



## Классификация ящичных калибров по виду напряженно-деформированного состояния

*В статье изложены новые подходы к классификации ящичных калибров на основе исследований, проведенных с использованием программного пакета ESVDform, разработанного сотрудниками кафедры ОМД ДГТУ. Анализ напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при прокатке в ящичных калибрах разных типов привел к разработке новых подходов к классификации ящичных калибров. Предлагаемые подходы позволяют расширить классификационные признаки ящичных калибров и облегчить выбор калибра для их практического применения. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.*

**Ключевые слова:** классификация ящичных калибров, напряженно-деформированное состояние металла, очаг деформации, калибр

*The article describes new approaches to classification on the basis of box calibration studies conducted using a software package ESVDform, developed by the staff of the Department OMD DGTU. Analysis of the stress-strain state of the metal in the deformation zone during rolling in the calibers of different types of box led to the development of new approaches to the classification of box calibers. The proposed approach can extend the classification features of box-caliber and facilitate the choice of caliber for their practical application.*

**Keywords:** classification of box-caliber, stress-strain state of the metal, the deformation, the caliber.

Ящичные калибры широко распространены при прокатке сортовых профилей крупных и средних сечений [1, 2]. Система ящичных калибров применяется в обжимных клетях, в первых клетях всех современных сортовых станков. Подобные калибры широко используют при производстве профилей специального назначения. Ящичные калибры относят к калибрам простой формы [1, 2]. На производстве используют открытые и реже закрытые ящичные калибры.

Чаще всего ящичные калибры используют на начальных стадиях процесса прокатки при производстве сортовых профилей. Практический опыт показывает, что первые проходы определяют качество готовой продукции. Дефекты, образовавшиеся на этих этапах, часто переходят на готовую продукцию. Поэтому развитие теории процесса прокатки в калибрах ящичной формы является важной задачей не только с научной, но и с практической точки зрения.

В настоящее время существует ряд работ, посвященных изучению течения металла и напряженного состояния при прокатке в калибрах ящичной формы. Например, в [3] показано, что при прокатке слитка на гладкой бочке без кантовки на боковой поверхности раската образуется вогнутость, величина которой в некоторых случаях может достигать 50-55 мм. После кантовки такого раската и передачи его в первый ящичный калибр в первом проходе обжимаются в основном наплывы металла, а средняя часть слитка при этом или не контактирует с дном калибра, или обжимается незначительно. В [4] выполнен теоретический анализ напряженно-деформированного состояния металла при прокатке прямоугольной полосы в

ящичном калибре специальной формы. Показано, что напряженное состояние металла вдоль физического очага деформации изменяется весьма значительно и связано с особенностями течения металла в различных зонах физического очага деформации.

При проектировании ящичных калибров кроме основной задачи – получение необходимой формы и размеров полосы – решаются также задачи, связанные с улучшением качества готовой продукции или повышением производительности стана:

- 1) исключение образования закатов на полосе при переполнении предыдущего калибра [5];
- 2) предотвращение возможного сваливания полосы в результате неустойчивого положения ее на рольганге при захвате валками [6];
- 3) улучшение условий захвата [7];
- 4) прокатка в одном калибре большого диапазона ширин полос без потери устойчивости [8];
- 5) обеспечение необходимого заполнения последующего калибра [3];
- 6) уменьшение неравномерности износа валков [9];
- 7) снижение трещинообразования [4].

Такой широкий круг решаемых специалистами задач приводит к использованию на практике разнообразных форм ящичных калибров. Однако в литературе нет однозначного ответа на вопрос о том, для каких случаев лучше использовать ту или другую форму ящичного калибра. Это можно объяснить отсутствием широких исследований напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в ящичных калибрах разной формы и законченной

классификации возможных форм ящичных калибров.

**Целью данной работы** является уточнение современной классификации применяемых на практике ящичных калибров исходя из новых сведений о напряженно-деформированном состоянии металла в очаге деформации.

Ящичный калибр имеет плоское, выпуклое или вогнутое дно. Величина выпуклости (вогнутости) не превышает, как правило, 2 % от высоты калибра. Образуя стенки калибра – наклонная прямая или ломаная линия. Выпуск калибра находится в пределах до 35 %. Переход от стенки ко дну выполнен по дуге или прямой (ломаной) линии.

Для достижения поставленной цели в части новых подходов к классификации выполнены теоретические исследования процесса прокатки квадратной полосы 300x300 мм в ящичных калибрах с наиболее часто встречающимися формами. Диаметр валков по буртам составил 600 мм. Выпуски калибров составляли 25 %, в калибре с двойным выпуском: у дна 17 %, у зазора 41,7 %. Моделирование проводилось с использованием программного пакета ESVDeform, разработанного на кафедре ОМД Днепропетровского ГТУ. В основе программного пакета лежит метод конечных элементов, который используется для решения вариационной задачи.

При рассмотрении распределения продольных напряжений ( $\sigma_x$ ) во входном сечении в очаг деформации (рис. 1) было выявлено, что в ящичном калибре простой формы по всей площади полосы, кроме углов калибра, возникают растягивающие напряжения (положительные значения). Это объясняется тем, что скорость продольного течения металла на входе в очаг деформации рассматриваемой формы максимальна в углах калибра. Схожее распределение продольных напряжений во входном сечении наблюдается и в калибре с двойным уклоном. Отличительной особенностью распределения  $\sigma_x$  во входном сечении

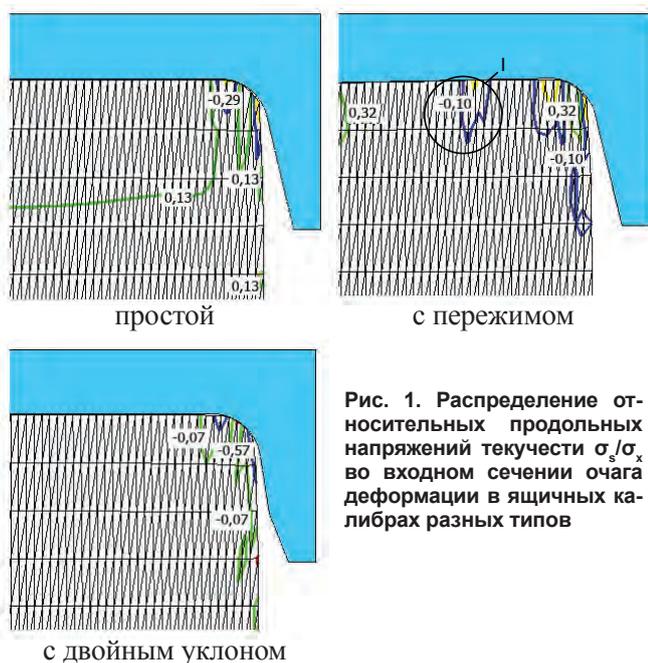


Рис. 1. Распределение относительных продольных напряжений текучести  $\sigma_s/\sigma_x$  во входном сечении очага деформации в ящичных калибрах разных типов

этого калибра являются большие по величине сжимающие  $\sigma_x$  и меньшие значения растягивающих напряжений  $\sigma_x$  (отрицательные значения), в сравнении с калибром без двойных уклонов. В калибре с пережимом во входном сечении сжимающие напряжения  $\sigma_x$  возникают на контакте полосы в зоне I. Это объясняется тем, что во входном сечении сильно развивается уширение полосы, а в рассматриваемом калибре выпуклость еще больше способствует боковому течению. Поэтому продольная скорость течения металла по вертикальной оси калибра меньше, чем в зоне I. Сжимающие напряжения  $\sigma_x$  во входном сечении калибра с пережимом сосредоточены также под углами калибров, а в самих углах возникают растягивающие  $\sigma_x$ . Это объясняется тем, что в отличие от всех остальных типов ящичных калибров на входе в калибр с пережимом металл стремится заполнить углы калибра не только в боковом, но и в вертикальном направлении. Т.е., вначале полоса обжимается

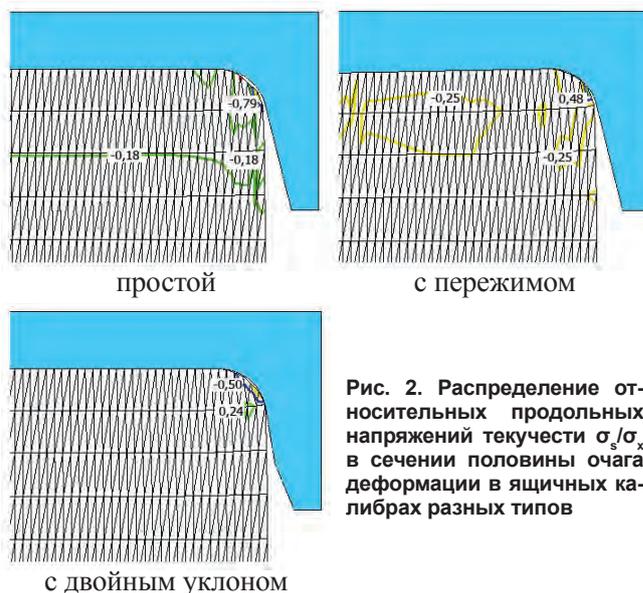


Рис. 2. Распределение относительных продольных напряжений текучести  $\sigma_s/\sigma_x$  в сечении половины очага деформации в ящичных калибрах разных типов

по вертикальной оси калибра, а потом встречается с валками в углах калибра. В результате на входе в очаг деформации замедляется продольное, вертикальное и боковое течение металла в углах калибра по сравнению с соседними участками. Поэтому в углах калибра с пережимом на входе в очаг деформации возникают растягивающие  $\sigma_x$ .

Анализ распределения продольных напряжений на половине длины очага деформаций (рис. 2) показывает, что при прокатке в ящичном калибре простой формы в рассматриваемом сечении возникают сжимающие напряжения, максимум которых приходится на углы калибра. Это объясняется максимальной продольной скоростью в углах полосы в рассматриваемом сечении очага деформации. В калибре с пережимом в рассматриваемом сечении очага деформации в углах полосы возникают растягивающие продольные напряжения. Это объясняется тем, что по вертикальной оси калибра создается большее обжатие, а значит, возникает большая вытяжка. Поэтому в углах формируется зона растягивающих  $\sigma_x$ . В калибре с двойным уклоном зона растягивающих напряжений форми-

руется ниже углов полосы. Это объясняется тем, что ниже этих зон на половине длины очага деформации начинается интенсивное боковое течение металла из-за отсутствия стенок калибра.

Анализ распределения продольных напряжений в остальных сечениях показал, что в ящичных калибрах рассматриваемых типов принципиальных различий, в характере возникновения зон растягивающих и сжимающих напряжений  $\sigma_x$  нет. Поэтому для краткости этот анализ в статье не приводим.

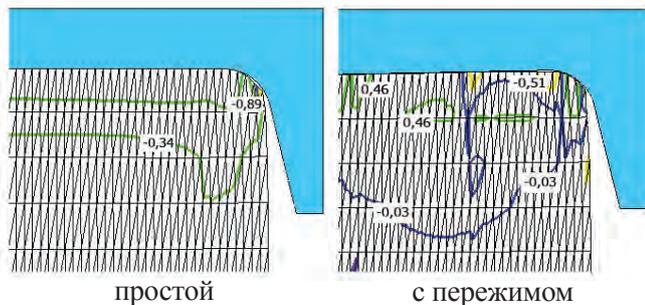
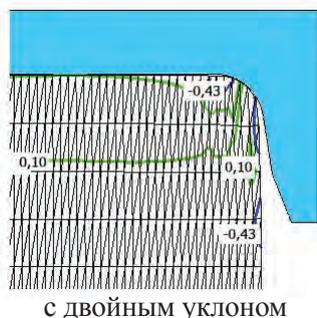
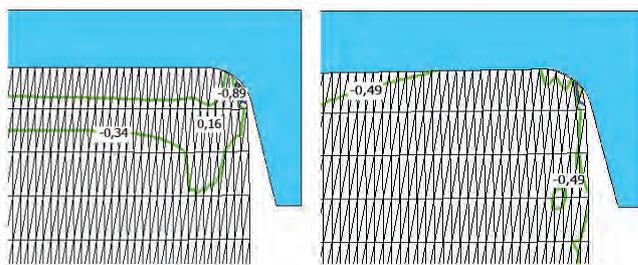


Рис. 3. Распределение относительных поперечных напряжений текучести  $\sigma_y/\sigma_y$  во входном сечении очага деформации в ящичных калибрах разных типов



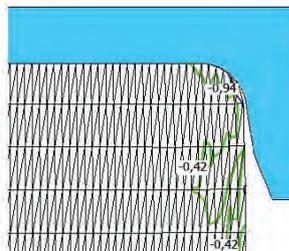
При рассмотрении распределения поперечных напряжений ( $\sigma_y$ ) было выяснено, что в сечении входа в очаг деформации (рис. 3) в калибре простой формы в приконтактной зоне возникают сжимающие  $\sigma_y$ , что объясняется незначительным проникновением деформации в глубину полосы во входном сечении. Из-за выпуклости дна калибра большая часть металла из центральной контактной зоны смещается сначала внутрь, а затем к боковым частям полосы. В результате во входном сечении на половине ширины поперечная скорость течения металла в приконтактном слое больше, чем на контакте. Поэтому посередине ширины калибра с пережимом во входном сечении возникают растягивающие поперечные напряжения. В калибре с двойным уклоном металл раньше, чем в калибре простой формы, встречается с боковыми стенками калибра. Поэтому практически во всем входном сечении возникают растягивающие поперечные напряжения, а в углах – сжимающие, так как на этом этапе продолжается заполнение углов калибра.

Анализ распределения поперечных напряжений в сечении очага деформации, находящемся на расстоянии четверти длины очага деформации от входа в него (рис. 4), показывает, что при прокатке в ящичном калибре простой форме его характер и величина мало чем отличается от входного сечения (см. рис. 3). В рассматриваемом сечении очага деформации калибра с пережимом на контакте возникает пикообразная зона растягивающих  $\sigma_y$ . Возникновение этой зоны



простой

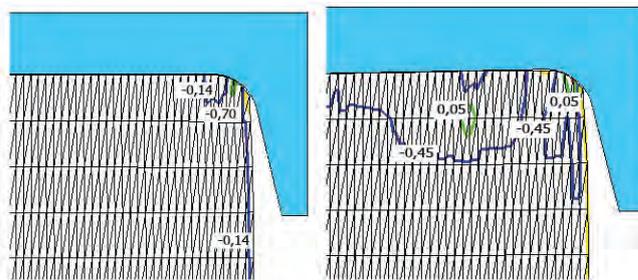
с пережимом



с двойным уклоном

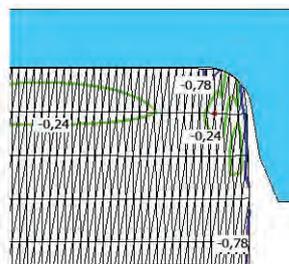
объясняется действием выпуклости дна калибра, механизм возникновения описан при анализе распределения поперечных напряжений во входной зоне. На боковой поверхности полосы в рассматриваемом сечении при прокатке в калибре с двойным уклоном возникают сжимающие напряжения, это объясняется большими скоростями поперечного течения металла в этих зонах, чем в соседних.

Анализ распределения поперечных напряжений в остальных сечениях показал, что в ящичных калибрах рассматриваемых типов принципиальных различий, в характере возникновения зон растягивающих и сжимающих  $\sigma_y$  нет. Поэтому для краткости этот анализ в статье не приводим.



простой

с пережимом



с двойным уклоном

Рис. 5. Распределение относительных вертикальных напряжений текучести  $\sigma_z/\sigma_z$  во входном сечении очага деформации в ящичных калибрах разных типов

Анализ распределения вертикальных напряжений ( $\sigma_z$ ) во входном сечении (рис. 5) показывает, что максимум сжимающих вертикальных напряжений находится в углах полосы. При прокатке в ящичном калибре с двойными уклонами в таком же сечении максимальные сжимающие вертикальные напряжения распространяются от углов полосы до центра по

**Таблица. Уточнения к классификации ящичных калибров**

Тип ящичного калибра	Внешний вид	Описание
Открытый		Зазор совпадает с осью калибра
Закрытый		Зазор выше (ниже) калибра
Полузакрытый		Зазор не выходит за максимальные размеры калибра
С прямым дном		Одинаковая высота калибра по центру и в месте перехода к стенке
С выпуклым дном (с пережимом)		Высота калибра по центру меньше, чем в месте перехода к стенке
С вогнутым дном		Высота калибра по центру больше, чем в месте перехода к стенке
Закругленный		Переход от стенки ко дну по дуге
Десятиугольный		Переход от стенки ко дну по прямой (ломаной)
С прямым выпуском		Стенка калибра выполнена прямой линией
С двойным выпуском		Стенка калибра выполнена ломаной линией, раскрывающейся у зазора

всему краю полосы. Это объясняется сдерживающим влиянием боковых стенок калибра. В результате на боковой поверхности полосы более интенсивно развиваются вертикальная и продольная составляющая скорости течения металла. В калибре с пережимом в рассматриваемом сечении в углах полосы возникают растягивающие вертикальные напряжения из-за неравномерного обжатия по ширине калибра – вначале металл обжимается посередине ширины калибра, а потом, после заполнения, встречается с валками в углах калибра.

Анализ распределения вертикальных напряжений в остальных сечениях показал, что в ящичных калибрах рассматриваемых типов принципиальных различий, в характере возникновения зон растягивающих и сжимающих  $\sigma_z$  нет. Поэтому для краткости этот анализ в статье не приводим.

Изучение полей напряжений металла в очаге деформации показывает, что разница в форме калибра может привести к значительным изменениям напря-

женного состояния металла в очаге деформации. Следовательно, износ калибра, трещинообразование или выкатываемость трещин на полосе в каждом типе ящичного калибра будут разными. Например, при прокатке в калибре с пережимом во входной части очага деформации в приконтактной зоне возникают области с растягивающими  $\sigma_y$  (рис. 3, 4), что может привести к образованию продольных трещин на поверхности полосы, а замена такого калибра калибром с прямым дном может решить эту проблему. На основании выполненного анализа предлагается уточнение к существующей классификации типов ящичных калибров (таблица).

**Выводы**

Предложены новые подходы к классификации ящичных калибров, исходя из видов напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации. Предлагаемые подходы позволяют расширить классификационные признаки ящичных калибров и облегчить выбор калибра для их практического применения, исходя из вида напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации.

**Библиографический список**

1. Прокатка и калибровка. Т. 1. Справочник / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е. Меркурьев. – Днепропетровск: РВА «Днепро-ВАЛ», 2002. – 506 с. – ISBN 966-7616-42-8.
2. Берковский В.С. Теоретические основы и расчет калибровки валков сортовых прокатных станов: учеб.-метод. Пособие. – М.: МИСиС, 2003. – 110 с.
3. Совершенствование технологии прокатки на блюмингах / Д.П. Кукуй, Г.М. Шульгин, В.А. Нечепоренко и др. // Сб. науч. статей «Наука производству». – К.: Наукова думка, 2003. – С. 166-169.
4. Анализ напряженного состояния в специальном ящичном калибре при прокатке трубной заготовки / С.В. Ершов, Г.В. Левченко, Е.Е. Мостипан, Г.А. Мединский // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 6. – С. 34-39.
5. Калибровка прокатных валков / Б.П. Бахтинов, М.М. Штернов. - М.: Металлургиздат, 1953. – 784 с.
6. Некрасов С.Г. Конструирование прямоугольных калибров для прокатки углеродистой и легированной стали // Сталь. – 1961. – № 6. – С. 541-542.
7. Сокращение ребровых пропусков на обжимной клетки при прокатке полос / Е.М. Кроз, А.В. Сафронов // Сталь. – 1973. – № 5. – 438 с.
8. Уткин Г.С. Калибровка валков блюминга со сложным сортаментом // Сталь. – 1992. – № 6. – С. 49-51.
9. Совершенствование технологии прокатки заготовок на стане 850/730/580 / И.С. Кузнецов, А.Б. Юрьев, В.Н. Беспалов и др. // Сталь. – 2002. – № 12. – С. 40-41.

Поступила 27.05.2013