровня деформации сдвига в полосах и листах, что положительно влияет на микроструктуру и уровень механических свойств проката.

В настоящее время уже имеется ряд работ, посвященных вопросам изменения характера течения металла за счет воздействия рабочих элементов со специальной конфигурацией рабочей поверхности [21–26]. В частности, использование способа несимметричной прокатки в валках с обратной конусностью обеспечивает создание более благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния, что способствует устранению внутренних дефектов литых заготовок, а также предотвращает возникновение опасных осевых растягивающих напряжений. В результате наблюдается более равномерное распределение механических свойств и формирование более однородной структуры по объему прокатываемой полосы [21].

Поэтому разработка и исследование новых способов прокатки холоднокатаной полосы и деформирующей

щих валков со специальной формой рабочей поверхности является сложной, но и при этом основной задачей при получении листового проката с улучшенными механическими свойствами. В условиях производства механические свойства улучшают последующей длительной термической обработкой в колпаковых печах. Однако отжиг и выдержка листового проката в этих печах длится около 90–120 ч, что снижает производительность процесса производства проката. Отсюда выравнивание механических свойств проката на стадии прокатки может привести к снижению времени обработки металла в колпаковых печах, что приведет к повышению производительности процесса. Это возможно путем разработки новой конфигурации деформирующих валков, направленной на изменение однонаправленного течения металла в продольном направлении. Для устранения монотонности течения металла целесообразно применение конусообразных (биконических) валков с выпуклой и вогнутой рабочими поверхностями (рис. 1). Например, скорость течения металла в центре полосы со стороны большего диаметра верхнего валка будет больше скорости течения металла со стороны меньшего диаметра нижнего валка. Аналогичное явление будет происходить по краям полосы, но в противоположном направлении, т.е. скорость течения металла со стороны большего диаметра нижнего валка будет больше скорости течения металла со стороны меньшего диаметра верхнего валка.

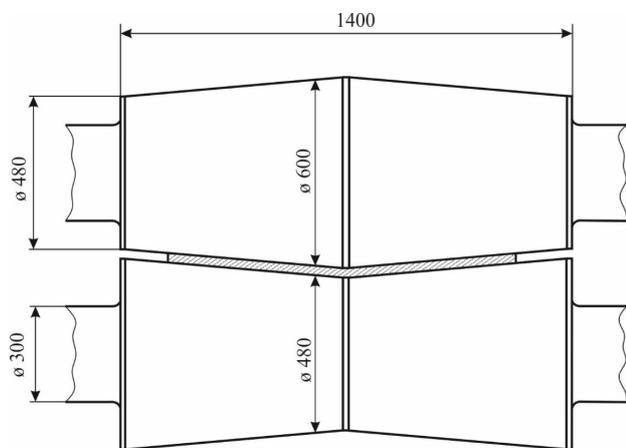


Рис. 1. Схема прокатки полосы в биконических валках в составе станов холодной прокатки

Fig. 1. Scheme of the strip rolling in biconical rolls in the cold rolling mills

Из-за разностей скоростей течения металла исключается или снижается однонаправленное течение металла в продольном направлении, которое выравнивается на выходе из очага пластической деформации. Можно предположить, что, помимо продольных линейных деформаций в продольном направлении полосы, возможно возникновение сдвиговых деформаций в данном направлении. Для этого необходима оценка напряженно-деформированного состояния полосы при прокатке в конусообразных валках. Воспользуемся методом линий

скольжения (л.с.), который себя хорошо зарекомендовал при решении плоских и осесимметричных задач [1, 27, 28].

Построение сетки л.с. осуществляем в центральном сечении, где выпуклая поверхность верхнего валка хорошо вписывается в вогнутую поверхность нижнего валка по методике, изложенное в работе [21]. Линии скольжения со стороны большего диаметра валков выходят на контактную поверхность под углом $\varphi = 25^\circ$ и в узловой точке 1,2 л.с. пересекаются с главной осью y под углом 45° , т.е. $\theta_{1,2} = 45^\circ$. В соседней узловой точке 0,1 л.с. пересекаются с главной осью под углом $\theta_{0,1} = 45^\circ + \Delta\theta = 60^\circ$, где $\Delta\theta = 15^\circ$ угол поворота л.с. при переходе из точки 0.0 в точку 0.1. В узловой точке 1.1 л.с. пересекаются с главной осью под углом $\theta_{1,1} = 45^\circ - \Delta\theta = 30^\circ$. Наконец л.с. в узловой точке 0.0 пересекают главные оси x и y под углом $\theta_{1,2} = \frac{\theta_{0,1} + \theta_{1,1}}{2} = 45^\circ$, пересечение главной оси под углом 45° говорит о правильности построения сетки л.с. (рис. 2).

Аналогичным образом строим сетку л.с. со стороны малого диаметра, куда л.с. выходят под углом $40\text{--}50^\circ$. Тогда в соседней узловой точке 1.1 л.с. пересекаются с главной осью y под углом 30° , а в узловой точке 0.0 л.с. пересекают главную ось под углом $\theta_{0,0} = 30 + \Delta\theta = 45^\circ$ (рис. 2).

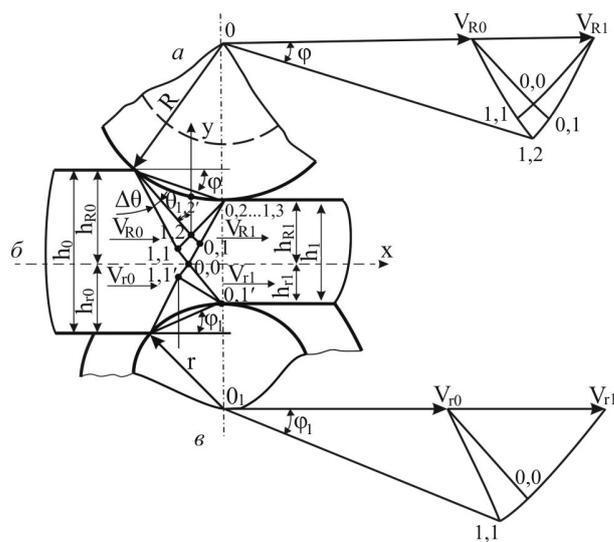


Рис. 2. Расчетная схема: a, c – годограф скоростей при прокатке в конусообразных валках; b – поле линий скольжения

Fig. 2. Calculation scheme: a, c – hodograph of velocities when rolling in tapered rolls; b – a field of slip lines

Теперь приступим к построению годографа скоростей. Для этого примем скорость течения на входе в очаг пластической деформации в пределах $V_{R0} \approx 5,5\text{--}6,5$ м/с, которую откладываем от полюса 0, т.е. с неподвижной точки 0 в масштабе 1:10 (рис. 2, a). Из условия несжимаемости определим значения вектора скорости на выходе из очага пластической деформации со стороны большего диаметра, т.е. из соотношения

$$V_{R1} = V_{R0} \frac{h_{R0}}{h_{R1}},$$

где отношение $\frac{h_{r0}}{h_{r1}}$ для рассматриваемого случая составляет 1,5.

Аналогичным образом откладываем значение вектора скорости со стороны меньшего диаметра нижнего вала, где скорость течения металла со стороны входа в очаг деформации $V_{r0} = 5,0$ м/с. Скорость на выходе из очага деформации определим из отношения $V_{r1} = V_{r0} \frac{h_{r0}}{h_{r1}}$, где отношение $\frac{h_{r0}}{h_{r1}} = 1,7$.

При этом значение V_{r0} уточняем, сравнивая значения скоростей V_{r1} и V_{r1} со стороны верхнего и нижнего валков, которые относительно оси x на выходе из очага деформации должны быть равны. Хотя скорость течения металла на выходе из очага деформации выравнивается, на входе разность скоростей со стороны большего и меньшего диаметров составляет $\sim 0,65$ м/с.

Далее от концов векторов скоростей V_{r1} и V_{r1} под углом 45° проводим отрезки, точку пересечения которых обозначим $0,0$, показывающих скорость течения металла в точке $0,0$. От проведенных отрезков проводим дуги на величину угла поворота $\Delta\theta = 15^\circ$, соединяя дуги прямыми отрезками получим точки $0,1$ и $1,1$. И, наконец, проведя от указанных точек перпендикуляры, получим точку пересечения $1,2$. Соединяя данную точку с полюсом 0 , получим скорость течения металла в точке $1,2$. При этом образованный угол ϕ должен совпасть с углом захвата полосы, что показывает правильность построения годографа скоростей.

Приращение скорости деформации в поперечном направлении составит $\Delta V_1 \approx 0,5 \dots 0,65$ м/с. Допустим, если прокатывается полоса шириной $1000\text{--}1400$ мм, тогда интенсивность деформации сдвига составит $0,36\text{--}0,65$ с $^{-1}$. Примерно такое значение получили при прокатке разноцветных слоистых пластилиновых образцов на лабораторной модели стана, изготовленной из дерева.

Теперь приступим к расчету компонентов напряжения в узловых точках сетки л.с. Из условия равновесия всех сил, приложенных к пластической области справа, можем записать следующее:

$$\int_{0,0}^{0,1} \sigma dy + \sigma_{0,1} (y_{0,2} - y_{0,1}) + kx_{0,2} + \sigma_{0,0} (y_{0,0} - y_{0,2'}) + kx_{0,2'} = 0. \quad (1)$$

Используя соотношения Генки:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{0,0} - 2k \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right); \\ \sigma_{0,1} &= \sigma_{0,0} - 2k \left(\theta_{0,1} - \frac{\pi}{4} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

подставляя (2) в (1), получим

$$\begin{aligned} \sigma_{0,0} - 2k \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) y_{0,1} + \left[\sigma_{0,0} - 2k \left(\theta_{0,1} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \times \\ \times (y_{0,2} - y_{0,1}) - \sigma_{0,0} y_{0,2'} + 2kx_{0,2} = 0. \end{aligned}$$

Раскрывая скобки и сократив на $2k$, после некоторого преобразования окончательно получим

$$\frac{\sigma_{0,0}}{2k} = \frac{\left(\theta_{0,0} - \frac{\pi}{4} \right) y_{0,1} + \left(\theta_{0,1} - \frac{\pi}{4} \right) (y_{0,2} - y_{0,1}) - x_{0,2}}{y_{0,2} - y_{0,2'}}. \quad (3)$$

Подставляя в полученное выражение (3) данные непосредственно из рис. 2, в результате получим значение среднего напряжения в узловой точке $0,0$, т.е.:

$$\frac{\sigma_{0,0}}{2k} = -0,842,$$

отсюда, $\sigma_{0,0} = -2k \cdot 0,842$, где $2k$ – сопротивление деформации, k – пластическая постоянная или предел текучести при сдвиге. Например, если прокатывается заготовка из стали марки 08кп, тогда при температуре $T = 850$ °С сопротивление деформации составит $\sigma_T = 110$ МПа, $k = \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}}$

$$= \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5 \text{ МПа, и } \sigma_{0,0} = -2 \cdot 63,5 \cdot 0,842 = -107 \text{ МПа.}$$

Компоненты напряжения в узловой точке $0,0$:

$$\sigma_{y0,0} = \sigma_{0,0} - k \sin 2\theta_{0,0} = -107 - 63,5 = -170,5 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{x0,0} = \sigma_{0,0} + k \sin 2\theta_{0,0} = -107 + 63,5 = -43,5 \text{ МПа,}$$

$$\tau_{xy} = -k \cos 2\theta_{0,0} = 0 \text{ МПа.}$$

Компоненты напряжения в соседней узловой точке $0,1$:

$$\sigma_{0,1} = \sigma_{0,0} - 2k \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{4} \right) = -107 - 2 \cdot 63,5 \cdot \frac{\pi}{12} = -140,24 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{y0,1} = \sigma_{0,1} - k \sin 2\theta_{0,1} = -140,24 - \sin 2 \cdot 60^\circ = -195,2,$$

$$\begin{aligned} \sigma_{y0,1} &= \sigma_{0,1} - k \sin 2\theta_{0,1} = \\ &= -140,24 - \sin 2 \cdot 60^\circ = -195,2 \text{ МПа,} \end{aligned}$$

$$\sigma_{x0,1} = \sigma_{0,1} + k \sin 2\theta_{0,1} = -85,24 \text{ МПа,}$$

$$\tau_{xy} = -k \cos 2\theta_{0,1} = 31,75 \text{ МПа.}$$

Анализ результатов вычисления показывает, что в очаге деформации действуют сжимающие напряжения, которые препятствуют интенсивному вытягиванию зерен в продольном направлении, снижают растягивающие напряжения и способствуют выравниванию механических свойств, закрытию и завариванию внутренних дефектов. Контактное давление p_y при прокатке в конусообразных валках можно определить через напряжения в узловой точке $1,2$, т.е. $p_y = \sigma_{y0,0} = -170,5$ МПа.

Для определения контактного давления воспользуемся методом решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности и решением аналогичной задачи, изложенной в работе [29]. Отличие заключается в том, что в данном случае учитывались некоторые факторы, которые не были учтены в работе [5]. Например, в данном случае учитывалась разность эле-

ментарных абсолютных обжатий со стороны большего и меньшего диаметров и положение нейтрального сечения в очаге пластической деформации. Для этого выделим в очаге деформации элемент $abcd$ и рассмотрим его равновесие (рис. 3). При этом направление сил в очаге деформации, приложенных к данному элементу $abcd$, по сравнению силами, приложенными к элементу в работе [29], изменено.

На элемент $abcd$ действуют следующие силы: на наклонную высоту ad $\sigma_x \frac{h_x}{\cos\beta}$, в противоположном направлении на высоту bc элемента $(\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (h_x - dh_x)$, со стороны деформирующих валков $p_x \left(\frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1} dx_1 + \frac{\sin\varphi_2}{\cos\varphi_2} dx_2 \right)$ и $\tau \left(\cos\varphi_1 \frac{dx_1}{\cos\varphi_1} + \cos\varphi_2 \frac{dx_2}{\cos\varphi_2} \right)$. Проецируя эти силы на ось x и приравнявая их нулю, получим следующее:

$$\begin{aligned} \Sigma_x = & \sigma_x \frac{h_x}{\cos\beta} - (\sigma_x + d\sigma_x)(h_x - dh_x) - \\ & - p_x \frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1} dx_1 - p_x \frac{\sin\varphi_2}{\cos\varphi_2} dx_2 + \\ & + \tau_k \cos\varphi_1 \frac{dx_1}{\cos\varphi_1} + \tau_k \cos\varphi_2 \frac{dx_2}{\cos\varphi_2} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

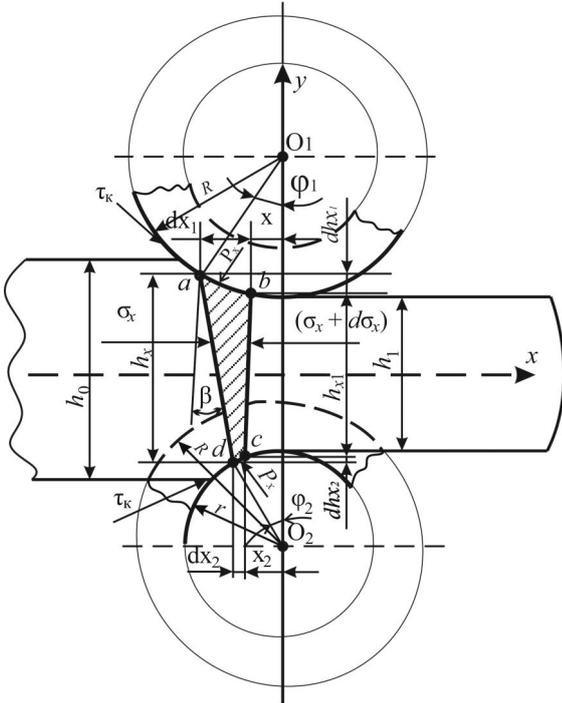


Рис. 3. Условие равновесия элемента $abcd$ в очаге деформаций

Fig. 3. The equilibrium condition for element $abcd$ in the deformation zone

Используя соотношения $tq\varphi_1 = \frac{dh_{x1}}{dx_1}$, $tq\varphi_2 = \frac{dh_{x2}}{dx_2}$, после преобразования получим следующее:

$$\begin{aligned} \sigma_x \left[\frac{h_x}{\cos\beta} - (h_x - dh_x) \right] - d\sigma_x h_x - \\ - p_x (dx_1 + dx_2) + \tau_k \left(\frac{dh_{x1}}{tq\varphi_1} + \frac{dh_{x2}}{tq\varphi_2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Значение в квадратных скобках можно записать так:

$$\left[\frac{h_x}{\cos\beta} - (h_x - dh_x) \right] = \frac{dh_x}{\cos\beta}, \text{ тогда}$$

$$\sigma_x \frac{dh_x}{\cos\beta} - d\sigma_x h_x - p_x dh_x + \tau_k \left(\frac{dh_{x1}}{tq\varphi_1} + \frac{dh_{x2}}{tq\varphi_2} \right) = 0. \quad (6)$$

При решении полученного уравнения (6) возникает задача установления отношения $\frac{dh_{x1}}{dh_{x2}}$. Для этого воспользуемся соотношениями между углами φ_1 , φ_2 и относительными обжатиями dh_{x1} и dh_{x2} , известными из теории прокатки:

$$dh_{x1} = 2R(1 - \cos\varphi_1) \text{ и } dh_{x2} = 2r(1 - \cos\varphi_2).$$

Обозначим отношение $\frac{dh_{x1}}{dh_{x2}} = n$, тогда составляющие общего абсолютного элементарного обжатия

$$dh_x = (dh_{x1} + dh_{x2}): \quad dh_{x1} = \frac{n}{n+1} dh_x, \quad dh_{x2} = \frac{dh_x}{n+1}.$$

Подставляя полученные элементарные обжатия в уравнение (6) и используя известное из теории обработки металлов давлением соотношение $\tau_k = \mu\sigma_s^*$ дифференциальное уравнение равновесия можно записать так:

$$\begin{aligned} \left[\sigma_x \frac{dh_x}{\cos\beta} - dp_x \cos\beta h_x - p_x dh_x + \right. \\ \left. + \mu p_x \left(\frac{n}{(n+1)tq\varphi_1} + \frac{1}{(n+1)tq\varphi_2} \right) \right] dh_x = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Вводим обозначение $\delta^* = \mu \left(\frac{n}{(n+1)tq\varphi_1} + \frac{1}{(n+1)tq\varphi_2} \right)$

и используем условие пластичности, записанное следующим образом: $[p_x - \frac{\sigma_x}{\cos\beta}] = \sigma_s^*$, где σ_s^* – сопротивление деформации. Дифференцируя данное соотношение, получим $dp = \frac{d\sigma_x}{\cos\beta}$, отсюда $d\sigma_x = dp \cos\beta$. Подставляя полученные выражения в последнее уравнение (7), получим

$$\left[(p_x - \sigma_s^*) - p_x + p_x \delta^* \right] dh_x - dp_x \cos\beta h_x = 0. \quad (8)$$

После разделения переменных получим:

$$\frac{dp}{[p_x \delta^* - \sigma_s^*]} = - \frac{dh_x}{h_x \cos\beta},$$

где $\sigma_s^* = \beta \sigma_m$, β – коэффициент Лодэ, принимающий при плоской деформации значение 1,15. После интегрирования

$$\frac{1}{\delta^*} \ln/p_x \delta^* - \beta \sigma_s^* / = -\ln h_x \frac{1}{\cos \beta} + C,$$

отсюда

$$p_x = \frac{1}{\delta^*} \left(\sigma_s^* + \frac{C}{h_x^{\delta^*} \cos \beta} \right).$$

Постоянную C определяем из следующих граничных условий, т.е. при $h_x = \frac{h_0}{\cos \beta}$ контактное давление

$$p_x = p_0 = \beta \sigma_m = \sigma_s^*, \quad \text{отсюда} \quad C = \left(\sigma_s^* - \frac{\sigma_s^*}{\delta^*} \right) (h_0^* \cos \beta \delta^*).$$

Подставляя в предыдущее уравнение, окончательно получим для зоны опережения:

$$p_x = \frac{\sigma_s^*}{\delta^*} \left(1 + \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^{\delta^*} (\delta^* - 1) \right).$$

Запишем, сразу меняя знак в полученной формуле, для зоны отставания:

$$p_x' = \frac{\sigma_s^*}{\delta^*} \left(1 - \left(\frac{h_x}{h_1} \right)^{\delta^*} (\delta^* + 1) \right).$$

Рассмотрим значения контактного давления, например, при прокатке полосы в конусообразных валках исходной высотой $h_0 = 50$ мм, конечной высотой $h_k = 30$ мм. Большой диаметр валка $D = 300$ мм, малый диаметр $d = 200$ мм. Сопротивление деформации $\sigma_s^* = 100$ МПа. Расчет производим следующим образом:

1. Абсолютное обжатие $\Delta h = 50 - 30 = 20$ мм.

2. Углы захвата валков и значения коэффициентов $\alpha_1 = \arccos [1 - (\Delta h/D)] = 21^\circ$, $\varphi_1 = (21/2) = 10,5^\circ$, $\alpha_2 = \arccos [1 - (\Delta h/d)] = 25,8^\circ$, $\varphi_1 = (25,8/2) = 12,9^\circ$, $n = 0,95 \approx 1$, $\delta^* = 2,44$.

3. Угол наклона высоты ad элемента

$$\text{tg} \beta = (l_D - l_d) / h_0,$$

где $l_D = \sqrt{0,5D\Delta h} = 54,7$ мм, длина дуги контакта со стороны большего диаметра, $l_d = \sqrt{0,5d\Delta h} = 44,7$ мм, длина дуги контакта со стороны меньшего диаметра, тогда $\beta = 11,3^\circ$.

Для определения нейтрального сечения приравняем соответствующие соотношения определения контактного давления со стороны входа и выхода из очага деформации, которые после преобразования пришли к следующему виду:

$$X^2 \frac{(1 + \delta^*)}{h_1^{\delta^*}} - 2x - h_0^{\delta^*} (1 - \delta^*) = 0,$$

где $X = h_n^{\delta^*}$. После подстановки соответствующих значений получили высоту нейтрального сечения $h_n = 35,728$ мм. Подставляя в полученные формулы, получим:

$$\text{– в зоне отставания} \quad p_x = \frac{100}{2,44} \left(1 + \left(\frac{50}{35,728} \right)^{2,44} \right) \times$$

$$\times (2,44 - 1) = 174,9 \text{ МПа},$$

$$\text{– в зоне опережения} \quad p_x' = \frac{100}{2,44} \left(1 - \left(\frac{35,728}{30} \right)^{2,44} \right) \times$$

$$\times (2,44 + 1) = 174,9 \text{ МПа}.$$

Сравнение полученных значений контактных давлений с ранее полученным (методом л.с.) значением контактного давления ($p_y = \sigma_{y,0,0} = 170,5$ МПа) показывает, что расхождение составляет 2,5 %. Следовательно, полученные теоретические зависимости для расчета силовых являются достоверными и могут быть использованы для решения задачи определения усилия прокатки в биконических валках. Также полученные формулы можно применять при разработке технологии прокатки полосы в биконических валках, а сами валки целесообразно использовать в составе станов холодной прокатки с целью снижения неоднородности механических свойств проката. Кроме того, предлагаемые биконические валки удобно встраивать в состав прокатно-дрессировочных станов холодной прокатки, поочередно расположив с цилиндрическими валками. Следует отметить, что данный способ прокатки и биконические валки хорошо сочетаются при совмещении процессов литья и прокатки длинномерных заготовок.

Таким образом, можно сделать следующий вывод. Использование биконических валков в составе станов холодной прокатки обеспечит более однородную структуру и механические свойства, что позволит улучшить качество металла. Несимметричность обеспечивается разностью скоростей со стороны верхнего и нижнего биконических валков, что, в свою очередь, доказано теоретическим методом линий скольжения, где разность скоростей со стороны большего и меньшего диаметров составляет 0,65 м/с, а интенсивность скоростей деформации составляет $\sim 0,65 - 0,46 \text{ с}^{-1}$. Кроме того, теоретически методами определено удельное контактное усилие при прокатке полосы в биконических валках. Анализ результатов исследования показывает достоверность полученных теоретических зависимостей для определения усилия прокатки в биконических валках. Формулы можно использовать при разработке технологии прокатки полосы в биконических валках.

Библиографический список

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Kawalek A., Dyja H., Ozhmegov K. Analysis of the process of plate rolling on the reversing mill // *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*. – 2020. – Vol. 9 (3). – P. 6420–6433. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.026>
3. Огинский И. К. Развитие методов расчета калибровки, определение положения раската в калибре при прокатке несимметричных профилей // *Обработка материалов давлением*. – 2010. – № 3 (24). – С. 149–153.
4. Выдрин А.В., Иванова Е.Е. Усилие при существенно несимметричной прокатке листов // *Вестник ЮУрГУ*. – 2008. – № 24. – С. 51–54.
5. Максимов Е.А. Исследование нового механизма снижения давления и повышения обжатий при несимметричной прокатке // *Металлообработка*. – 2010. – № 1 (55). – С. 46–49.
6. Максимов Е.А. Изменение геометрии концов полосы при несимметричной прокатке // *Оборудование*. – 2008. – № 3. – С. 50.
7. Колыбанов А.Н. Постановка задачи воспроизведения математической модели расчета параметров несимметричной прокатки // *Калибровочное бюро*. – 2018. – № 13. – С. 14.
8. Колыбанов А.Н. Один из возможных вариантов воспроизведения математической модели расчета параметров несимметричной прокатки // *Калибровочное бюро*. – 2018. – № 13. – С. 15–19.
9. Загорянский В.Г. Управление неравномерностью деформации при холодной прокатке биметаллических полос // *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр.* – 2013. – № 2 (35). – С. 199–202.
10. Николаев В.А. Продольные и нормальные напряжения в очаге деформации при несимметричной прокатке полос // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 9. – С. 37–42.
11. Николаев В.А., Васильев А.Г. Параметры несимметричной прокатки полос // *Sciences of Europe*. – 2019. – № 38-1 (38). – С. 50–63.
12. Пелленен А.П. Об использовании несимметричной прокатки для производства лент и полос // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 87–93. DOI: 10.14529/met200110
13. Vincze G., Simões F., Butuc M. Asymmetrical rolling of aluminum alloys and steels: a review // *Metals*. – 2020. – Vol. 10. – № 9. – P. 1126–1150. DOI:10.3390/met10091126
14. Simulation modelling of cold rolled metal strip by asymmetric technology / T.A. Mavlonov, A. Akhmedov, R. Saidakhmedov, K. Bakhadirov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 883. – № 1. – P. 012194–012199. DOI:10.1088/1757-899X/883/1/012194
15. Influence of small microscopic grooves of work rolls on strain gradient induced in metal sheets during symmetric and asymmetric rolling / D. Pustovoytov, A. Pesin, N. Lokotunina, A. Kozhemiakina // *Conf. proc. METAL 2019: 28th International conference on metallurgy and materials*. – Brno, 2019. – P. 265–270. DOI: 10.37904/metal.2019.701
16. Evolution of shear texture during the asymmetric rolling and its annealing behavior in a twin-roll casting AA6016 sheet: an ex-situ electron backscatter diffraction study / X. Ren, X. Zhang, Y. Huang, Y. Liu, L. Zhao, W. Zhou // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9 (3). – P. 6420–6433.
17. Asymmetric cross rolling: a new technique for alleviating orientation-dependent microstructure inhomogeneity in tantalum sheets / J. Zhu, S. Liu, D. Long, Y. Liu, N. Lin, X. Yuan, D. Orlov // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9(3). – P. 4566–4577. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.085>
18. Microstructure and texture evolution with relation to mechanical properties of compared symmetrically and asymmetrically cold rolled aluminum alloy / J. Kraner, P. Fajfar, H. Palkowski, G. Kugler, M. Godec, I. Paulin // *Metals*. – 2020. – Vol. 10 (2). – P. 1–14. DOI:10.3390/met10020156
19. Konstantinov D., Pustovoytov D., Pesin A. Influence of microstructure on inhomogeneity of stress and strain in the deformation zone during asymmetric cold rolling of ferritic-pearlitic steels // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – № 50. – P. 514–519.
20. Kraner J., Fajfar P., Palkowski H., Godec M., Paulin I. Asymmetric cold rolling of an AA 5xxx Aluminium alloy // *Materiali in tehnologije*. – 2020. – № 54 (4). – P. 575–582.
21. Ашкеев Ж.А. Исследование напряженного состояния при несимметричной прокатке полосы в валках с обратной конусностью // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2015. – Т. 57, № 2. – С. 6–9.
22. Naizabekov A., Andreyachshenko V., Kliber J. Forming of microstructure of the al-si-fe-mn system alloy by equal channel angular pressing with backpressure // *Conf. proc. 21st International conference on metallurgy and materials (Metal 2012)*. – Brno, 2012. – P. 391–395.
23. Andreyachshenko V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements // *Metallurgija*. – 2016. – № 55-4. – pp. 829-831.
24. Tool for realization severe plastic deformation / A. Naizabekov, V. Andreyachshenko, J. Kliber, R. Kocich // *Conf. proc. METAL 2013: 22nd International conference on metallurgy and materials*. – Brno, 2013. – P. 317–321.
25. Andreyachshenko V. Evolution of Al-Si-Mn-Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure // *Materials letters*. – 2019. – Vol. 254. – P. 433–435. 10.1016/j.matlet.2019.07.127
26. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: microstructure and mechanical properties / V. Andreyachshenko, Y. Isheva, A. Mazhit, D. Imangazinova // *Materiali in tehnologije*. – 2019. – Vol. 53-6. – P. 805–810. DOI: 10.17222/mit.2018.250
27. Колмогоров В.И. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
28. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия. 1972. – 408 с.
29. Ашкеев Ж.А., Андреещенко В.А. Определение контактных давлений при несимметричной прокатке в биконических валках // *Технология машиностроения*. – 2017. – № 7 (181). – С. 14–18.

References

1. Storozhev M.V., Popov E.A. Teorija obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 423 p.
2. Kawalek A., Dyja H., Ozhmegov K. Analysis of the process of plate rolling on the reversing mill. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 2020, Vol. 9 (3), pp. 6420-6433. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.026>
3. Oginskij I.K. Razvitie metodov rascheta kalibrovki, opredelenie polozhenija raskata v kalibre pri prokatke nesimmetrichnyh profilej [Development of methods for calculating the calibration, determining the position of the roll in the caliber when rolling asymmetric profiles]. *Obrabotka materialov davleniem*, 2010, № 3 (24), pp. 149-153.
4. Vydrin A. V., Ivanova E.E. Usilie pri sushhestvenno nesimmetrichnoj prokatke listov [Force during substantially asymmetric rolling of sheets]. *Vestnik JuUrGU*, 2008, № 24, pp. 51-54.
5. Maksimov E.A. Issledovanie novogo mehanizma snizhenija davlenija i povyshenija obzhatij pri nesimmetrichnoj prokatke [Investigation of a new mechanism for reducing pressure and increasing reductions in asymmetric rolling]. *Metallrobrabotka*, 2010, № 1 (55), pp. 46-49.
6. Maksimov E.A. Izmenenie geometrii koncov polosy pri nesimmetrichnoj prokatke [Change in the geometry of the ends of the strip during asymmetric rolling]. *Oborudovanie*, 2008, № 3, pp. 50.
7. Kolybanov A.N. Postanovka zadachi vosproizvedenija matematicheskoj modeli rascheta parametrov nesimmetrichnoj prokatki [Statement of the problem of reproducing the mathematical model for calculating the parameters of asymmetric rolling]. *Kalibrovochnoe bjuro*, 2018, № 13, pp. 14.
8. Kolybanov A.N. Odin iz vozmozhnyh variantov vosproizvedenija matematicheskoj modeli rascheta parametrov nesimmetrichnoj prokatki [One of the possible options for reproducing the mathematical model for calculating the parameters of asymmetric rolling]. *Kalibrovochnoe bjuro*, 2018, № 13, pp. 15-19.
9. Zagorjanskij V.G. Upravlenie neravnomernost'ju deformacii pri holodnoj prokatke bimetallicheskih polos [Control of uneven deformation during cold rolling of bimetallic strips]. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov*, 2013, № 2 (35), pp. 199-202.
10. Nikolaev V.A. Prodol'nye i normal'nye naprjazhenija v ochage deformacii pri nesimmetrichnoj prokatke polos [Longitudinal and normal stresses in the deformation zone during asymmetric rolling of strips]. *Metall i lit'e Ukrainy*, 2009, №9, pp. 37-42.
11. Nikolaev V.A., Vasil'ev A.G. Parametry nesimmetrichnoj prokatki polos [Asymmetric strip rolling parameters]. *Sciences of Europe*, 2019, № 38-1 (38), pp. 50-63.
12. Pellenen A.P. Ob ispol'zovanii nesimmetrichnoj prokatki dlja proizvodstva lent i polos [On the use of asymmetric rolling for the production of strips and strips]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Metallurgija*, 2020, Vol. 20, №. 1, pp. 87-93. DOI: 10.14529/met200110
13. Vincze G., Simões F., Butuc M. Asymmetrical rolling of aluminum alloys and steels: a review. *Metals*, 2020, Vol. 10, № 9, pp. 1126-1150. doi:10.3390/met10091126
14. Mavlonov T.A., Akhmedov A., Saidakhmedov R., Bakhadirov K. Simulation modelling of cold rolled metal strip by asymmetric technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, Vol. 883. № 1, pp. 012194-012199. doi:10.1088/1757-899X/883/1/012194
15. Pustovoytov D., Pesin A., Lokotunina N., Kozhemiakina A. Influence of small microscopic grooves of work rolls on strain gradient induced in metal sheets during symmetric and asymmetric rolling. Conf. proc. METAL 2019: 28th International conference on metallurgy and materials. Brno, 2019, pp. 265-270. DOI: 10.37904/metal.2019.701
16. Ren X., Zhang X., Huang Y., Liu Y., Zhao L., Zhou W. Evolution of shear texture during the asymmetric rolling and its annealing behavior in a twin-roll casting AA6016 sheet: an ex-situ electron backscatter diffraction study. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, Vol. 9 (3), pp. 6420-6433.
17. Zhu J., Liu S., Long D., Liu Y., Lin N., Yuan X., Orlov D. Asymmetric cross rolling: a new technique for alleviating orientation-dependent microstructure inhomogeneity in tantalum sheets. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3), pp. 4566–4577. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.085>
18. Kraner J., Fajfar P., Palkowski H., Kugler G., Godec M., Paulin I. (2020). Microstructure and texture evolution with relation to mechanical properties of compared symmetrically and asymmetrically cold rolled aluminum alloy. *Metals*, 2020, Vol. 10 (2), 156, pp. 1-14. doi:10.3390/met10020156
19. Konstantinov D., Pustovoitov D., Pesin A. Influence of microstructure on inhomogeneity of stress and strain in the deformation zone during asymmetric cold rolling of ferritic-pearlitic steels. *Procedia Manufacturing*, 2020, № 50, pp. 514-519.
20. Kraner J., Fajfar P., Palkowski H., Godec M., Paulin, I. Asymmetric cold rolling of an AA 5xxx Aluminium alloy. *Materiali in tehnologije*, 2020, № 54 (4), pp. 575-582.
21. Ashkeev Zh.A. Issledovanie naprjazhennogo sostojanija pri nesimmetrichnoj prokatke polosy v valkah s obratnoj konusnost'ju [Study of the stress state during asymmetric strip rolling in reverse taper rolls]. *Izvestija Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Chernaja Metallurgija*, 2015, Vol. 57, №. 2, pp. 6-9.
22. Naizabekov A., Andreyachshenko V., Kliber J. Forming of microstructure of the Al-Si-Fe-Mn system alloy by equal channel angular pressing with backpressure. Conf. proc. 21st International conference on metallurgy and materials (Metal 2012). Brno, 2012, pp. 391-395.
23. Andreyachshenko V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements. *Metallurgija*, 2016, № 55-4, pp. 829-831.
24. Naizabekov A., Andreyachshenko V., Kliber J., Kocich R. Tool for realization severe plastic deformation. Conf. proc. METAL 2013: 22nd International conference on metallurgy and materials. Brno, 2013, pp. 317-321.
25. Andreyachshenko V. Evolution of Al-Si-Mn-Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure. *Materials letters*, 2019, Vol. 254, pp. 433-435. 10.1016/j.matlet.2019.07.127
26. Andreyachshenko V., Isheva Y., Mazhit A., Imangazina D. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: microstructure and mechanical properties. *Materiali in tehnologije*, 2019, Vol. 53-6, pp. 805-810. 10.17222/mit.2018.250
27. Kolmogorov V.L. *Mehanika obrabotki metallov davleniem [Mechanics of metal forming]*. Moscow, Metallurgija, 1986, 688 p.
28. Tomlenov A.D. Teorija plasticheskogo deformirovanija metallov [The theory of plastic deformation of metals]. Moscow, Metallurgija, 1972, 408 p.
29. Ashkeyev Zh.A., Andreyachshenko V.A. Opredelenie kontaknyh davlenij pri nesimmetrichnoj prokatke v bikonicheskikh valkah [Determination of contact pressures during asymmetric rolling in biconical rolls]. *Tehnologija mashinostroenija*, 2017, № 7 (181), pp. 14-18.