

Медведев В.С., Шпаков В.А., Базарова Е.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ

Medvedev V.S., Shpakov V.A., Bazarova K.V.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE METAL FLOW IN THE BEAM CALIBRES

Проведены экспериментальные исследования формоизменения металла в закрытом разрезном калибре методом конечных деформаций. Получены распределение наибольших логарифмических деформаций и эпюра изменения интенсивности деформаций сдвига по сечению дуэтаврового профиля при прокатке в балочных калибрах без чередования обработки фланцев. Экспериментальные данные используются при построении поля скоростей и создании адекватных теоретических моделей процессов прокатки, позволяющих усовершенствовать калибровки прокатных валков и получать дуэтавровые профили с точными геометрическими размерами.

Ключевые слова: *дуэтавровый профиль, разрезной калибр, деформация, интенсивность деформации, калибровка валков.*

Введение

Одна из основных задач развития прокатного производства – обеспечение максимальной экономии металла за счет снижения отходов на переделах, уменьшения допусков на размеры прокатной продукции и расширения выпуска экономичных профилей. Для решения этой задачи, наряду с улучшением технологических процессов, оснащением строящихся станов новейшим оборудованием и аппаратурой, необходимо усовершенствовать действующие прокатные станы.

Необходимость получения точных и экономичных профилей остается актуальной и в настоящее время. Решению проблемы в области усовершенствования технологии прокатки и существующего оборудования способствует изучение распределения деформации металла по сечению сортовых профилей.

Известны исследования возможности установления закономерностей пластического формоизменения при прокатке с чередованием и без чередования обработки фланцев в черновых балочных калибрах [1]. В процессе исследования использовались исходные заготовки, изготовленные путем спайки сплавом Вуда отдельных свинцовых пластин. Заго-

товку прокатывали на лабораторном стане 360. После прокатки образцы распаивали. Исследования проводили в закрытом калибре, который в линии прокатки расположен непосредственно за вторым разрезным калибром. Площадь фланцев для этих калибров значительно превышала площадь шейки, а их отношение составляло $F_{\phi}/F_{ш} = 1,75$.

При прокатке коэффициент вытяжки в калибре принимал значения $\mu = 1,46 - 1,61$ (первое значение относится к прокатке с чередованием, а второе – без чередования обработки фланцев), а отношение обжатий по основанию открытого и закрытого фланцев составляло $\Delta b_{\phi}/\Delta b_3 = 0,82 - 1,29$.

Цель

Целью статьи является изучение формоизменения в закрытых разрезных калибров методом конечных деформаций, которое позволит получить уточненные результаты по сравнению с предшествующими исследованиями и дать достаточно надежные данные по формоизменению металла при прокатке.

Методика исследования

Исследования проводили в закрытом калибре, следующим в линии прокатки непосредственно за первым разрезным калибром. Профиль валков для прокатки заготовки двутавровой балки изображен на рис. 1. Расчетная схема разрезного и предшествующего ему калибров представлены на рис. 2. Площадь фланцев в этом случае незначительно превышает площадь шейки, а их отношение составляет $F_{\phi}/F_{ш} = 1,145$.

При прокатке коэффициент вытяжки в калибре составил $\mu = 1,39$, а отношение обжатий по основанию открытого и закрытого фланцев $\Delta b_{\phi}/\Delta b_3 = 0,93$. Исходная и деформированная сетки, полученные при прокатке заготовки в закрытом разрезном калибре, изображены на рис. 3.

Для исследования в условиях моделирования реального процесса прокатки исходные свинцовые заготовки получали путем спайки сплавом Вуда отдельных частей длиной 150 - 170 мм, на торце которых была нанесена координатная сетка с базой $\Delta_0 = 2 \text{ мм}$. Заготовку прокатывали на лабораторном стане 360. После прокатки образцы распаивали.

По результатам измерения координат узлов сетки вычисляли наибольшие логарифмические деформации e_1 и e_2 по методу Э. Зибеля [2].

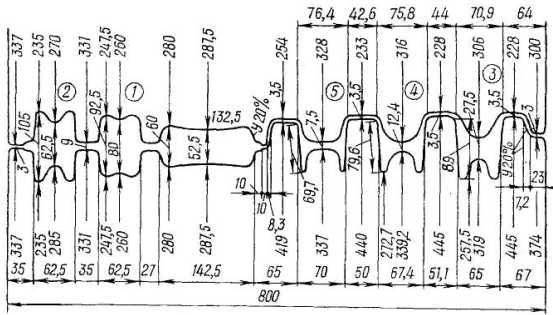


Рис. 1. Профиль валков для прокатки заготовки двутавровой балки

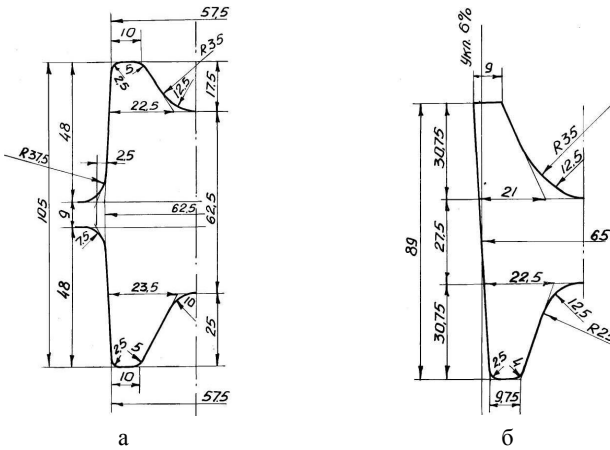


Рис. 2. Расчетная схема разрезного калибра – а и следующего за ним калибра – б

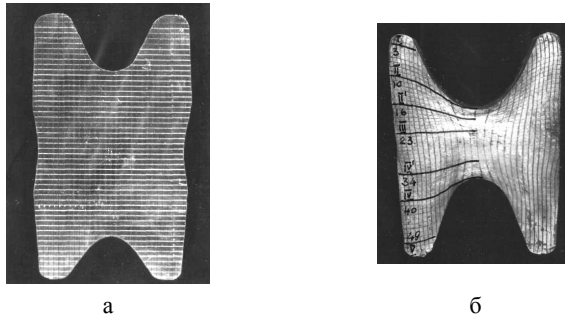


Рис. 3. Деформированные сетки, полученные при прокатке заготовки в закрытом разрезном калибре (а – исходная заготовка, б – после прохода)

Главные компоненты деформации определялись по выражениям:

$$e_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_i^2 + b_i^2 + \sqrt{(a_i^2 + b_i^2)^2 - 4a_i^2 b_i^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2}, \quad (1)$$

$$e_2 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_i^2 + b_i^2 - \sqrt{(a_i^2 + b_i^2)^2 - 4a_i^2 b_i^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2}, \quad (2)$$

где a_i и b_i – сопряженные радиусы, соединяющие точки касания эллипса со сторонами параллелограмма деформированной квадратной ячейки делительной сетки;

δ – угол между сопряженными радиусами a_i и b_i ;

a_0 – база координатной сетки.

Результаты исследования

На рис. 4 изображены распределение главных деформаций $e_{1,2}$ по сечению профиля при прокатке без чередования обработки фланцев и схема расположения исследованных точек по сечению полосы.

В результате анализа кривых (рис. 4, а) были сделаны следующие выводы. Заготовка по всему сечению подвергается действию сжимающих напряжений. Об этом свидетельствует главная деформация e_1 , которая в данном случае имеет отрицательное значение. Ее максимум по модулю располагается вблизи оси симметрии сечения $n_x = 14$ (кривая II, рис. 4, а).

По ширине профиля e_1 плавно уменьшается от $-0,865$ при $n_x = 14$ до $(-0,25 \div -0,335)$ при $n_x = 1 \div 3$. Некоторые отличия имеют кривые для точек сечения в закрытой части калибра (кривые III - V), когда минимум e_1 находится вблизи середины толщины полки, а затем имеет место возрастание к наружной грани полки, что связано с активным действием контактных сил трения на наружной поверхности полки.

Анализ деформации e_1 по высоте калибра показывает, что в полке максимальное значение относится к краю открытого фланца $a_i = -0,36$ (рис. 4, а, кривая I). Аналогичные значения имеют точки кривых II и III. Во фланцевой области сечения ($n_x = 5 \div 11$) максимальное значение e_1 принадлежит кривой II, затем в порядке убывания по высоте профиля линиям III, II', IV, IV'. При $n_x = 11 \div 14$ максимальные значения соответствуют линии II', постепенно убывая для кривых II, IV', IV, III. Минимальные значения соответствуют кривой IV' и краю закрытого фланца

$\dot{a}_1 = -0,18$ (рис. 4, а, кривая V). Промежуточные значения деформации e_1 в полке соответствуют сечениям под фланцевой областью шейки профиля $n_x = 3 \div 7$ (рис. 4, а).

На рис. 4, в показано распределение главных деформаций e_2 по ширине в сечении профиля. В результате изучения кривых e_2 можно прийти к выводу, что деформация меняет знак. Так область отрицательных значений (сжатие) соответствует закрытому фланцу (кривые IV, V) и прилегающим к наружной грани полки областям металла (кривые I, II', III) открытого фланца. Область отрицательных значений e_2 находится в областях с относительно малой деформацией, для которых характерна утяжка (закрытый фланец и область наружной грани полки).

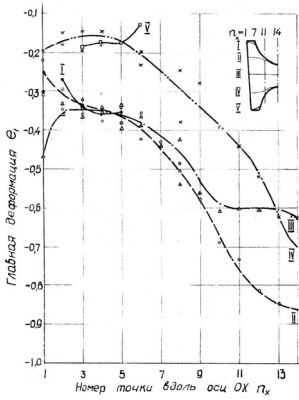
Область положительных значений e_2 располагается в открытом фланце и в шейке. В положительной области e_2 по модулю значительно превышает все величины e_2 отрицательной области. К примеру для кривой II' $\dot{a}_2 = +0,8$ и $\dot{a}_2 = -0,15$ соответственно. Данное обстоятельство представляет интерес по причине наличия наибольшей неравномерности деформаций при прокатке в разрезном калибре.

Максимальное значение e_2 располагается на оси симметрии калибра. По ширине калибра от середины к наружной грани полки деформация e_2 уменьшается (рис. 4, в). Минимальные значения e_2 соответствуют области вблизи наружной грани полки и области края закрытого фланца.

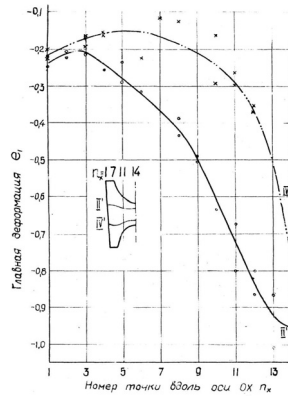
По высоте профиля изменение e_2 носит следующий характер. Максимальные значения e_2 при $n_x = 12 \div 14$ (в шейке) соответствуют кривой II, минимальные – кривой IV'. Таким образом, наблюдается уменьшение деформации e_2 по толщине шейки от гребней к оси симметрии. При этом минимум соответствует точкам металла вблизи открытого гребня. Что касается области металла вблизи закрытого гребня, то там значения e_2 ниже.

Во фланцевой области профиля $n_x = 1 \div 8$ максимальные значения e_2 принадлежат кривой II, а также середине толщины шейки (кривая III) и краю открытого фланца (кривая I). Минимальные значения по высоте принадлежат кривым IV, V (область металла вблизи закрытого гребня и по краю закрытого фланца соответственно).

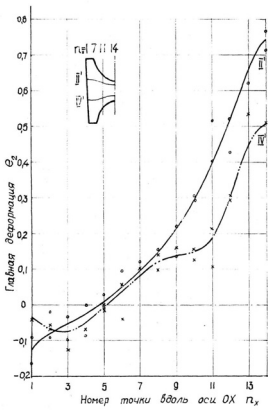
Следует отметить, что при прокатке в закрытом разрезном калибре деформации e_1 в шейке при $n_x = 11 \div 14$ соизмеримы по модулю с деформациями e_2 (абсолютные значения их примерно равны). Данный факт говорит о превышении уширения за счет поперечного растяжения шейки. Кроме того разница деформаций $|e_1| - |e_2|$ возрастает к середине толщины шейки.



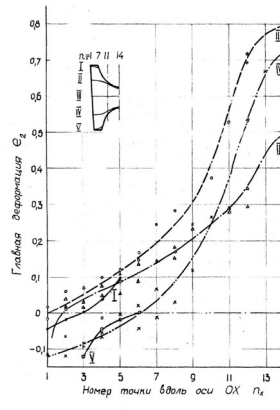
а



б



в



г

Рис. 4. Распределение главных деформаций $e_{1,2}$ по сечению профиля

Таким образом, максимальное уширение наблюдается в приконтактных слоях металла, минимальное – на середине шейки по толщине.

Значения e_1 в зоне оси симметрии вблизи гребней несколько меньше, чем у слоев металла, расположенных между серединой по толщине шейки и гребнями. Это свидетельствует о наличии зоны затрудненной деформации над гребнями. Значение e_1 при $n_x = 1 \div 6$, где e_2 имеет отрицательные значения, составляет $0,15 \div 0,35$, а им соответствует $\dot{a}_2 = 0 \div -0,13$. Как уже отмечалось, знак «минус» соответствует областям с наибольшей деформацией сжатия. Поэтому, можно утверждать, что причиной появления отрицательного знака деформации e_2 является сжа-

тие в направлении оси e_2 , а утяжка, когда за счет более обжимаемых объемов металла в менее обжимаемых компенсируется средняя вытяжка. На основе определенных в плоскости измерения по методу Зибеля [2] наибольших логарифмических деформаций оси e_1 и e_2 вычисляли интенсивность деформаций сдвига Γ_k по формуле:

$$\tilde{A}_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\dot{a}_1^2 + \dot{a}_2^2 + \dot{a}_1 \dot{a}_2} \quad (3),$$

которая учитывает условие несжимаемости.

Эпюра изменения параметра Γ_k по сечению полосы изображена на рис. 5. Интенсивность деформации сдвига получается максимальной при $n_x = 12 \div 14$ вблизи оси симметрии профиля (эпюры II, IV, III). При удалении по ширине калибра от оси симметрии и наружной поверхности полки значение Γ_k уменьшается и при $n_x = 5 \div 6$ достигает минимального значения. Для слоев металла, расположенных вблизи открытого гребня, при $n_x = 14$ значение Γ_k больше, чем у закрытого гребня на 24%.

Во фланцевой области большие значения интенсивности деформаций сдвига соответствуют слоям металла, прилегающим к гребням (эпюры II, VI, III). Как известно, интенсивность деформаций сдвига Γ_k характеризует удельную работу формоизменения, поэтому ее повышенному значению вдоль контура открытого гребня соответствует большая работа формоизменения, чем вдоль контура закрытого гребня. Это выражается повышенным обжатием верхнего гребня по сравнению с закрытым.

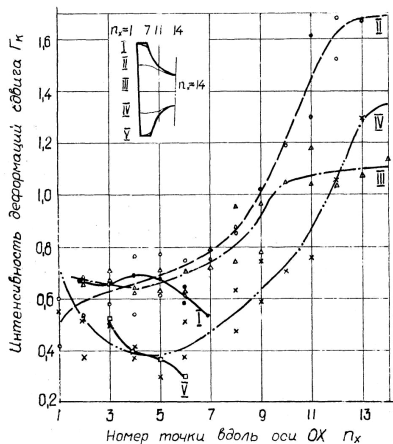


Рис. 5. Распределение интенсивности деформаций сдвига Γ_k по сечению полосы при прокатке двутавровой заготовки

Больше работы затрачивается на формоизменение гребнями при деформации фланцев по толщине. Причем в области открытого гребня наблюдается опережение металла, т.е. большие скорости течения.

По высоте полки значение Γ_k уменьшается от середины к краю открытого фланца.

Таким образом, интенсивность деформаций сдвига неравномерна по сечению полосы. Деформацию можно считать равномерной, если в каждой точке деформируемого тела тензоры деформаций равны, т. е. равны соответствующие компоненты и сохраняется их направление. Тогда будут равны и вторые инварианты девиатора деформаций.

Неравномерность деформаций можно оценить разностью между максимальной и минимальной интенсивностью деформаций сдвига по сечению полосы. Для удобства сопоставления двух схем прокатки можно использовать усредненную по сечению величину неравномерности деформации θ , которую примем за критерий при оценке неравномерности деформаций сдвига:

$$\theta = \frac{(\tilde{A}_{max} - \tilde{A}_{min})}{\tilde{A}_{\bar{n}\bar{d}}} . \quad (4)$$

Предложенный критерий, учитывающий и максимальную, и минимальную величину Γ_k , достаточно чувствителен к изменению неравномерности деформаций.

Для равномерной деформации критерий $\theta = 0$. В данном случае он получится равным $(1,7 - 0,3) / 0,96 = 1,46$.

Для оценки точности координатной сетки производилось многократное измерение двух координатных сеток на инструментальном микроскопе УИМ-21 с увеличением 30 в продольном и в поперечном направлениях. В результате полученных данных выяснилось, что распределение погрешностей соответствует нормальному закону распределения. Вычисленное генеральное среднее случайной величины составило $\hat{a} = 2,0069 \text{ мкм}$, а среднеквадратичное отклонение нанесения сетки $\sigma_{i\hat{a}i} = 0,0254 \text{ мкм}$.

Таким образом, с вероятностью $\hat{a} = 0,95$ доверительный интервал исходной базы сетки равен $2 \pm 0,0508 \text{ мм}$, а среднеквадратичное отклонение составило $\pm 2,54\%$.

Установлено, что погрешность при вычислении деформаций состоит из погрешности нанесения сетки $\sigma_{\text{нан}}$ и погрешности измерения $\sigma_{\text{изм}}$. Результаты подвергали статистической обработке. Кривые распределения погрешностей соответствовали нормальному закону распределения. С надежностью $a = 0,95$ доверительный интервал составляет $\hat{a} \pm 2\sigma'_{\hat{e}\hat{c}i}$, где $2\sigma'_{\hat{e}\hat{c}i} = 0,003 \text{ мкм}$.

Для расчета ошибки в вычислении логарифмических деформаций применена формула [3]:

$$\delta_{\dot{a}max} = \pm \left(\sigma_{\dot{\epsilon}ci} / \dot{a} + \sigma_{i\dot{a}i} / \dot{a}_0 \right) \quad (5),$$

а для оценки вероятной относительной погрешности

$$\delta_{\dot{a}} = \pm \sigma_{\dot{\epsilon}ci} \cdot \sqrt{1/\dot{a}^2 + \left(\sigma_{i\dot{a}i} / \sigma_{\dot{\epsilon}ci} \right)^2} \sqrt{1/\dot{a}_0^2} \quad (6)$$

где a_0 и a - база сетки до и после деформирования.

В результате вычислений получили, что относительная линейная погрешность в направлении X и Y составила соответственно $\delta_{\dot{a}max}^{\delta} = 2,65\%$; $\delta_{\dot{a}max}^y = 2,84\%$.

Вероятная относительная погрешность в направлении X и Y равна соответственно $\delta_{\dot{a}}^{\delta} = 2,54\%$; $\delta_{\dot{a}}^y = 2,55\%$.

Таким образом, вероятная относительная погрешность в вычислении деформаций не превышает 2,55%.

Выводы

Проведенные исследования формоизменения в закрытых разрезных калибрах методом конечных деформаций показали, что использование рассмотренной методики позволяет повысить точность технологических расчетов параметров прокатки балочных профилей. Полученные результаты могут быть полезны при теоретическом анализе формоизменения для построения поля скоростей (перемещений), а также при проектировании калибровок прокатных валков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жадан В.Т. Пластическая деформация металлов и сплавов / В.Т. Жадан, В.А. Шпаков // Сб. науч. тр. № 130. – М.: Металлургия, 1981. – С. 39 – 44.
2. Смирнов-Аляев Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский. – Л.: «Машиностроение», 1972. – 395 с.
3. Ренне И.П. О точности нанесения и измерения делительных сеток, используемых при изучении деформации / И.П. Рене, М.Н. Цыпина, Л.Г. Юдин // Заводская лаборатория. – 1964. – № 8. – С. 1013 – 1016.

REFERENCES

1. Gadan V.T., Shpakov V.A. Plastic deformation of metals and alloys // Journal of scientific papers, No 130. – Moscow: Metallurgy, 1981. – P. 39 – 44.

2. Smyrnov-Alyayev G.A., Chikidovskiy V.P. Experimental investigations in processing metals by pressure. – Leningrad.:Machinostroenie, 1972. – 395 p.
3. Renne I.P., Супина M.N., Yudin L.G. About accuracy of the fixing and measurements of dividing nets used at studying of the deformation // Factory laboratory. – 1964, No 8. – P. 1013 - 1016.

Медведев В.С., Шпаков В.А., Базарова К.В. Експериментальне дослідження течії металу в балочних калібрах.

Проведено дослідження формозміни металу в закритому розрізному калібрі методом кінцевих деформацій. Отримані розподіли найбільших логарифмічних деформацій та еюра зміни інтенсивності деформацій зрушення у перетині двотаврового профілю при прокатці без чергування обробки фланців. Експериментальні данні використовуються при побудові поля швидкостей та створенні адекватних теоретичних моделей процесів прокатки, що дозволяють удосконалити калібровки прокатних валків та отримувати двотаврові профілі з точними геометричними розмірами.

Ключові слова: двотавровий профіль, розрізний калібр, деформація, інтенсивність деформацій, калібровка валків.

Medvedev V.S., Shpakov V.A., Bazarova K.V. Experimental investigation of the flowing metal in the beam calibers.

The purpose of this work is investigation of form changing of metal in closed cut beam calibers by a finite deformation method that allows obtaining more precise results in compare with preceding research works and provides the quite reliable data concerning form changing of metal at rolling.

The form changing of metal in closed cut beam calibres has been investigated by a finite deformation method. The distributions of the greatest logarithmic deformations and epure of changing the intensity of shear deformations by section of I-beam profile at rolling have been obtained without alternation of processing of flanges.

The regularities of metal flow in the beam calibres and experimental data are recommended for construction of the velocity field and development of adequate theoretical models of rolling processes that allowing to improve calibrations of forming rolls and production of I-beam profiles with precise geometrical dimensions.

Key words: I-beam profile, cut caliber, deformation, intensity of deformation, calibration of forming roll.

Медведев В.С - д.т.н., главный научный сотрудник ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», г. Харьков.

e-mail: MBC1642@ukr.net

Шпаков В.А. – к.т.н., доцент кафедры машин металлургического комплекса и прикладной механики, ДонГТУ, г. Алчевск.

Базарова Е.В. – ассистент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, ДонГТУ, г. Алчевск.

e-mail: katy8007@i.ua