

0,34 мм, а первого номера – только 0,2 мм. Такое различие в характере их износа можно объяснить увеличением подката из-за выработки черновых калибров блока. При прокатке в первых номерах (рис. 3) металл прокатывался на относительно новых валках первых семи клетей, а ко вторым номерам чистовых калибров металл поступал после деформации в черновых калибрах с несколько искаженной геометрией по причине их износа. Следует также подчеркнуть, что различие в износе верхнего и нижнего ручьев у валков 8–10 клетей практически незаметно, а микрорельеф их поверхности после кампании работы оставался гладким без заметных изъянов и осповидности (рис. 3).

Выводы. Разработана новая методика измерения износа ручьев калибров валков, позволяющая получить объемную картину выработки поверхности. Предлагаемая методика применима для изучения характера и количества износа в калибрах чистового проволочного блока. Глубина износа калибров по клетям проволочного блока распределена неравномерно и зависит в наибольшей степени от распределения среднего давления по клетям. При прокатке катанки диаметром 5,5 мм наиболее подвержены выработке калибры четвертой и пятой клетей. Разница в величине износа чистовых калибров, стоявших вначале кампании черновых калибров, говорит о том, что по мере выработки ручьев первых калибров блока изменяются условия прокатки и в последующих за ними клетями. На поверхности ручьев калибров первых двух клетей видна сетка термического износа и следы абразивного и осповидного износа. Выработанная поверхность остальных клетей остается гладкой, осповидность их практически отсутствует. Характер износа шестой клетки свидетельствует о сваливании раската.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мур Д. Основы и применение трибоники / Д. Мур; перевод с английского канд. Физ.-мат. наук С. А. Харламова под редакцией д-ра техн. Наук, проф. И. В. Крагельского и канд. техн. наук Г. И. Трояновского. – М. : Мир, 1978. – 487 с.
2. Максименко О. П. Методика и результаты исследования износа калибров валков при прокатке катанки в проволочном блоке / О. П. Максименко, К. К. Марченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2018. – № 2. – С. 20–24.
3. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин / Б. И. Костецкий. – М. : Машгиз, 1959. – 478 с.

УДК 621.771.22:539.3:001

ПАЛАМАР Д. Г., м.н.с
ВОРОБЕЙ С. О., д.т.н., с.н.с.
СРШОВ С. В.¹, д.т.н., профессор
РАЗДОБРЕСВ В. Г., к.т.н., с.н.с.
ПРИХОДЬКО І. Ю., д.т.н., с.н.с.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, Україна
¹Уханський Університет науки і технології, м. Ухань, Китай

РОЗРОБКА СПРОЩЕНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ЦЕНТРАЛЬНИХ ЗОН ПЕРЕРІЗУ РОЗКАТУ З БЕЗПЕРЕРВНОЛІТОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПРОКАТЦІ У КАЛІБРАХ

Вступ. Найважливішим напрямком розвитку чорної металургії є перехід на технологію безперервного розливання сталі, що дозволяє зменшити витрати металу і енерговитрати на одиницю готової продукції. При будівництві нових сортових і дротових

станів найбільш економічним рішенням є об'єднання машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) з прокатним станом в єдиний комплекс. Залежно від типу стану і сортаменту продукції розміри перерізу безперервнолитих заготовок складають від 150×150 до 280×280 мм, а в деяких випадках і більше.

Інша картина спостерігається при переведенні діючих сортопрокатних станів на застосування безперервнолитих заготовок (БЛЗ). Ці стани були спроектовані і встановлені в 60–70 роках минулого століття на цілому ряді металургійних комбінатів (Західно-Сибірський, Челябінський, Череповецький, Криворізький та ін.) [1]. Розмір вихідних катаних заготовок на більшості цих станів становить від 80×80 до 125×125 мм. Внаслідок того, що катані заготовки мають високу ступінь деформаційного опрацювання центральної зони за рахунок прокатки на обтискних і заготовочних станах, зазначені розміри поперечного перерізу заготовок забезпечують отримання якісного готового прокату. Безперервнолиті заготовки характеризуються, як правило, гіршими показниками макроструктури (більш високими балами центральної пористості, осьової ліквіації, загальної пористості). Тому, застосування безперервнолитих заготовок такого ж перерізу, як катаних, не забезпечує отримання високої якості готового прокату.

Під час деформації лита структура спочатку руйнується, а потім відбувається процес ущільнення металу [2]. Дефекти у вигляді внутрішніх несучільностей поступово зменшуються, внутрішні поверхні дефекту зближуються один з одним і заварюються. Чим більше обтиснення, тим ефективніше усунення внутрішніх несучільностей. Оскільки найбільші несучільності зосереджені в центральній зоні, забезпечення проникнення деформуючого зусилля в центральну частину заготовки і величина обтиснення, яка створюються в цій зоні, мають вирішальне значення.

В даний час можливості вчених значно розширилися за рахунок розробки сучасних методів розрахунку напружено-деформованого стану металу, наприклад методу кінцевих елементів (МКЕ). З'явилася можливість відмовитися від припущень, які спрощуються, таких як гіпотеза плоских перерізів і рівномірність температур по перерізу. З'явилася можливість аналізу не спрощених схем деформації, а схем, які реально використовуються на металургійних підприємствах. Це дозволяє виконувати досить докладні дослідження, які знаходять своє застосування в промисловості. Приклад такого підходу можна побачити в роботі [3].

Постановка задачі. У зв'язку з тим, що розрахунки МКЕ мають велику тривалість в роботі поставлено за мету розробити спрощений метод оцінки опрацювання центральних зон перерізу розкату з безперервнолитої заготовки, який би дозволив звужити область подальшого пошуку оптимального рішення для кожної схеми виробництва прокату в калібрах.

Результати роботи. В якості базового нами прийнятий метод, запропонований в роботах [4, 5] для умов прокатки в валках з гладкою бочкою. В роботі [4] проаналізовані різні теорії для визначення пластичного деформування всього перерізу розкату. На основі прикладу прокатки штаби розмірами 1000×200 мм при діаметрі валків 1000 мм авторами роботи [4] було показано, що деформація стиснення (проникаюча деформація) досягає центральної зони перерізу штаби при відносному стисненні від 0,32 до 0,57. На підставі власних експериментальних досліджень ними були отримані вирази для визначення проникаючої деформації.

За результатами досліджень, які наведені в роботах [4, 5], зміна відносного нормального напруження по висоті осередку деформації при стисненні прямокутної призматичної заготовки в гладких валках визначається по залежності

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_z^i} = e^{-f \frac{h_0}{R_r} (1-\varepsilon)^2 \left(1 - \frac{2z}{h_0}\right)}, \quad (1)$$

де z – вертикальна координата; σ_z – нормальне напруження в глибині осередку деформації; σ_z^i – нормальне напруження в осередку деформації під інструментом; f – коефіцієнт тертя; R_r – умовний гідравлічний радіус, що дорівнює відношенню площі контактної поверхні осередку деформації (F_k) до його периметру (Π) без урахування розширення.

В цьому випадку $F_k = b_0 \sqrt{h_0 \varepsilon R}$, $\Pi = 2(b_0 + \sqrt{h_0 \varepsilon R})$ і, відповідно, умовний гідравлічний радіус дорівнює

$$R_r = \frac{b_0 \sqrt{h_0 \varepsilon R}}{2(b_0 + \sqrt{h_0 \varepsilon R})} \quad (2)$$

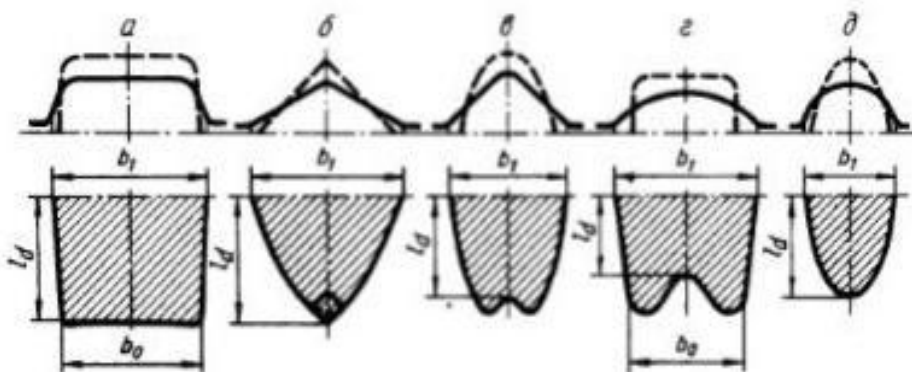
Вертикальна координата z задається від поздовжньої осі осередку деформації, тому вираз (1) для самої осі набуде вигляду

$$\frac{\sigma_{z=0}}{\sigma_z^i} = e^{-f \frac{h_0}{R_r} (1-\varepsilon)^2}. \quad (3)$$

Слід зазначити, що розглянутий вище метод визначення поширення пластичної деформації стиснення розроблений для випадку гарячої прокатки в гладких валках, тобто він не враховує реальну форму калібрів.

Відповідно до цього методу необхідно визначити величину умовного гідравлічного радіусу (R_r) при прокатці в калібрах з урахуванням фактичного розширення металу.

При прокатці в калібрах простої форми в разі рівності діаметрів обох валків, що катають процес деформації відбувається симетрично, контактні поверхні на обох валках будуть однакові [6]. На рис. 1 показана форма горизонтальної проекції контактної поверхні при прокатці в деяких системах калібрів.



а – прямокутник-ящиківий калібр; б – квадрат-ромб (ромб-ромб, ромб-квадрат);
в – овал-квадрат; г – квадрат-овал; д – овал-круг

Рисунок 1 – Форма горизонтальної проекції контактної поверхні при прокатці в різних системах калібрів

У ящикових калібрах (рис. 1, а) форма контактної поверхні близька до рівнобічної трапеції з основами b_0 і b_1 та висотою, що дорівнює довжині осередку деформації по дну калібру l_d . При прокатці в системах калібрів ромб-квадрат, ромб-ромб (рис. 1, б) контактна поверхня має форму рівнобедреного трикутника з основою і опуклими похилими сторонами, причому в залежності від радіусів закруглення кутів калібру і заготовки вершина контактної поверхні може бути гострою, плоскою або злегка увігнутою.

Форма контактної поверхні при прокатці в квадратному калібрі овальної заготовки показана на рис. 1, в. Увігнутість контуру контактної поверхні за місцем, відповідному вершині калібру, буде тим більше, чим більше притуплення овальної заготовки, що задається. При прокатці в овальному калібрі квадратної заготовки в вершині калібру мають місце мінімальне обтиснення і мінімальна довжина осередку деформації l_d , що обумовлює отримання контактної поверхні, форма якої показана на рис. 1 г.

В овальних і круглих калібрах при стисненні овальних заготовок контактна поверхня має обриси напівеліпсу з малою віссю b_1 і великою піввіссю l_d (рис. 1 д).

Площа горизонтальної проекції контактної поверхні для розглянутих систем калібрів досить точно визначається за формулами В.Г. Дрозда, отриманим аналітичним методом

$$F_k = 0,67b_1l_d \text{ (ромб-ромб, ромб-квадрат, квадрат-ромб);}$$

$$F_k = 0,75b_1l_d \text{ (овал-квадрат, овал-овал, овал-круг, круг-овал);}$$

$$F_k = 0,54(b_0 + b_1)l_d \text{ (квадрат-овал).}$$

У літературі є більш точні формули для визначення площі контактної поверхні, наприклад, які запропоновані в роботі [7], які дозволяють врахувати вплив відносини осей калібру і заготовки, ступінь заповнення калібру та інші фактори.

На основі конфігурації контактної поверхні при прокатці в різних системах калібрів нами були отримані вирази (табл. 1) для визначення умовного гідравлічного радіусу (R_r) (параметр, що входить у вирази 1 та 3).

Таблиця 1 – Вирази для визначення умовного гідравлічного радіусу (R_r) при прокатці в різних системах калібрів

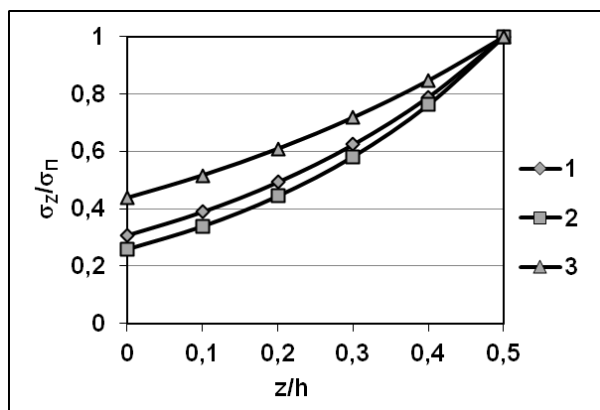
Система калібрів	Умовний гідравлічний радіус (R_r)
Прямокутник-ящиківий калібр	$R_r = \frac{0,5\sqrt{H_0\varepsilon R}(B_0 + B_1)}{\left(B_0 + B_1 + 2\sqrt{[0,5(B_1 - B_0)]^2 + (\sqrt{H_0\varepsilon R})^2} \right)}$
Ромб-квадрат (квадрат-ромб)	$R_r = \frac{0,67\sqrt{H_0\varepsilon R} \cdot B_1}{\left(B_1 + 2\sqrt{\left(\frac{B_1}{2}\right)^2 + (\sqrt{H_0\varepsilon R})^2} \right)}$
Овал-круг (квадрат, ребровий овал) (круг-овал)	$R_r = \frac{0,75\sqrt{H_0\varepsilon R} \times B_1}{B_1 + \pi\sqrt{0,5\left[(\sqrt{H_0\varepsilon R})^2 + \left(\frac{B_1}{2}\right)^2 \right]}}$
Квадрат – овал	$R_r = \frac{0,54\sqrt{H_0\varepsilon R}(B_0 + B_1)}{\left(B_0 + B_1 + 2\sqrt{[0,5(B_1 - B_0)]^2 + (\sqrt{H_0\varepsilon R})^2} \right)}$

Приклади результатів розрахунків відносного нормального напруження по формулі (3) з урахуванням параметра R_f представлені на рис. 2 і 3. Розрахунки виконані для умов прокатки квадратної заготовки перерізом 160×160 мм в гладких валках, ящиковому і овальному калібрах.

На рис. 2 показано розподіл відносини нормального напруження в поверхневих шарах до нормального напруження в поточній точці по висоті осередку деформації (σ_z/σ_n) при ступені деформації в валках з гладкою бочкою (розрахунок за базовим методом) і по вершині калібрів 20 %.

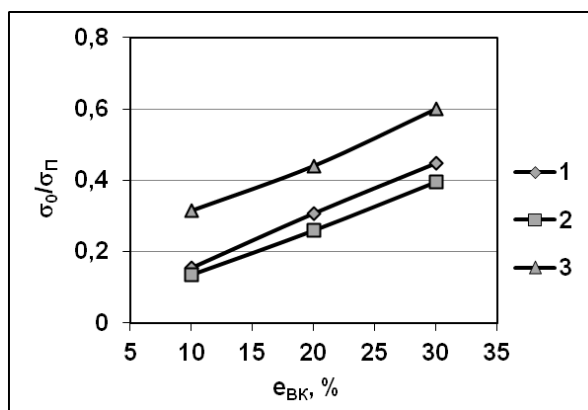
На рис. 3 показана залежність відносини нормального напруження в поверхневих шарах до нормального напруження в осьовій зоні розкату (σ_0/σ_n) в залежності від ступеня деформації по вершині калібру.

За даними роботи [5] для отримання однорідної структури і механічних властивостей по висоті готової металопродукції необхідно, щоб напруження в глибині деформованого металу істотно не відрізнялося від напруження під технологічним інструментом. З цієї точки зору найбільш сприятливим є випадок деформації квадратної заготовки в однорадіусному овальному калібрі (див. рис. 2 і 3).



1 – гладка бочка (базовий метод);
2 – ящиковий калібр; 3 – овальний калібр

Рисунок 2 – Розподіл відносного нормального напруження по висоті осередку деформації при ступені деформації у валках с гладкою бочкою і по вершині калібрів 20 %



1 – гладка бочка (базовий метод);
2 – ящиковий калібр; 3 – овальний калібр

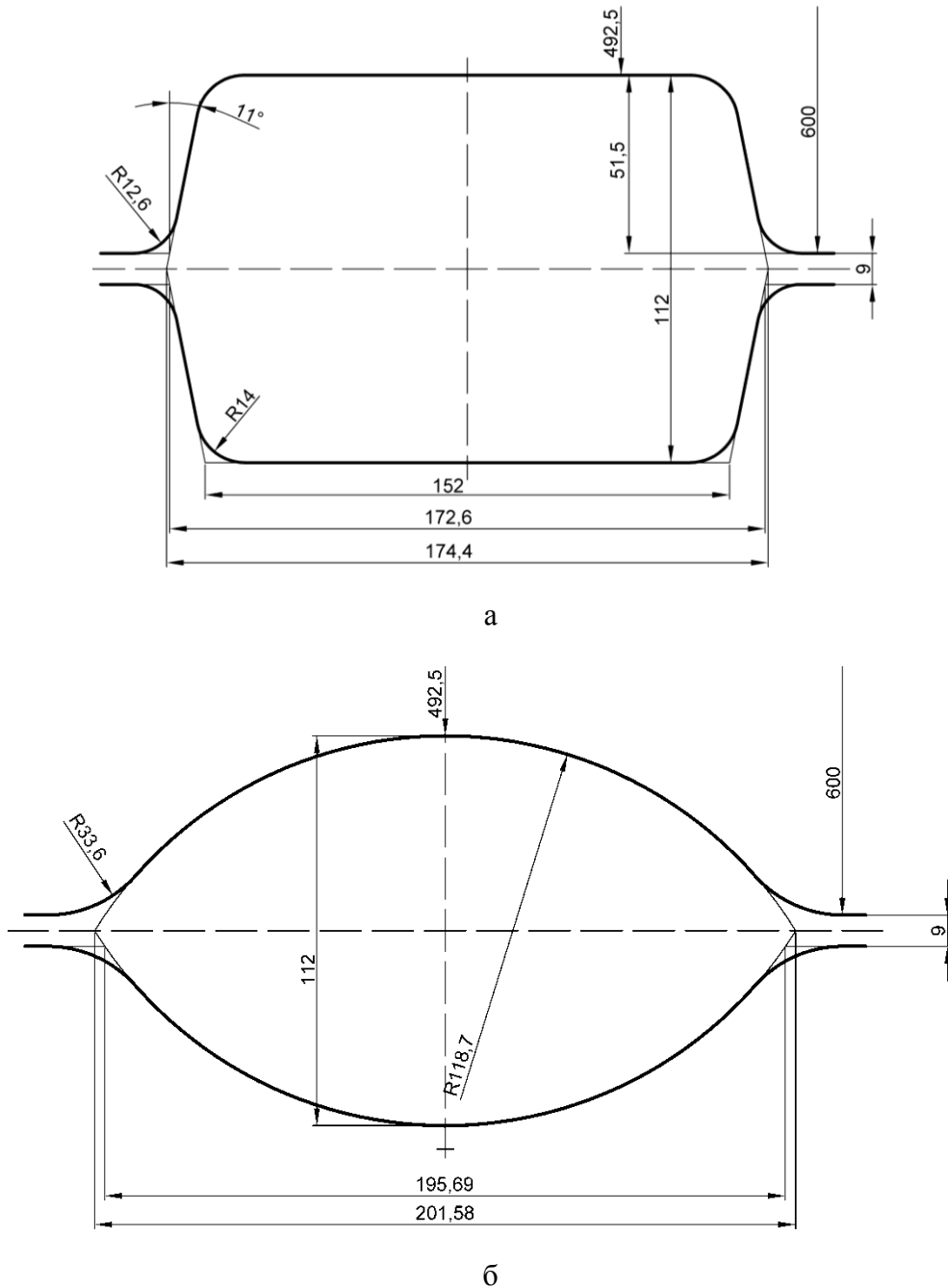
Рисунок 3 – Залежність відносини нормального напруження у поверхневих шарах до нормального напруження в осьовій зоні розкату в залежності від ступеню деформації

З метою перевірки можливості застосування розробленого спрощеного методу оцінки опрацювання центральних зон перерізу розкату, з використанням програми ESVDEFORM, були виконані розрахунки напружено-деформованого стану металу при прокатці квадратної заготовки (160×160 мм) в валках з гладкою бочкою, ящиковим і овальним калібром (рис. 4). Матеріал заготовки – сталь марки Ст 3сп, температура заготовки 1100 °С, швидкість прокатки 0,5 м/с. Розрахунки виконані для трьох значень ступеня деформації по вершині калібру – 10, 20 і 30 %. Діаметр валків по буртам 600 мм. Результати розрахунку розподілу ступеня деформації по перетину розкату наведені на рис. 5–7. Розрахунки враховують зсувну деформацію.

Найбільші значення ступеня деформації в центральній зоні розкатів у всьому дослідженому діапазоні ступенів деформації по вершині калібрів досягаються в валках з

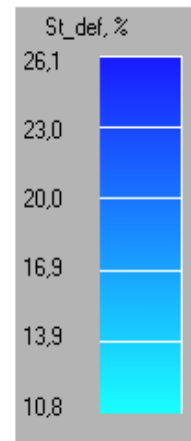
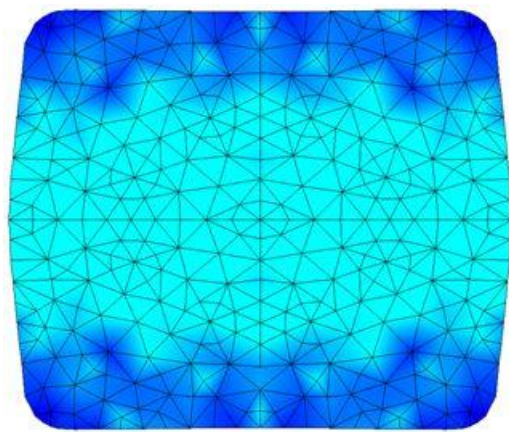
овальним калібром. Значення ступеня деформації в центральній зоні розкатів при прокатці в валках з гладкою бочкою трохи вище, ніж в ящиковому калібрі.

На рис. 8 показана залежність розрахункових значень ступеня деформації центральної зони розкатів від співвідношення нормальних напружень на поверхні і в центральній зоні розкатів, розрахованого за розробленим спрощеним методом. Наведені дані показують, що розроблений спрощений метод можна застосовувати для попереднього орієнтовного визначення параметрів калібрів і ступеня деформації, що забезпечують більш високу ступінь деформаційного опрацювання прокату. Однак для уточнених розрахунків необхідно застосовувати програми, засновані на МКЕ.

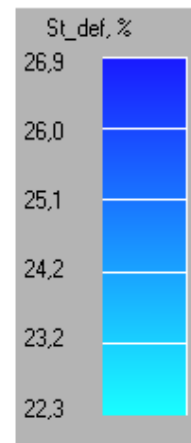
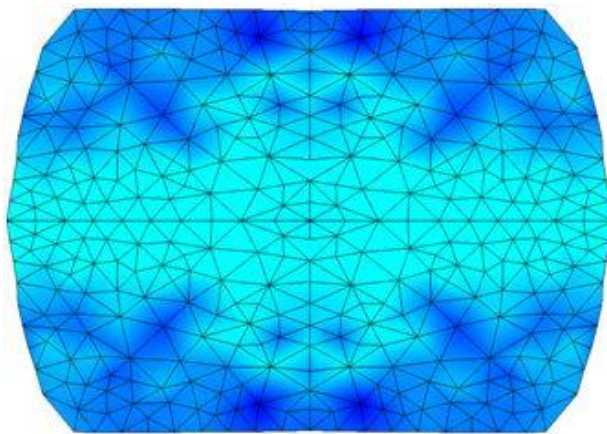


а – ящиковий калібр; б – овальний калібр

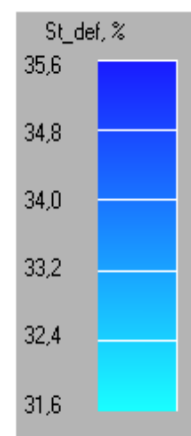
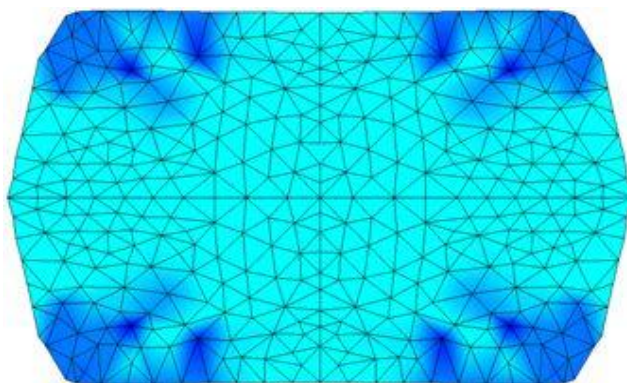
Рисунок 4 – Схеми калібрів



а



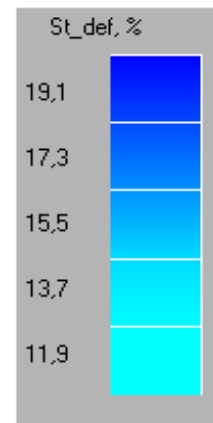
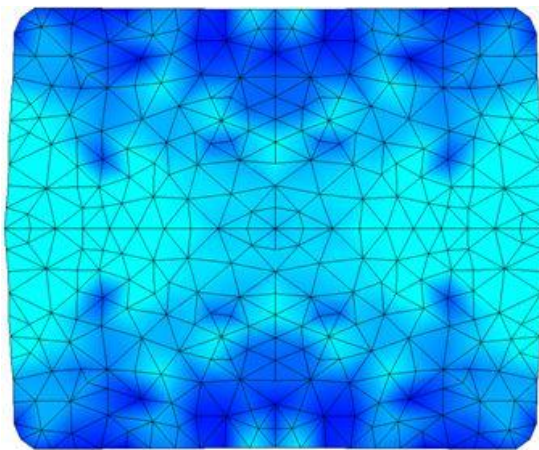
б



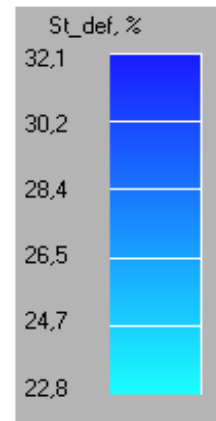
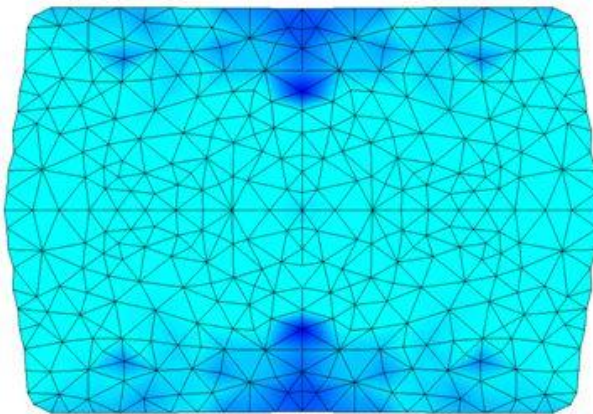
в

ступінь деформації 10 (а); 20 (б) и 30 % (в)

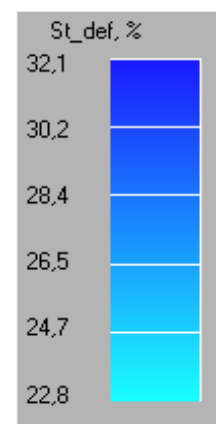
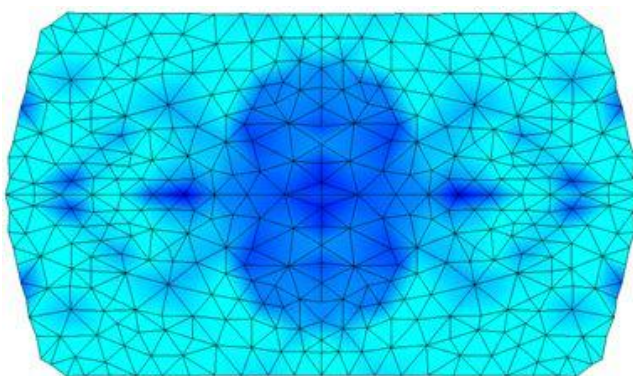
Рисунок 5 – Розподіл ступеня деформації по перерізу розкатів при прокатці в валках з гладкою бочкою



а



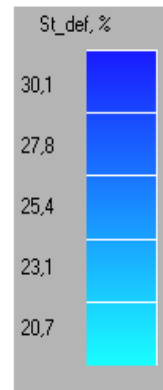
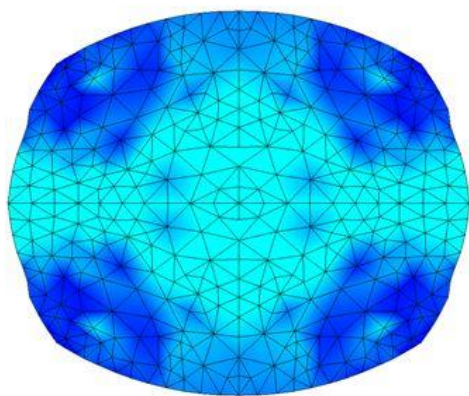
б



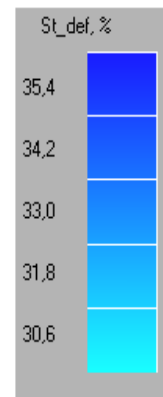
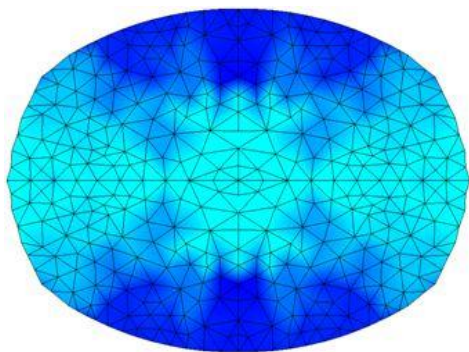
в

ступінь деформації по вершині калібру 10 (а); 20 (б) и 30 % (в)

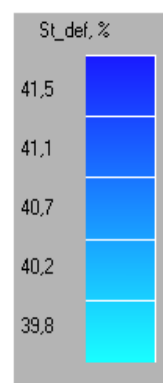
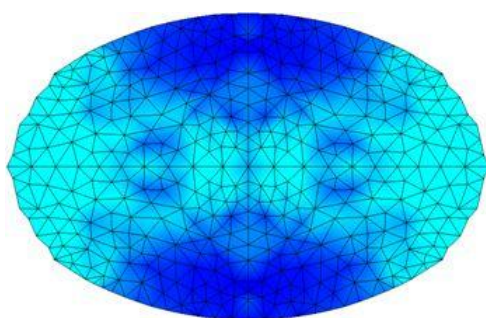
Рисунок 6 – Розподіл ступеня деформації по перерізу розкатів при прокатці в валках з ящиком калібром



а



б



в

ступінь деформації по вершині калібру 10 (а); 20 (б) и 30 % (в)

Рисунок 7 – Розподіл ступеня деформації по перерізу розкатів при прокатці в валках з овальним калібром

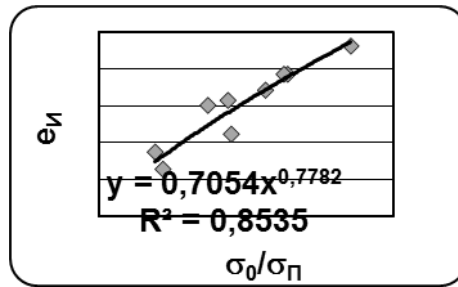


Рисунок 8 – Залежність ступеня деформації центральної зони розкатів, які розраховані МСЕ, від співвідношення нормальних напружень на поверхні і в центральній зоні розкатів, розрахованого по розробленій спрощеній методиці

Висновки. Розроблено спрощений метод оцінки опрацювання центральних зон перерізу розкату для отримання однорідної структури і механічних властивостей по висоті готової металопродукції. Показано, що розроблений спрощений метод можна застосовувати для попереднього орієнтовного визначення параметрів калібрів і ступеня деформації, що забезпечують більш високу ступінь деформаційного опрацювання прокату. Однак для уточнених розрахунків необхідно застосовувати програми, засновані на МКЕ. З використанням програми ESVDEFORM, досліджено напружено-деформований стан металу при прокатці квадратної заготовки перерізом 160×160 мм в валках з гладкою бочкою, ящиковим і овальним калібром при ступенях деформації 10, 20 та 30 %. Встановлено, що найбільші значення ступеня деформації в центральній зоні розкатів у всьому дослідженому діапазоні ступенів деформації по вершині калібрів досягаються в валках з овальним калібром. Значення ступеня деформації в центральній зоні розкатів при прокатці в валках з гладкою бочкою трохи вище, ніж в ящиковому калібрі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Антипин В. Г. Прокатные станы: справочник в 3-х томах. Т. 2. Средне-, мелкосортные и специальные станы / [В. Г. Антипин, С. В. Тимофеев, Д. К. Нестеров и др.]. – М. : Металлургия, 1992. – 496 с.
2. Пастерняк З. Прокатка непрерывнолитых заготовок / З. Пастерняк. – М., 1983 (Обзор по системе «Информсталь» - ин-т «Черметинформация». – Вып. 3(152). – 35 с.).
3. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / [В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич]. Численные методы. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 445 с.
4. Лукашкин Н. Д. Напряжения и деформации в процессах обработки металлов давлением / Н. Д. Лукашкин, Л. С. Кохан, Н. Н. Лебедев. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 240 с.
5. Алдунин А. В. Проникновение пластической деформации по толщине прокатываемой полосы / А. В. Алдунин, Л. С. Кохан // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 11. – С. 34–37.
6. Грудев А. П. Технология прокатного производства: учебник для вузов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Металлургия, 1994. – 656 с.
7. Смирнов В. К. Калибровка прокатных валков : учеб. пос. для вузов / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. – М. : Металлургия, 1987. – 368 с.