

УДК 621.771.25.04.003.12

Паламарь Д. Г.
Воробей С. А.
Лохматов А. П.
Ершов С. В.

МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСЕВОЙ ЗОНЫ РАСКАТА ПРИ ГОРЯЧЕЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Переход действующих сортопрокатных стансов Украины на использование непрерывнолитой заготовки является одной из важнейших задач в металлургической отрасли. Однако уменьшение суммарной деформации, по сравнению с прокаткой из слитков, часто приводит к недостаточной проработке центральных зон сечения раската. В результате этого в готовом прокате остаются дефекты непрерывнолитой заготовки – центральная пористость, ликвационные зоны и т. д.

Во время деформации сначала разрушается литая структура, а затем происходит процесс уплотнения металла [1]. Поверхности внутренних дефектов (несплошностей) постепенно сближаются друг с другом и, при определенных условиях, завариваются. Чем больше обжатие, тем эффективнее устранение внутренних несплошностей. Поскольку наибольшее количество несплошностей сосредоточено в центральной зоне непрерывнолитой заготовки, решающее значение имеют характер, величина напряжений и деформаций в этой зоне.

В процессе прокатки пластическая деформация развивается от контактных поверхностей и распространяется вглубь сечения раската. Контактный слой металла под действием приложенной силы смещается и оказывает давление на нижележащие слои металла, производя в них соответствующие сдвиги, смещения [2]. Характер деформации по сечению раската при прокатке является следствием неравномерного распределения напряжений в объеме очага пластической деформации. Поэтому анализ распределения деформации по сечению раската требует совокупного рассмотрения напряженного и деформированного состояний.

Наиболее часто неравномерность деформации обуславливается геометрическими факторами: формой сечения заготовки, формой калибра, диаметром валков. Неравномерность деформации может также являться следствием неоднородности химического состава и структуры, неравномерности нагрева металла, влиянием внешнего трения.

Учитывая сложность закономерностей взаимного влияния параметров деформации, при рассмотрении их влияния на характер течения металла все большее распространение находит математическое моделирование с применением методов конечных элементов (МКЭ), например, [3]. Для моделирования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в различных калибрах хорошо зарекомендовал себя пакет программ, основные характеристики которого приведены в работе [4]. Он позволяет решать данный класс задач без упрощения схемы течения металла, формы калибра и формы заготовки. Результатами расчета являются трехмерные поля скоростей, напряжений и деформаций металла перед входом в очаг деформации, вдоль очага деформации и после выхода раската из очага деформации, т. е., учитывается влияние внешних зон. Однако МКЭ присущ существенный недостаток – большая продолжительность расчетов и сложность подготовки исходных данных. В связи с этим до настоящего времени разрабатываются и применяются упрощенные методы оценки напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации. Один из таких методов приведен в работах [5, 6]. Однако он разработан для условий прокатки в валках с гладкой бочкой.

В отличие от случая деформации металла в гладких валках, при прокатке в калибрах обычные параметры деформации становятся переменными по ширине калибра, отличаются для различных элементов профиля [7]. Прежде всего, отличается величина абсолютного и относительного обжатия.

При прокатке сортовых профилей форма поперечного сечения заготовки, обычно квадратная, прямоугольная или круглая, постепенно изменяется и приобретает форму готового профиля, который может иметь весьма сложную конфигурацию [7]. Изменение формы достигается путем неравномерного обжатия различных элементов сечения раската. Так, например, для получения овального профиля из заготовки квадратного сечения обжатия по краям заготовки должны быть больше, чем в средней части, что достигается благодаря овальной форме калибра.

Важной особенностью деформации в калибрах является неодновременность начала обжатия всех элементов сечения раската при его входе в калибр. Более обжимаемые элементы сечения раската раньше входят в контакт с валками и получают некоторое обжатие до момента начала деформации других его элементов. Необжимаемые зоны на этом участке очага деформации уменьшают вытяжку металла и способствуют развитию уширения.

Целью настоящей работы является разработка упрощенного метода оценки проработки центральных зон сечения раската при горячей сортовой прокатке, который позволил бы сузить область дальнейшего поиска оптимального решения для каждой схемы производства.

В качестве базового нами принят метод, предложенный в работах [5, 6].

По результатам этих исследований показано, что изменение относительного нормального напряжения сжатия по высоте очага деформации при обжатии прямоугольной призматической заготовки в гладких валках определяется по зависимости:

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

где z – вертикальная координата;

σ_z – нормальное напряжение в глубине очага деформации;

σ_n – нормальное напряжение в очаге деформации под инструментом;

f – коэффициент трения;

h_0 – высота исходной заготовки;

ε – степень деформации (отн.);

R_z – условный гидравлический радиус, равный отношению площади контактной поверхности очага деформации (F_k) к ее периметру (Π) без учета уширения.

В этом случае при прокатке в валках с гладкой бочкой $F_k = b_0 \sqrt{h_0 \varepsilon R}$, $\Pi = 2(b_0 + \sqrt{h_0 \varepsilon R})$ и, соответственно, условный гидравлический радиус равен:

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

Вертикальная координата z задается от продольной оси очага деформации, поэтому выражение (1) для самой оси имеет вид:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_n} = e^{-f \frac{h_0}{R_z} (1-\varepsilon)^2}. \quad (3)$$

Для использования этого метода при прокатке в калибрах необходимо определить величину условного гидравлического радиуса (R_r) в зависимости от параметров деформации в них.

При прокатке в калибрах простой формы в случае равенства катающих диаметров обоих валков процесс деформации происходит симметрично, контактные поверхности на обоих валках будут одинаковы [7]. На рис. 1 показана форма горизонтальной проекции контактной поверхности при прокатке в некоторых калибрах.

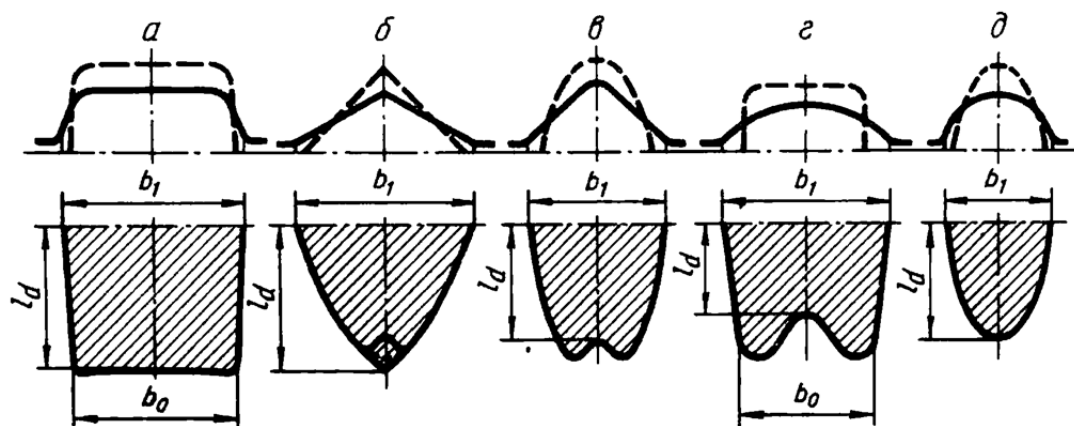


Рис. 1. Форма горизонтальной проекции контактной поверхности при прокатке в различных калибрах [7]:

а – прямоугольник – ящичный калибр; б – квадрат – ромб (ромб – ромб, ромб – квадрат); в – овал – квадрат; г – квадрат – овал; д – овал – круг

В ящичных калибрах (рис. 1, а) форма контактной поверхности близка к равнобокой трапеции с основаниями b_0 и b_1 и высотой, равной длине очага деформации по дну калибра l_d . При прокатке в системах калибров ромб – квадрат, ромб – ромб (рис. 1, б) контактная поверхность имеет форму равнобедренного треугольника с основанием и выпуклыми наклонными сторонами, причем в зависимости от радиусов скругления углов калибра и заготовки вершина контактной поверхности может быть острой, плоской или слегка вогнутой. Форма контактной поверхности при прокатке в квадратном калибре овальной заготовки показана на рис. 1, в. Вогнутость контура контактной поверхности по месту, соответствующему вершине калибра, будет тем больше, чем больше притупление задаваемой овальной заготовки. При прокатке в овальном калибре квадратной заготовки в вершине калибра имеют место минимальное обжатие и минимальная длина очага деформации l_d , что обуславливает получение контактной поверхности, форма которой показана на рис. 1, г. В овальных и круглых калибрах при обжатии овальных заготовок контактная поверхность имеет очертания полуэллипса с малой осью b_1 и большой полуосью l_d (рис. 1, д).

Площадь горизонтальной проекции контактной поверхности для рассмотренных систем калибров в первом приближении можно определить по формулам В. Г. Дрозда [7]:

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

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

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

На основе конфигурации контактной поверхности при прокатке в различных системах калибров нами получены выражения (см. табл. 1) для определения условного гидравлического радиуса (R_c) (параметр, входящий в выражения 1 и 3).

Примеры результатов расчетов относительного нормального напряжения сжатия по выражению (3) с учетом параметра (R_c) представлены на рис. 2 и 3. Расчеты выполнены для условий прокатки квадратной заготовки сечением 160×160 мм в гладких валках, ящичном и овальном калибрах.

На рис. 2 показано распределение отношения нормального напряжения сжатия в поверхностных слоях к нормальному напряжению в текущей точке по высоте очага деформации (σ_z/σ_{II}) при степени деформации в валках с гладкой бочкой и по вершине калибров 20 %.

На рис. 3 показана зависимость отношения нормального напряжения сжатия в поверхностных слоях к нормальному напряжению в осевой зоне раската (σ_0/σ_{II}) в зависимости от степени деформации по вершине калибра.

Таблица 1

Выражения для расчета условного гидравлического радиуса (R_c) при прокатке в различных системах калибров

Система калибров	Условный гидравлический радиус (R_c)
Прямоугольник – гладкая бочка (с учетом уширения)	$R_r = \frac{0,5\sqrt{H_0 \varepsilon R} (B_0 + B_1)}{\left(B_0 + B_1 + 2\sqrt{[0,5(B_1 - B_0)]^2 + (\sqrt{H_0 \varepsilon R})^2} \right)}$
Прямоугольник – ящичный калибр	$R_r = \frac{0,5\sqrt{H_0 \varepsilon R} (B_0 + B_1)}{\left(B_0 + B_1 + 2\sqrt{[0,5(B_1 - B_0)]^2 + (\sqrt{H_0 \varepsilon R})^2} \right)}$
Ромб – квадрат (квадрат – ромб)	$R_r = \frac{0,67\sqrt{H_0 \varepsilon R} \times B_1}{\left(B_1 + 2\sqrt{\left(\frac{B_1}{2}\right)^2 + (\sqrt{H_0 \varepsilon R})^2} \right)}$
Овал – круг (квадрат, ребровой 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	$R_r = \frac{0,54\sqrt{H_0 \varepsilon R} (B_0 + B_1)}{\left(B_0 + B_1 + 2\sqrt{[0,5(B_1 - B_0)]^2 + (\sqrt{H_0 \varepsilon R})^2} \right)}$

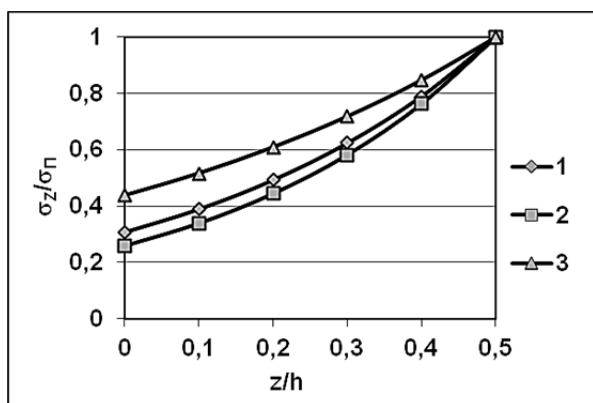


Рис. 2. Распределение относительного нормального напряжения сжатия по высоте очага деформации при степени деформации в валках с гладкой бочкой и по вершине калибров 20 %:

1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр; 3 – овалыный калибр

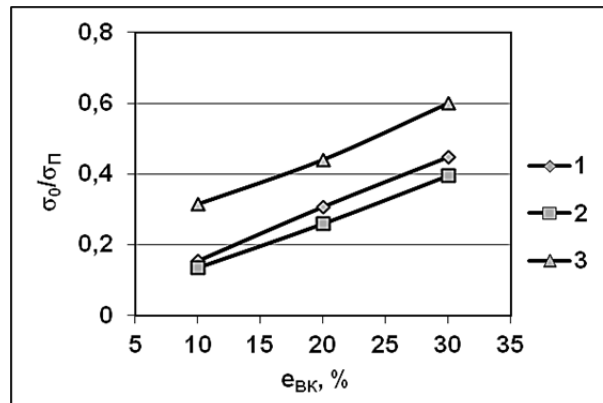


Рис. 3. Зависимость отношения нормального напряжения сжатия в поверхностных слоях к нормальному напряжению в осевой зоне раската в зависимости от степени деформации по вершине калибра:

1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр; 3 – овалыный калибр

По данным работы [5] для получения однородной структуры и механических свойств по высоте готовой металлопродукции необходимо, чтобы напряжение сжатия в глубине деформируемого металла существенно не отличалось от напряжения под технологическим инструментом. С этой точки зрения наиболее благоприятным является случай деформации квадратной заготовки в овалыном калибре (см. рис. 2 и 3).

С целью проверки возможности применения разработанного упрощенного метода оценки проработки центральных зон сечения раската, с использованием программы ESVDEFORM [4], были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния металла при прокатке квадратной заготовки сечением 160×160 мм в валках с гладкой бочкой, ящичным и овальным калибрами. Материал заготовки – сталь марки СтЗсп, температура заготовки 1100 °С, скорость прокатки $0,5$ м/с. Расчеты выполнены для трех значений степени деформации по вершине калибров – 10 , 20 и 30 %. Диаметр валков по буртам – 600 мм. В качестве примера на рис. 4 показано распределение степени деформации по сечению раскатов при прокатке в валках с овальным калибром.

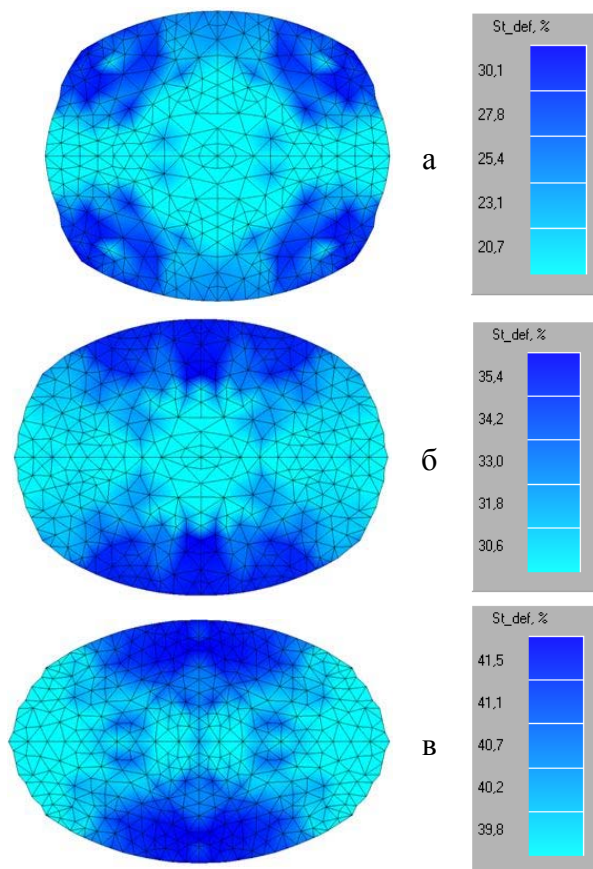


Рис. 4. Распределение степени деформации по сечению раскатов при прокатке квадратной заготовки в валках с овальным калибром: степень деформации по вершине калибра 10 % (а), 20 % (б) и 30 % (в)

На рис. 5 показана зависимость степени деформации (с учетом сдвиговой) центральной зоны раскатов от соотношения нормальных напряжений сжатия в поверхностном слое и центральной зоне раскатов. Степень деформации рассчитывалась с использованием МКЭ. Соотношение нормальных напряжений сжатия в поверхностном слое и центральной зоне раскатов рассчитывалось по разработанному упрощенному методу.

Приведенные данные показывают, что сделанный в работе [5] вывод об улучшении проработки структуры с приближением отношения σ_n/σ_n к единице верен, так как с увеличением этого отношения степень деформации центральных участков полосы действительно возрастает. Этот факт дает возможность считать, что разработанный упрощенный метод оценки проработки структуры можно применять для предварительного ориентировочного определения параметров калибров и степени деформации, обеспечивающих более высокую степень деформационной проработки раската. Однако для углубленных исследований процессов с развитой неравномерностью деформации необходимо применять программы, основанные на МКЭ.

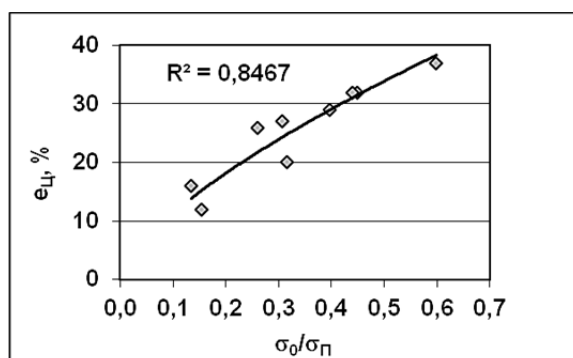


Рис. 5. Зависимость степени деформации центральной зоны раскатов, рассчитанной с помощью МКЭ, от соотношения нормальных напряжений сжатия в поверхностном слое и центральной зоне раскатов, рассчитанного по разработанному упрощенному методу

ВЫВОДЫ

Разработан и проверен упрощенный метод оценки напряжений в очаге деформации, необходимых для проработки структуры металла при горячей прокатке сортового металла.

Данный метод целесообразно применять для предварительного ориентировочного определения параметров калибров и степени деформации, обеспечивающих более высокую степень деформационной проработки осевой зоны непрерывнолитых заготовок, что позволит сузить область дальнейшего поиска оптимального решения для каждой схемы производства качественного проката в калибрах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пастернак З. Прокатка непрерывнолитых заготовок / З. Пастернак. – М., 1983 (Обзор по системе «Информсталь» - ин-т «Черметинформация». – Вып. 3(152). – 35 с.).
2. Теория прокатки крупных слитков / А. П. Чекмарев, А. П. Павлов, В. Л. Мелешко [и др.]. – М. : Металлургия, 1968. – 252 с.
3. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 445 с.
4. Ершов С. В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системах сортовых калибров : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 / С. В. Ершов. – Днепродзержинск, 2008. – 339 с.
5. 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.
6. 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.
7. Грудев А. П. Технология прокатного производства: учебник для вузов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Металлургия, 1994. – 656 с.

Паламарь Д. Г. – мл. науч. сотр. ИЧМ НАН Украины;

Воробей С. А. – д-р техн. наук, зав. отделом ИЧМ НАН Украины;

Лохматов А. П. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Ершов С. В. – д-р техн. наук, зав. каф. ДГТУ.

ИЧМ НАН Украины – Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Статья поступила в редакцию 21.02.2013 г.