

Машиностроение. Металлургия



DOI 10.52209/1609-1825_2021_2_31

УДК 661.771.014

Исследование напряженного состояния и скоростных параметров при несимметричной прокатке

¹**АШКЕЕВ Жасулан Аманжолович**, к.т.н., доцент, jashkeev@mail.ru,

¹**АБИШКЕНОВ Максат Жарылгасынович**, докторант, maks91.kz@inbox.ru,

¹**ҚАНСЕЙТ Нұрай Шанжарханқызы**, студентка гр. ТОМД-17к-1, kanseit17@mail.ru,

¹Карагандинский индустриальный университет, Казахстан, 101400, Темиртау, пр. Республики, 30,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью данной работы является определение напряженного состояния и скоростных параметров при несимметричной прокатке полосы. Для оценки напряженного состояния и значений скоростей в очаге пластической деформации использован теоретический метод линий скольжения, хорошо себя зарекомендовавший при решении плоских и осесимметричных задач. Анализ результатов исследования показал, что в очаге пластической деформации действуют сжимающие напряжения, способствующие измельчению структуры металла и закрытию, завариванию всех внутренних дефектов. Из-за разностей скоростей со стороны верхнего и нижнего валков создаются сдвиговые деформации в продольном и поперечном направлениях полосы, положительно влияющие на качество заготовок. При этом возникновение сдвиговых деформаций в продольном направлении снижает однонаправленное течение металла по направлению прокатки. В результате усредняются механические свойства металла, что положительно влияет на качество проката, металлоизделий при последующей холодной штамповке. Данный способ несимметричной прокатки можно использовать в составе широкополосных станов горячей прокатки.

Ключевые слова: несимметричная прокатка, асимметрия, валки, линия скольжения, окалиноломатель, скорость прокатки, напряжение, деформация.

Введение

Процесс несимметричной прокатки заготовок снижает однонаправленное течение металла

в продольном направлении. В результате усредняются механические свойства в продольном и поперечном направлениях. В работах [1-2] приве-

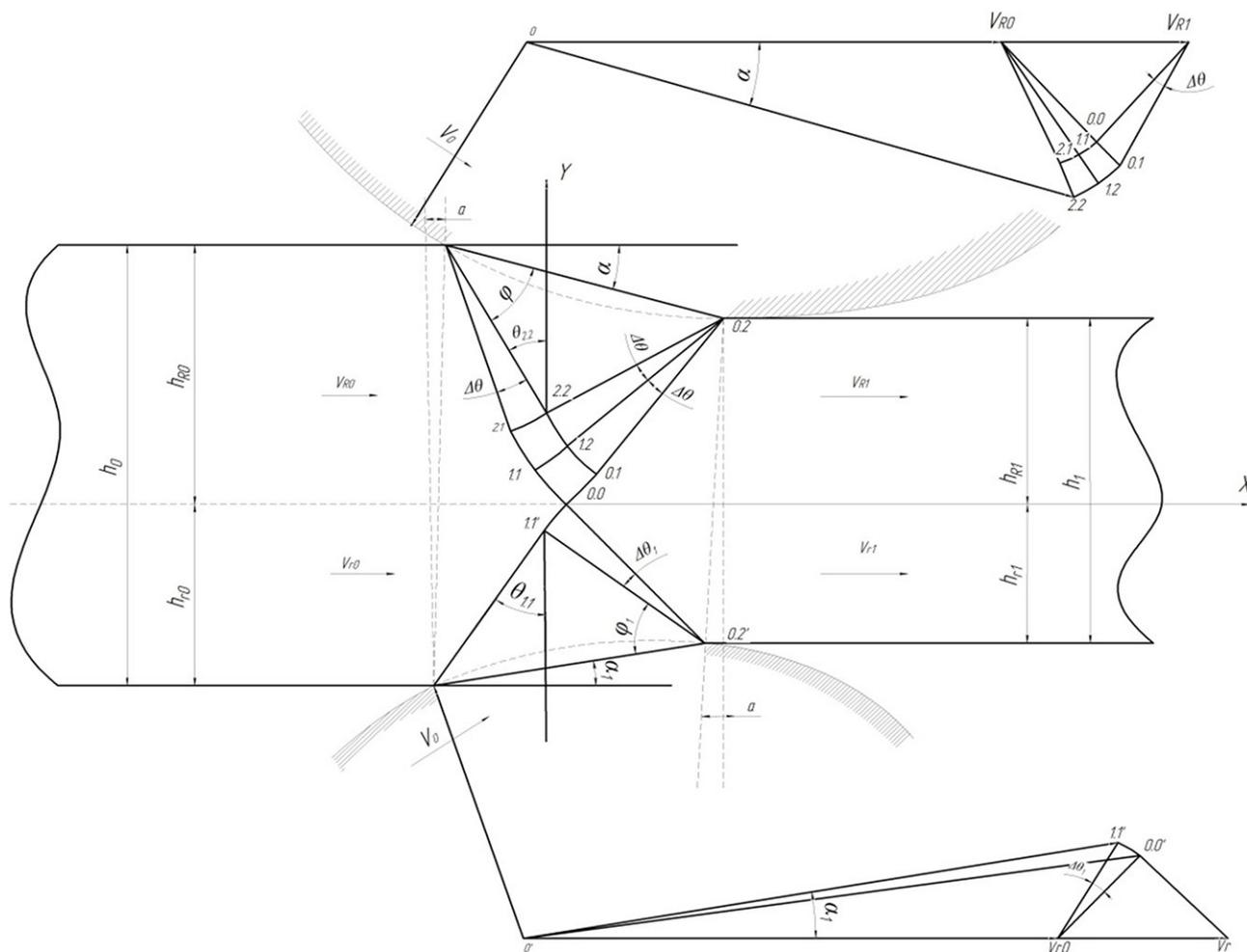
дены результаты исследования напряженного состояния при несимметричной прокатке полосы с отношением $h_{cp}/l_{cp} \approx 1,20-1,25$, где h_{cp} и l_{cp} – соответственно средняя высота и длина очага пластической деформации, т.е. заготовок невысокой формы очага деформации.

Однако в прокатных цехах иногда прокатка осуществляется при более высоких формах очага пластической деформации (рисунок). Например, более высокие формы очага деформации наблюдаются при прокатке полосы после выхода сляба из методической печи в черновых группах непрерывных широкополосных станов (НШПС), в частности, на участке удаления окалины с поверхности широких граней сляба (окалиноломателя). Поэтому в данной работе приведены результаты напряженного состояния и силовых параметров при несимметричной прокатке полосы более высокой формы очага деформации, т.е. $h_{cp}/l_{cp} \approx 1,50-1,65$. При этом коэффициент асимметрии равен $D/d=1,45$, где $D=0,5R$, $d=0,5r$ – соответственно диаметры (радиусы) со стороны большего и меньшего валков. Отличительная особенность валков с разными диаметрами, создающих несимме-

тричность процесса прокатки от аналогичных существующих конструкций, заключается в том, что валки смещены относительно друг друга на небольшое расстояние a . Валки с небольшим смещением относительно друг друга и разными диаметрами можно устанавливать поочередно в черновых группах НШПС, с сочетанием цилиндрических валков с равными диаметрами.

Из-за разностей скоростей течение металла исключается или снижается однонаправленное течение металла в продольном направлении, которое выравнивается на выходе из очага пластической деформации. Кроме того, уменьшаются усилия прокатки и другие технологические параметры [3-8]. Можно предположить, что, помимо продольных линейных деформаций по длине полосы, возможно возникновение сдвиговых деформаций по ширине полосы при несимметричной прокатке полосы при более высокой форме очага деформации.

Для этого необходима оценка напряженного состояния полосы и скоростных параметров при несимметричной прокатке в валках с разными диаметрами, смещенных относительно друг дру-



Поле линий скольжения и годограф скоростей при несимметричной прокатке полосы с разными диаметрами, смещенных относительно друг друга на величину a

га на величину a . Воспользуемся методом линий скольжения (л.с.) и другими теоретическими методами, которые хорошо себя зарекомендовали при решении плоских и осесимметричных задач ОМД [9-14].

Методы исследования

Построение сетки или поля линий скольжения (л.с.) начинаем с контактной поверхности верхнего вала и заготовки, куда л.с. при минимальном трении ($f \approx 0$) должны выходить под углом $\varphi = 45^\circ$, тогда в узловой точке 2.2 л.с. будут пересекаться с главной осью y под углом 35° , т.е. $\theta_{2,2} = 35^\circ$. В соседней узловой точке 1.2 л.с. пересекаются с главной осью под углом $\theta_{1,2} = 35^\circ + \Delta\theta = 45^\circ$, где $\Delta\theta = 10^\circ$ угол поворота л.с. при переходе из точки 2.2 в точку 1.2. В узловой точке 0.1 л.с. будет пересекаться с главными осями x и y под углом $\theta_{0,1} = 45^\circ + \Delta\theta = 55^\circ$. В узловой точке 2.1 л.с. с главной осью x и y пересекаются под углом: $\theta_{2,1} = 35^\circ - \Delta\theta = 25^\circ$. В узловой точке 1.1 угол между главными осями и л.с. определяем через соотношение: $\theta_{1,1} = \frac{\theta_{2,1} + \theta_{1,2}}{2} = \frac{25 + 45}{2} = 35^\circ$. Наконец, л.с. в узловой точке 0.0 пересекают главную ось x и y под углом $\theta_{0,0} = \frac{55 + 35}{2} = 45^\circ$, пересечение главной оси под углом 45° говорит о правильности построения сетки л.с.

Аналогичным образом строим сетку л.с. со стороны нижнего вала, куда л.с. выходят на контактную поверхность также под углом 45° . Тогда в узловой точке 1.1' л.с. пересекаются с главной осью y под углом 35° , и в узловой точке 0.0 л.с. пересекают главную ось под углом $\theta_{0,0} = 35^\circ + \Delta\theta = 45^\circ$, что говорит о правильности построения сетки л.с.

Теперь приступим к построению годографа скоростей. Для этого с полюсов 0 и 0₁, т.е. с неподвижных точек откладываем по направлению прокатки в масштабе 1:1 отрезок, равный скорости течения металла на входе в очаг деформаций со стороны большего диаметра верхнего вала. Примерно для анализа примем скорость течения $v_{R0} \approx 100-105$ мм/с (0,1-0,105 м/с). Далее от конца данного вектора откладываем скорость течения металла на выходе из очага деформаций, соблюдая

условие несжимаемости, т.е.: $\frac{v_{R1}}{v_{R0}} = \frac{h_{R0}}{h_{R1}} = 1,4$, где h_{R0} и h_{R1} – соответственно высота полосы со стороны входа и выхода из очага деформаций относительно оси x , где скорости полосы со стороны верхнего и нижнего валков должны быть равны. Из данного условия скорость течения металла на выходе из очага деформаций составит $v_{R1} = v_{R0} * 1,4 \approx 140$ мм/с, которую откладываем от полюса 0 в выбранном масштабе, т.е. 140 мм. От конца проведенных отрезков (векторов) под углом 45° проводим линии, точку пересечения которых отмечаем 0.0, показывающие скорость течения металла в точке 0.0. От проведенных линий проводим дуги на величину угла поворота $\Delta\theta = 10^\circ$, соединяя дуги прямыми

отрезками, получим точки пересечения 2.1 и 1.2, и, наконец, проведя от полученных точек перпендикуляры, получим точку пересечения 1.1. Продолжая таким образом построение до точки 2.2, получим годограф скоростей со стороны верхнего вала. Соединяя данную точку 2.2 с полюсом 0, получим скорость течения металла в точке 2.2. При этом образованный угол α должен совпасть с углом захвата полосы, что показывает правильность построения годографа скоростей.

Аналогичным образом строим годограф скоростей со стороны нижнего вала, где скорость течения металла со стороны входа в очаг деформаций составит, $v_{R0} = 102,4$ мм/с, а на выходе из очага деформации, из условия несжимаемости составит: $v_{r1} = v_{r0} \frac{h_{r0}}{h_{r1}} = 102,4 * 1,36 = 139,26 \approx 140$ мм/с.

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:

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

Используем соотношения Генки:

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

Подставляя (2) в (1), получим,

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

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

$$\frac{\sigma_{0,0}}{2k} = \frac{\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right)y_{0,1} + \left(\theta_{0,1} - \frac{\pi}{4}\right)(y_{0,2} - y_{0,1}) - 0,5(x_{0,2} + x_{0,2})}{y_{0,0} - y_{0,2}},$$

подставляя в полученное соотношение значения непосредственно из рисунка. В результате получим значение среднего напряжения в узловой точке 0.0, т.е. $\frac{\sigma_{0,0}}{2k} = -1,70$, отсюда, $\sigma_{0,0} = -2k \cdot 1,70$, где k – пластическая постоянная или предел текучести на сдвиг. Например, если прокатывается заготовка из стали марки 08кп, тогда при температуре $T = 850^\circ\text{C}$ сопротивление деформаций составит $\sigma_T = 110$ МПа, $k = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5$ МПа, и $\sigma_{0,0} = -2 * 63,5 * 1,70 = -215,9 \approx 216$ МПа.

Компоненты напряжения в узловой точке 0.0:

$$\begin{aligned} \sigma_{y0,0} &= \sigma_{0,0} - k \sin 2\theta_{0,0} = -216 - 63,5 = -279,5 \text{ МПа}, \\ \sigma_{x0,0} &= \sigma_{0,0} + k \sin 2\theta_{0,0} = -216 + 63,5 = -152,5 \text{ МПа}, \\ \tau_{xy} &= -k \cos 2\theta_{0,0} = 0 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Компоненты напряжения в соседней узловой точке 0.1:

$$\text{Среднее напряжение: } \sigma_{0.1} = \sigma_{0.0} - 2k \left(\frac{5,5\pi}{18} - \frac{\pi}{4} \right) = -216 - 2 \cdot 63,5 \cdot \frac{\pi}{18} = -238,15 \text{ МПа.}$$

$$\text{Компоненты напряжения: } \sigma_{y0.1} = \sigma_{0.1} - k \sin 2\theta_{0.1} = -238,15 - 63,5 \sin 2 \cdot 55^\circ = -297,82 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{x0.1} = \sigma_{0.1} + k \sin 2\theta_{0.1} = -178,47 \text{ МПа,}$$

$$\tau_{xy} = -k \cos 2\theta_{0.1} = 21,71 \text{ МПа.}$$

Аналогичным образом определяем компоненты напряжения в точке 1.1 и в других узловых точках.

Как показывают расчеты, напряженное состояние в узловых точках 1.1 и 0.1 относительно оси симметрии у между собой равно, кроме того, будут равны средние напряжения в узловых точках 1.1 и 2.2. Контактное давление p_y при несимметричной прокатке в валках с разными диаметрами можно определить через компоненты напряжения в узловой точке 2.2, т.е. $p_y = \sigma_{y2.2} = -\sigma_{2.2} - k \sin 2\theta_{2.2} = 297,5 \text{ МПа.}$

Результаты и обсуждения

Анализ результатов вычисления напряженного состояния в узловых точках поля л.с. показывает, что в очаге деформаций действуют сжимающие напряжения, которые препятствуют интенсивному вытягиванию зерен в продольном направлении, снижают растягивающие напряжения и способствуют выравниванию механических свойств, закрытию и завариванию всех внутренних дефектов заготовок, особенно литых. При этом компоненты напряжения в узловых точках 1.1 и 0.1 относительно оси у равны. При этом контактное давление p_y при несимметричной прокатке будет равно $p_y = \sigma_{y2.2} = -\sigma_{2.2} - k \sin 2\theta_{2.2} = 297,5 \text{ МПа.}$

Анализ полученных скоростных параметров показывает, что скорости в узловых точках со стороны верхнего вала с большим диаметром больше, чем со стороны нижнего вала с меньшим диаметром. Например, скорость перемещения узловой точки 0.1 полосы со стороны верхнего вала равна $v_{0.1} \approx 125 \text{ мм/с}$, а узловой точки 1.1' со стороны нижнего вала $v_{1.1'} \approx 117 \text{ мм/с}$. За счет разностей скоростей со стороны верхнего и нижнего валков создаются сдвиговые деформации в поперечном направлении, которые меняют однонаправленное течение металла в продольном направлении. Из построенного годографа скоростей видно, что скорости на выходе из очага деформации выравниваются. Кроме того, можно определить окружную скорость вращения v_0 со стороны верхнего и нижнего валков, которые должны совпасть, т.е.

$$v_0 = \frac{v_{R0}}{\cos \alpha} = \frac{v_{r0}}{\cos \alpha_1} = \frac{100}{\cos 16^\circ} = \frac{102,4}{\cos 10^\circ} \approx 104 \text{ мм/с.}$$

По результатам вычисления можно заключить правильность построенного поля л.с. и годографа скоростей, так как выполняется равенство окружных скоростей со стороны верхнего и нижнего валков (104 мм/с). При расхождении значений скоростей показывает ошибку построения сетки л.с. и плана скоростей, т.к. окружная скорость валков никак не может быть разной. Также скорость течения металла со стороны большего диаметра (102,4 мм/с) на входе в очаг пластической деформации больше, чем со стороны меньшего диаметра (100 мм/с), что вполне справедливо.

Приращения скоростей течения металла в продольном направлении составит: со стороны верхнего вала $\Delta v = 40 \text{ мм/с}$, нижнего $\Delta v_1 = 37,6 \text{ мм/с}$, тогда для единицы ширины полосы: $(\Delta v - \Delta v_1)/b$, где b – ширина полосы. Допустим, если ширина полосы равна 100 мм, тогда интенсивность деформаций сдвига составит: $(0,4 - 0,376)/0,1 = 0,3 \text{ с}^{-1}$. Именно возникновение сдвиговых деформаций в продольном направлении снижает однонаправленное течение металла по направлению прокатки. В результате усредняются механические свойства металла, что положительно влияет на качество проката, особенно при последующей холодной штамповке.

Таким образом, еще раз доказана правильность построения поля л.с. и возникновения сдвиговых деформаций по ширине полосы при несимметричной прокатке в валках с разными диаметрами, смещенных относительно друг друга на величину a . Возникновение сдвиговых деформаций предотвращает однонаправленное течение металла, усредняет механические свойства в продольном и поперечном направлениях.

Выводы

Произведена оценка напряженного состояния заготовок и скоростных параметров при несимметричной прокатке полосы с разными диаметрами, смещенных относительно друг друга на величину a . Определены скоростные параметры при несимметричной прокатке. Анализ результатов напряженного состояния заготовок, полученных методом линий скольжения, показывает, что в объеме заготовки возникают максимальные сжимающие средние (нормальные) напряжения. За счет возникновения сдвиговых деформаций предотвращается однонаправленное течение металла, усредняются механические свойства в продольном и поперечном направлениях, что улучшает качество проката. Валки можно устанавливать в составе черновых групп клетей непрерывных широкополосных станов (НШПС) горячей прокатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкеев Ж.А., Андриященко В.А., Буканов Ж.У. Исследование процесса несимметричной прокатки заготовок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 27-35. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.03.
2. Ашкеев Ж.А., Андриященко В.А. Определение контактных давлений при несимметричной прокатке в биконических валках // Технология машиностроения. – 2017. – № 7 (181). – С. 14-18.
3. Kawatek A., Dyja H., Ozmegeov 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>.
4. 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.
5. Выдрин А.В., Иванова Е.Е. Усилие при существенно несимметричной прокатке листов // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – № 24. – С. 51-54.
6. Максимов Е.А. Исследование нового механизма снижения давления и повышения обжатий при несимметричной прокатке // Металлообработка. – 2010. – № 1 (55). – С. 46-49.
7. Максимов Е.А. Изменение геометрии концов полосы при несимметричной прокатке // Оборудование. – 2008. – № 3. – С. 50.
8. Колыбанов А.Н. Постановка задачи воспроизведения математической модели расчета параметров несимметричной прокатки // Калибровочное бюро. – 2018. – № 13. – С. 14.
9. Колыбанов А.Н. Один из возможных вариантов воспроизведения математической модели расчета параметров несимметричной прокатки // Там же. – 2018. – № 13. – С. 15-19.
10. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: microstructure and mechanical properties / V. Andreyachshenko, Y. Isheva, A. Mazhit, D. Imangazinova // Materials in tehnologije. – 2019. – Vol. 53-6. – P. 805-810. DOI: 10.17222/mit.2018.250.
11. Rahimi, F., Eivani, A.R., Jafarian, H.R., & Bhattacharjee, T. (2017). Effect of pure shear strain on mechanical properties and microstructural evolution. Materials Science and Engineering: A, 679, 133-142.
12. Toribio, J. (2019). Crack path deflection in cold-drawn pearlitic steel as a consequence of microstructural anisotropy generated by manufacturing: Resembling Picasso, Larionov and Goncharova. Procedia Structural Integrity, 16, 281-286.
13. Valiev, R.Z., Zhilyaev, A.P., & Langdon, T.G. (2014). Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
14. Goloujeh, M.R., & Soltanpour, M. (2020). Simple Shear Forging as a Method for Severe Plastic Deformation. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture (in press, journal preproof).
15. Bhaduri, A. (2006). Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Berlin-Heidelberg: Springer.
16. Николаев В.А. Продольные и нормальные напряжения в очаге деформации при несимметричной прокатке полос // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С. 37-42.

Симметриялық емес прокаттау кезіндегі кернеулі жай-күй мен жылдамдық параметрлерін зерттеу

¹*АШКЕЕВ Жасұлан Аманжолұлы, т.ф.к., доцент, jashkeev@mail.ru,

¹АБІШКЕНОВ Мақсат Жарылғасынұлы, докторант, maks91.kz@inbox.ru,

¹ҚАНСЕЙТ Нұрай Шанжарханқызы, ТОМД-17к-1 тобының студенткасы, kansait17@mail.ru,

¹Қарағанды индустриалды университеті, Қазақстан, 101400, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – жолақты асимметриялық прокаттау кезінде кернеу күйін және жылдамдық параметрлерін анықтау. Пластикалық деформация ошағындағы кернеудің күйін және жылдамдық мәндерін бағалау үшін жалпақ және осесимметриялық есептерді шешуде өзін жақсы дәлелдеген жылжымалы сызықтардың теориялық әдісі қолданылды. Зерттеу нәтижелерін талдау пластикалық деформация ошағында қысу кернеулері әрекет ететіндігін көрсетті, бұл металл құрылымын ұсақтауға және жабуға, барлық ішкі ақауларды дәнекерлеуге ықпал етеді. Жоғарғы және төменгі орамдардағы жылдамдық айырмашылығына байланысты жолақтың бойлық және көлденең бағыттарында ығысу деформациясы пайда болады, бұл дайындамалардың сапасына оң әсер етеді. Бұл жағдайда бойлық бағытта ығысу деформацияларының пайда болуы прокаттау бағытында металдың бір бағытты ағынын азайтады. Нәтижесінде металдың механикалық қасиеттері орташа болады, бұл прокаттың, металл бұйымдарының сапасына оң әсер етеді, содан кейін суық штамптау. Асимметриялық прокаттаудың бұл әдісін кең жолақты ыстық прокаттау стандартының құрамында қолдануға болады.

Кілт сөздер: асимметриялық прокаттау, асимметрия, роликтер, сырғанау сызықтары, масштабты бұзғыш, илектену жылдамдығы, кернеу, деформация.

Studying the Stress State and Speed Parameters with Asymmetric Rolling

¹*ASHKEYEV Zhasulan, Cand. Tech. Sci., Associate Professor, jashkeev@mail.ru,

¹ABISHKENOV Maksat, doctoral student, maks91.kz@inbox.ru,

¹KANSEIT Nuray, student of the TOMD-17k-1 group, kanseit17@mail.ru,

¹Karaganda Industrial University, Kazakhstan, 101400, Temirtau, Republic ave., 30,

*corresponding author.

Abstract. The aim of this work is to determine the stress state and speed parameters for asymmetric strip rolling. To assess the stress state and the values of speeds in the zone of plastic deformation, the theoretical method of slip lines has been used, which has proven itself well in solving plane and axisymmetric problems. The analysis of the research results shows that compressive stresses act in the zone of plastic deformation, contributing to the refinement of the metal structure and the closure, welding of all internal defects. Due to the speed differences on the side of the upper and lower rolls, shear deformations are developed in the longitudinal and transverse directions of the strip, which positively affects the quality of the workpieces. In this case, the occurrence of shear deformations in the longitudinal direction reduces the unidirectional flow of metal in the direction of rolling. As a result, mechanical properties of the metal are averaged, which has a positive effect on the quality of rolled products and metal products during subsequent cold stamping. This asymmetric rolling method can be used in hot strip mills.

Keywords: asymmetric rolling, asymmetry, rolls, slip lines, scale breaker, rolling speed, stress, deformation.

REFERENCES

1. Ashkeev Zh.A., Andreyashchenko V.A., Bukanov Zh.U. Issledovanie processa nesimmetrichnoj prokatki zagotovok // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. – 2020. – № 4. – S. 27-35. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.03.
2. Ashkeev Zh.A., Andreyashchenko V.A. Opredelenie kontaktnykh davlenij pri nesimmetrichnoj prokatke v bikonicheskikh valkakh // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2017. – № 7 (181). – S. 14-18.
3. 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). – R. 6420-6433. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.026>.
4. Oginskij I.K. Razvitie metodov rascheta kalibrovki, opredelenie polozheniya raskata v kalibre pri prokatke nesimmetrichnykh profilej // Obrabotka materialov davleniem. – 2010. – № 3 (24). – S. 149-153.
5. Vydrin A.V., Ivanova E.E. Usilie pri sushchestvenno nesimmetrichnoj prokatke listov // Vestnik YuUrGU. – 2008. – № 24. – S. 51-54.
6. Maksimov E.A. Issledovanie novogo mekhanizma snizheniya davleniya i povysheniya obzhatij pri nesimmetrichnoj prokatke // Metalloobrabotka. – 2010. – № 1 (55). – S. 46-49.
7. Maksimov E.A. Izmenenie geometrii koncov polosy pri nesimmetrichnoj prokatke // Oborudovanie. – 2008. – № 3. – S. 50.
8. Kolybanov A.N. Postanovka zadachi vosproizvedeniya matematicheskoy modeli rascheta parametrov nesimmetrichnoj prokatki // Kalibrovochnoe byuro. – 2018. – № 13. – S. 14.
9. Kolybanov A.N. Odin iz vozmozhnykh variantov vosproizvedeniya matematicheskoy modeli rascheta parametrov nesimmetrichnoj prokatki // Tam zhe. – 2018. – № 13. – S. 15-19.
10. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: microstructure and mechanical properties / V. Andreyachshenko, Y. Isheva, A. Mazhit, D. Imangazinova // Materiali in tehnologije. – 2019. – Vol. 53-6. – R. 805-810. DOI: 10.17222/mit.2018.250.
11. Rahimi, F., Eivani, A.R., Jafarian, H.R., & Bhattacharjee, T. (2017). Effect of pure shear strain on mechanical properties and microstructural evolution. Materials Science and Engineering: A, 679, 133-142.
12. Toribio, J. (2019). Crack path deflection in cold-drawn pearlitic steel as a consequence of microstructural anisotropy generated by manufacturing: Resembling Picasso, Larionov and Goncharova. Procedia Structural Integrity, 16, 281-286.
13. Valiev, R.Z., Zhilyaev, A.P., & Langdon, T.G. (2014). Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
14. Goloujeh, M.R., & Soltanpour, M. (2020). Simple Shear Forging as a Method for Severe Plastic Deformation. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture (in press, journal preproof).
15. Bhaduri, A. (2006). Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Berlin-Heidelberg: Springer.
16. Nikolaev V.A. Prodol'nye i normal'nye napryazheniya v ochage deformacii pri nesimmetrichnoj prokatke polos // Metall i lit'e Ukrainy. – 2009. – № 9. – S. 37-42.