

В.А. Шпаков, Донбаський державний технічний університет

К.В. Базарова, Донбаський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНЕННЯ В ЗАКРИТОМУ РОЗРІЗНОМУ КАЛІБРИ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ДЕФОРМАЦІЙ

В.А. Шпаков, К.В. Базарова

Дослідження формозмінення в закритому розрізному калібрі методом кінцевих деформацій

Проведено дослідження формозмінення металу в закритому розрізному калібрі методом кінцевих деформацій. Отримані результати можуть бути корисними для аналізу та вдосконалення калібровок прокатних валків, а також для побудови поля швидкостей.

Ключові слова: калібровка, двотаврова балка, деформація, прокатний валок, розрізний калібр.

В.А. Шпаков, К.В. Базарова

Исследование формоизменения в закрытом разрезном калибре методом конечных деформаций

Проведены исследования формоизменения металла в закрытом разрезном калибре методом конечных деформаций. Полученные результаты могут быть полезны для анализа и усовершенствования калибровок прокатных валков, а также для построения поля скоростей.

Ключевые слова: калибровка, двутавровая балка, деформация, прокатный валок, разрезной калибр.

Одне з основних завдань розвитку прокатного виробництва – забезпечення максимальної економії металу за рахунок зниження відходів на переділах, зменшення допусків на розміри прокатної продукції та розширення випуску економічних профілів. Для рішення цього завдання, поряд з поліпшенням технологічних процесів, оснащенням споруджуваних станів новітнім устаткуванням та апаратурою, необхідно вдосконалити діючі прокатні стани.

Необхідність одержання точних та економічних профілів залишається актуальною й сьогодні. Вирішенню проблеми в галузі вдосконалення технології прокатки та існуючого встаткування сприяє вивчення розподілу деформації металу в перетині сортових профілів.

Відомі дослідження можливості встановлення закономірностей пластичної формозміни при прокатці з чергуванням та без чергування обробки фланців у чорнових балочних калібрах [1]. Під час того дослідження використовувались вихідні заготовки, які було зроблено за допомогою спайки сплавом Вуда окремих свинцевих пластин. Заготовки прокочували на лабораторному стані 360. Після прокатки зразки розпаювали. Дослідження проводили в закритому калібрі, який у лінії прокатки знаходився безпосередньо за другим розрізним калібром. Площа фланців для цих калібрів значно перевищувала площу шийки, а їхнє відношення становило $F_{\text{ф}}/F_{\text{ш}} = 1,75$.

При прокатці коефіцієнт витягування в калібрі становив $\mu = 1,46 - 1,61$ (перше значення відноситься до прокатки з чергуванням, а друге – без чергування обробки фланців), а відношення обтиснень по основі відкритого та закритого фланців дорівнювала $\Delta b_0 / \Delta b_3 = 0,82 - 1,29$.

У цій статті наводяться результати дослідження закритих розрізних калібрів методом кінцевих деформацій, що, незважаючи на деяку неточність у визначенні напруг, дає досить надійні дані по формозміні.

Дослідження проводили в закритому калібрі, що в лінії прокатки розташований безпосередньо за першим розрізним калібром. Профіль валків для прокатки заготовки двотаврової балки відображений на рис. 1. Розрахункова схема розрізного та попереднього для нього калібрів зображені на рис. 2. Площа фланців у цьому випадку незначно перевищує площу шийки, а їхнє відношення становить $F_{\text{ф}}/F_{\text{ш}} = 1,145$.

При прокатці коефіцієнт витягування в калібрі становив $\mu = 1,39$, а відношення обтиснень по основі відкритого та закритого фланців $\Delta b_0 / \Delta b_3 = 0,93$. Вихідна та деформована сітки, отримані при прокатці заготовки в закритому розрізному калібрі, показані на рис. 3.

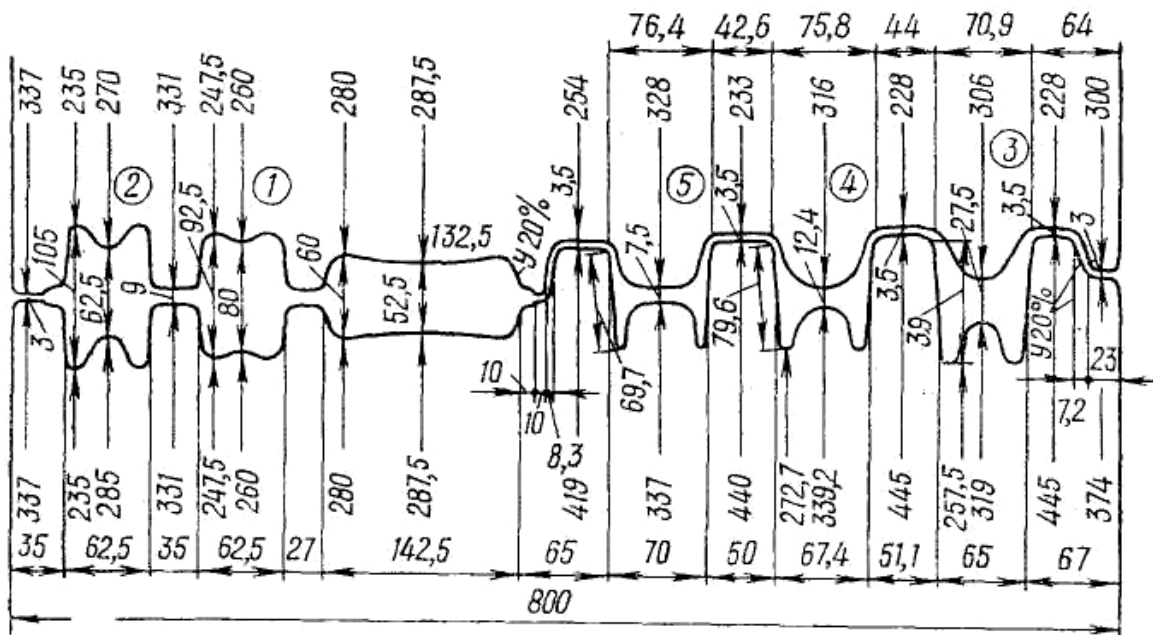


Рис. 1. Профіль валків для прокатки заготовки двотаврової балки

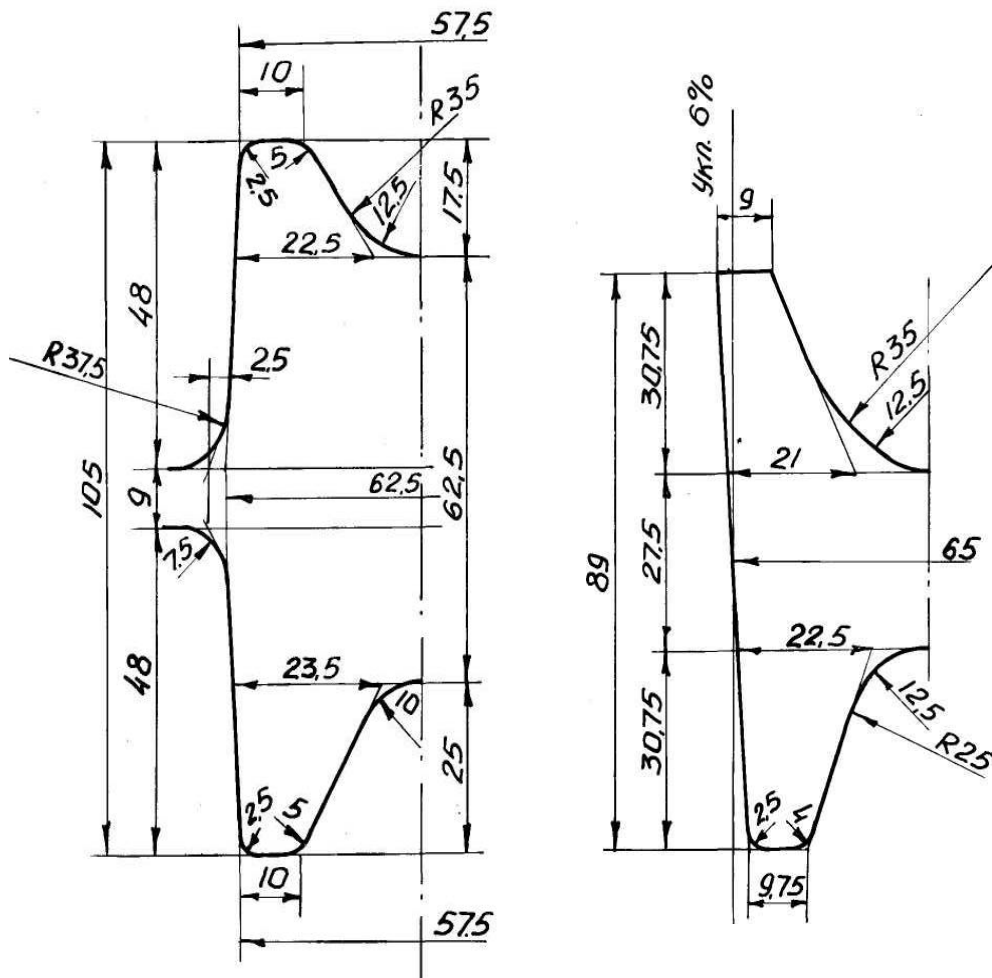


Рис. 2. Розрахункова схема розрізного та наступного для нього калібрів

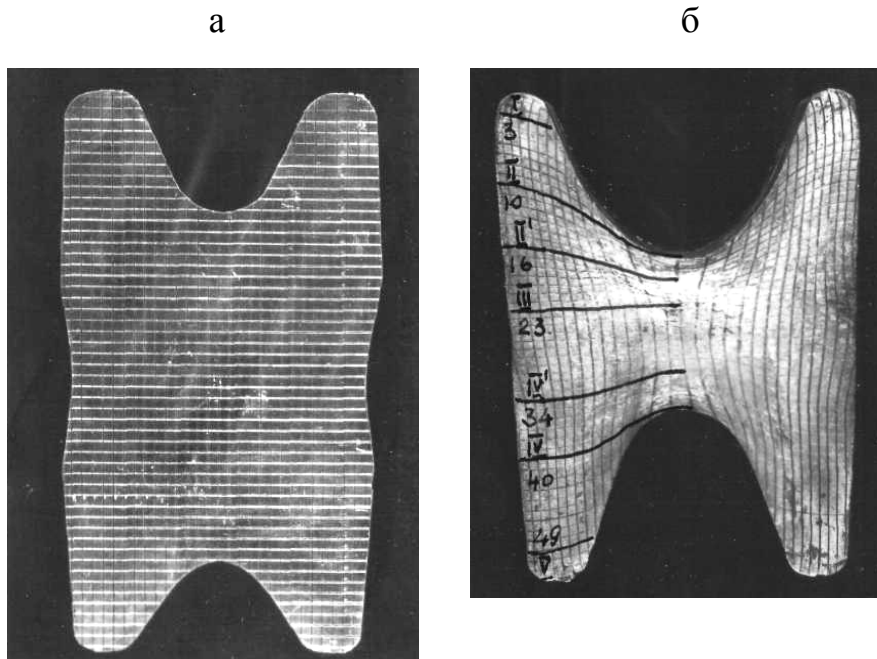


Рис. 3. Деформовані сітки, отримані при прокатці заготовки в закритому розрізному калібрі (а – вихідна заготовка, б – після проходу)

Для дослідження в умовах моделювання реального процесу прокатки [1] вихідні свинцеві заготовки одержували шляхом спайки сплавом Вуда окремих частин довжиною 150 — 170 мм, на торці яких була нанесена координатна сітка з базою $a_0 = 2$ мм. Заготовку прокочували на лабораторному стані 360. Після прокатки зразки розпаювали.

За результатами виміру координат вузлів сітки (рис. 3) обчислювали найбільші логарифмічні деформації ϵ_1 та ϵ_2 за методом Е. Зібеля [2].

На рис. 4 зображені розподіл головних деформацій $\epsilon_{1,2}$ у перетині профілю при прокатці двотаврової балки й схема розташування досліджених точок у перетині смуги. У результаті аналізу кривих (рис. 4, а) були зроблені такі висновки. Заготовка в усьому перетині піддається дії стискаючих напруг. Про це свідчить головна деформація ϵ_1 , що в цьому випадку має негативне значення. Її максимум по модулю розташовується поблизу осі симетрії перетину $n_x=14$ (крива II, рис. 4, а). По ширині профілю ϵ_1 плавно зменшується від $-0,865$ при $n_x = 14$ до $(-0,25 \div -0,335)$ при $n_x = 1 \div 3$. Деякі відмінності мають криві для точок перетину в закритій частині калібру (криві III–V), коли

мінімум ϵ_1 перебуває поблизу середини товщини полки, а потім має місце зростання до зовнішньої грані полиці, що пов'язане з активною дією контактних сил тертя на зовнішній поверхні полиці.

Аналіз деформації ϵ_1 по висоті калібру показує, що в полиці максимальне значення відповідає краю відкритого фланця $\epsilon_1 = -0,36$ (рис. 4, а, крива I). Аналогічні значення мають точки кривих II і III. У фланцевій області перетину ($n_x = 5 \div 11$) максимальне значення ϵ_1 належить кривій II, потім у порядку убутання по висоті профілю лініям III, II', IV, IV'. При $n_x = 11 \div 14$ максимальні значення відповідають лінії II', поступово убутуючи для кривих II, IV', IV, III. Мінімальні значення відповідають кривій IV' і краю закритого фланця $-0,18$ (рис. 4, а, крива V). Проміжні значення деформації ϵ_1 у полиці відповідають перетинам під фланцевою областю шийки профілю $n_x = 3 \div 7$ (рис. 4, а).

На рис. 4, в показаний розподіл головних деформацій ϵ_2 по ширині в перетині профілю. У результаті вивчення кривих ϵ_2 можна дійти висновку, що деформація змінює знак. Так, область значень зі знаком «мінус» (стиск) відповідає закритому фланцю (криві IV, V) і тим областям металу, що прилягають до зовнішньої грані полиці (криві I, II', III) відкритого фланця. Область значень зі знаком „мінус” ϵ_2 перебуває в областях з відносно малою деформацією, для яких характерним є втягування (закритий фланець та область зовнішньої грані полки).

Область позитивних значень ϵ_2 розташовується у відкритому фланці та в шийці. У позитивній області ϵ_2 по модулю значно перевищує всі величини ϵ_2 , що належать області значень зі знаком „мінус”. Наприклад, для кривої II' $\epsilon_2 = +0,8$ та $\epsilon_2 = -0,15$ відповідно. Ця обставина становить інтерес через наявність найбільшої нерівномірності деформацій при прокатці в розрізному калібрі.

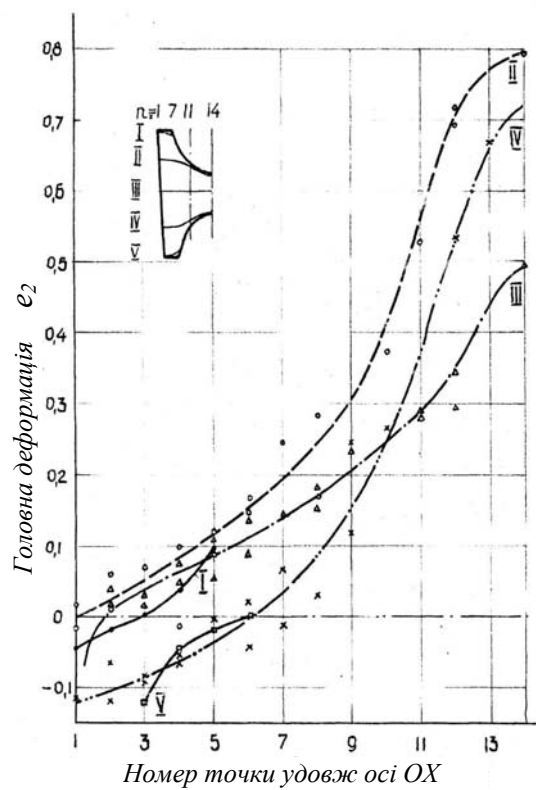
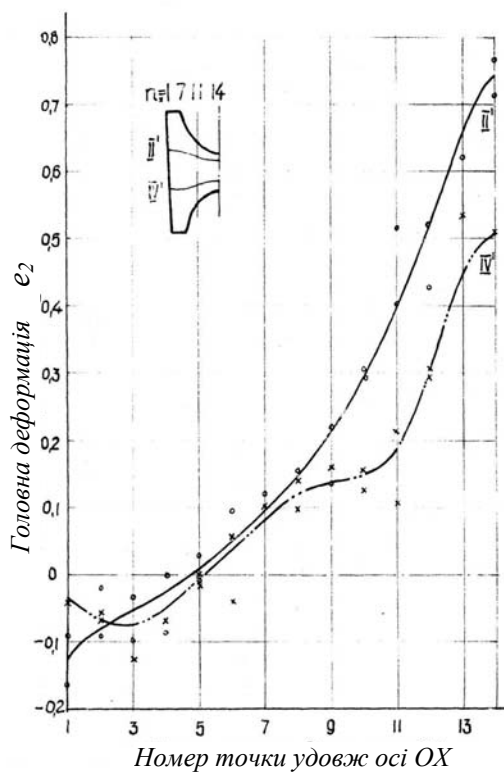
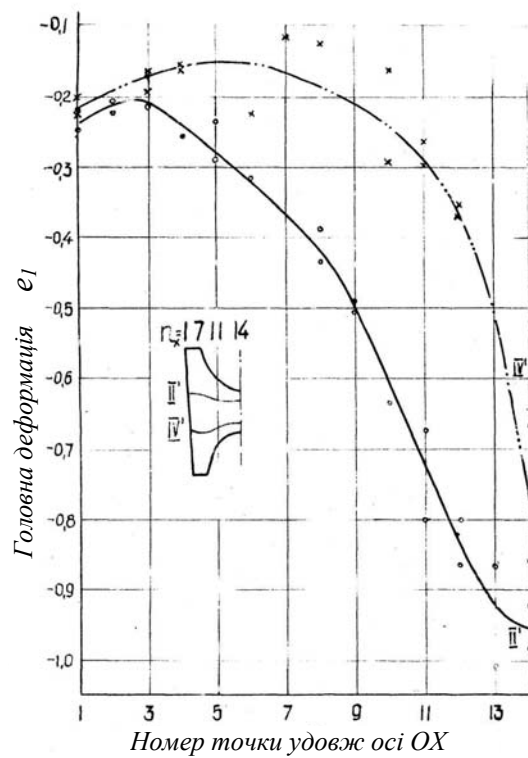
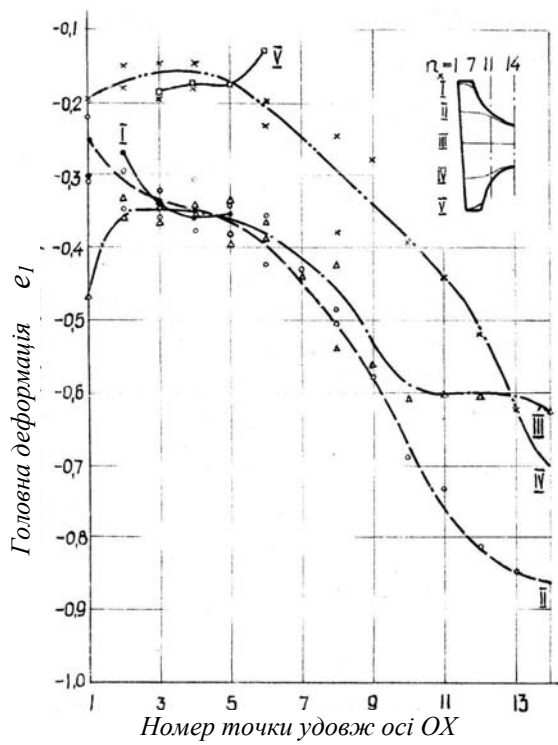


Рис. 4. Розподіл головних деформацій $e_{1,2}$ по перетину профілю балки

Максимальне значення e_2 розташовується на осі симетрії калібру. По ширині калібру від середини до зовнішньої грані полиці деформація e_2 зменшується (рис. 4, в). Мінімальні значення e_2 відповідають області поблизу зовнішньої грані полки та області краю закритого фланця.

По висоті профілю зміна e_2 носить наступний характер. Максимальні значення e_2 при $n_x = 12 \div 14$ (у шийці) відповідають кривій II, мінімальні – кривій IV'. Таким чином, спостерігається зменшення деформації e_2 по товщині шийки від гребенів до осі симетрії. При цьому мінімум відповідає точкам металу поблизу відкритого гребеня. Що стосується області металу поблизу закритого гребеня, то там значення e_2 нижче.

У фланцевій області профілю $n_x = 1 \div 8$ максимальні значення e_2 належать кривій II, а також середині товщини шийки (крива III) і краю відкритого фланця (крива I). Мінімальні значення по висоті належать кривим IV, V (область металу поблизу закритого гребеня та по краю закритого фланця відповідно).

Зазначимо, що при прокатці в закритому розрізному калібрі деформації e_1 в шийці при $n_x = 11 \div 14$ дорівнюють за модулем деформаціям e_2 (абсолютні значення їх приблизно рівні). Цей факт говорить про перевищення розширення за рахунок поперечного розтягання шийки. Крім того, різниця деформацій $|e_1| - |e_2|$ зростає до середини товщини шийки. Таким чином, максимальне розширення спостерігається в приконтактних шарах металу, мінімальне – на середині шийки по товщині.

Значення e_1 у зоні осі симетрії поблизу гребенів трохи менше, ніж у шарах металу, розташованих між серединою по товщині шийки та гребенями. Це свідчить про наявність зони утрудненої деформації під гребенями.

Значення e_1 при $n_x = 1 \div 6$, де e_2 має значення зі знаком „мінус”, становить $-0,15 \div -0,35$, а їм відповідає $e_2 = 0 \div -0,13$. Як ми вже відзначали, знак „мінус” відповідає областям з найбільшою деформацією стиску. Тому

можна стверджувати, що причиною появи знака „мінус” деформації e_2 є стиск у напрямку осі e_2 . Коефіцієнт утягування виникає в тому ж випадку, коли за рахунок обсягів металу, які витримують більший обтиск, компенсується середня витяжка в тих обсягах, що менш обтискаються.

На основі визначенних у площині виміру за методом Зібеля найбільших логарифмічних деформацій осі e_1 та e_2 обчислювали інтенсивність деформацій зрушення Γ_k за формулою:

$$\Gamma_k = 2\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1e_2} , \quad (1)$$

яка враховує умову нестисливості.

Епюра зміни параметра Γ_k у перетині смуги зображена на рисунку 5. Інтенсивність деформації зрушення виходить максимальною при $n_x = 12 \div 14$ поблизу осі симетрії профілю (епюри II, IV, III). При видаленні по ширині калібру від осі симетрії та зовнішньої поверхні полиці значення Γ_k зменшується та при $n_x = 5 \div 6$ досягає мінімального значення. Для шарів металу, розташованих поблизу відкритого гребеня, при $n_x = 14$ значення Γ_k більше, ніж у закритого гребеня, на 24%.

У фланцевій області більші значення інтенсивності деформацій зрушення відповідають шарам металу, що прилягає до гребенів (епюри II, VI, III). В області фланців відкритого гребеня спостерігається випередження металу, тобто більші швидкості плину.

Як відомо, інтенсивність деформацій зрушення Γ_k характеризує питому роботу формозміни, тому її підвищеному значенню вздовж контуру відкритого гребеня відповідає більша робота формозміни, чим уздовж контуру закритого гребеня. Це виражається підвищенням обтисненням верхнього гребеня порівняно із закритим. Більше роботи витрачається на формозміну гребенями при деформації фланців по товщині. Причому, по висоті полиці значення Γ_k зменшується від середини до краю відкритого фланця.

Таким чином, інтенсивність деформацій зрушення нерівномірна в перетині смуги. Деформацію можна вважати рівномірною, якщо в кожній

точці тіла, що деформується, тензори деформацій рівні, тобто рівні відповідні компоненти та зберігається їхній напрямок. Тоді будуть рівні й інші інваріанти девіатора деформацій.

Нерівномірність деформацій можна оцінити різницею між максимальною та мінімальною інтенсивністю деформацій зрушення по перетину смуги. Для зручності зіставлення двох схем прокатки можна використати усереднену по перетину величину нерівномірності деформації θ , що приймемо за критерій при оцінці нерівномірності деформацій зрушення:

$$\theta = \frac{(\Gamma_{\max} - \Gamma_{\min})}{\Gamma_{\text{cp}}} \quad (2)$$

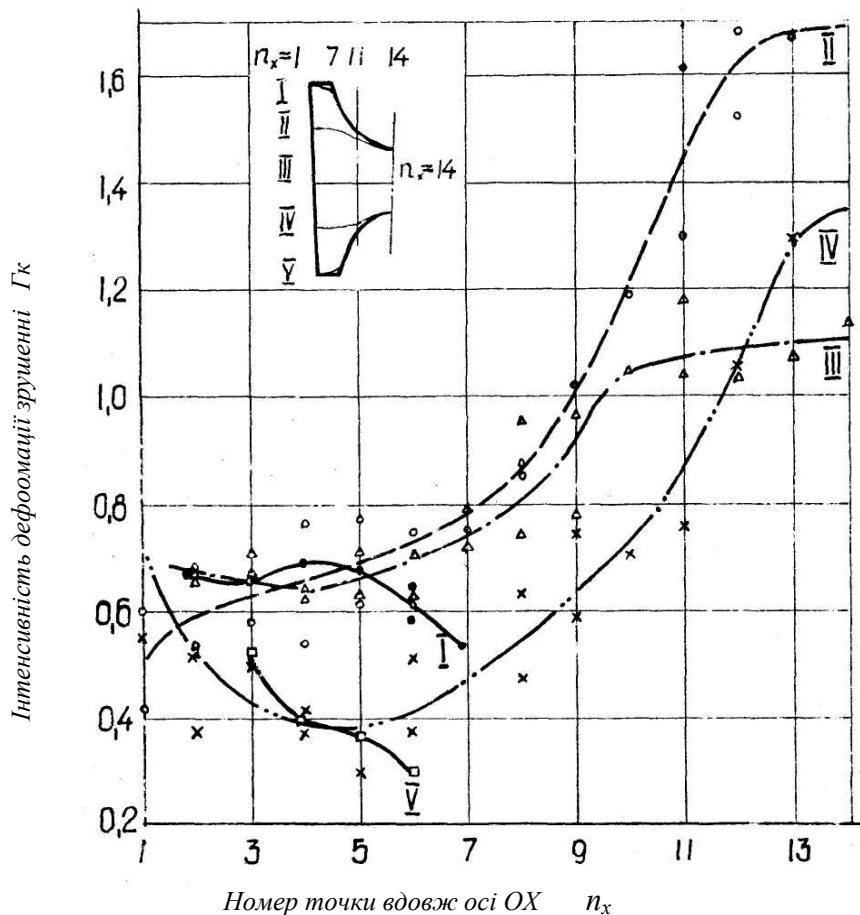


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформацій зрушення Γ_k по перетину смуги при прокатці двотаврової заготовки

Запропонований критерій, що враховує максимальну й мінімальну величину Γ_k , досить чутливий до зміни нерівномірності деформацій.

Для рівномірної деформації критерій $\theta = 0$. У цьому випадку він вийде рівним $(1,7 - 0,3)/0,96 = 1,46$. Для випадку, що описаний на початку статті, критерій нерівномірності деформації був рівним $(1,34 \div 0,54)/0,86 = 0,99$.

Для оцінки точності координатної сітки відбувався багаторазовий вимір точок двох координатних сіток на інструментальному мікроскопі УІМ-21 зі збільшенням 30 у подовжньому та в поперечному напрямках. У результаті отриманих даних з'ясувалося, що розподіл погрішностей відповідає нормальному закону розподілу. Обчислене генеральне середнє випадкової величини склало $a = 2,0069$ мм, а середньоквадратичне відхилення нанесення сітки $\sigma_{\text{нан}} = 0,0254$ мм.

Таким чином, з імовірністю $a = 0,95$ довірчий інтервал вихідної бази сітки дорівнює $2 \pm 0,0509$ мм, а середньоквадратичне відхилення склало $\pm 2,54\%$.

Було встановлено, що погрішність при обчисленні деформацій складається з погрішності нанесення сітки $\sigma_{\text{нан}}$ і погрішності виміру $\sigma_{\text{вимір}}$ [3]. Результати піддавали статистичній обробці. Криві розподілу погрішностей відповідали нормальному закону розподілу. З надійністю $a=0,95$ довірчий інтервал становить $a \pm 2\sigma_{\text{вимір}}'$, де $2\sigma_{\text{вимір}}' = 0,003$ мм.

Для розрахунку помилки в обчисленні логарифмічних деформацій застосована формула [3]:

$$\delta_{e_{\text{max}}} = \pm \left(\frac{\sigma_{\text{вимір}}}{a} + \frac{\sigma_{\text{нан}}}{a_0} \right), \quad (3)$$

а для оцінки ймовірної відносної погрішності

$$\delta_e = \pm \sigma_{\text{вимір}} \cdot \sqrt{\frac{1}{a^2} + \left(\frac{\sigma_{\text{нан}}}{\sigma_{\text{вимір}}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{a_0^2}}, \quad (4)$$

де a_0 і a — база сітки до та після деформування.

Відносна лінійна похибка в напрямку X та Y :

$$\delta_{e_{\max}}^x = \pm \left(\frac{0,003}{2,77} + \frac{0,0508}{2,0} \right) = 0,0265;$$

$$\delta_{e_{\max}}^y = \pm \left(\frac{0,003}{0,98} + \frac{0,0508}{2,0} \right) = 0,0284;$$

тобто $\delta_{e_{\max}}^x = 2,65\%$; $\delta_{e_{\max}}^y = 2,84\%$.

Імовірна відносна похибка дорівнює:

$$\delta_e^x = \pm 0,003 \sqrt{\frac{1}{2,77^2} + \left(\frac{0,0508}{0,003} \right)^2} \frac{1}{2^2} = 0,0254 \quad (2,54\%);$$

$$\delta_e^y = \pm 0,003 \sqrt{\frac{1}{0,98^2} + \left(\frac{0,0508}{0,003} \right)^2} \frac{1}{2^2} = 0,0255 \quad (2,55\%).$$

Таким чином, імовірна відносна погрішність в обчисленні деформацій не перевищує 2,55%.

Отримані результати можуть бути корисні при теоретичному аналізі формозміни для побудови поля швидкостей (переміщень), а також при проектуванні калібровок прокатних валків.

Література

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

V.A. Shpakov, K.V. Bazarova

Research of form changing in a closed slitting pass by a method of final deformations

The researches of form changing of metal in closed slitting pass by a method of final deformations are carried out. The received results can be useful for the analysis and improvement of roll pass design, as well as for making a field of speeds.

Key words: roll pass design, I-beam, deformation, roll, slitting pass.

Відомості про авторів

Шпаков Віктор Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри „Машини і механізми металургійного комплексу” Донбаського державного технічного університету.

Базарова Катерина Володимирівна – асистент кафедри „Нарисна геометрія і інженерна графіка” Донбаського державного технічного університету.