

С.С. Рычков, Д.И. Кинзин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ВАЛКОВ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ ПРОСТОЙ ФОРМЫ**

Проведено моделирование износа калибра чистой клетки при производстве круглого проката диаметром 23 мм в программном комплексе DEFORM. Введение коэффициента тоннажа в модель износа Аркхарда позволило выявить динамику износа в процессе прокатки 300 тонн металла, с разбиением на пять проходов моделирования. Качественно и количественно полученные результаты согласуются с характером износа рассмотренного калибра в процессе эксплуатации на стане 370 ОАО «ММК». Проведено качественное сравнение влияния различных геометрических соотношений в неравноосном калибре на износ валков в системе шестиугольник-квадрат. Использование более узких и высоких неравноосных калибров повышает равномерность износа и стойкость чистового калибра.

Ключевые слова: сортовая прокатка, метод конечных элементов, износ валков, калибр.

При поставке оборудования сортовых станов машиностроительные компании передают клиенту калибровки валков для производства предполагаемого профильного сортамента, разработанные собственными калибровочными бюро. Однако данные калибровки далеко не всегда обладают такими свойствами, как универсальность, экономичность и гибкость, так как главная задача машиностроителей – обеспечить клиента оборудованием для стабильного выпуска продукции, при этом максимально сократив сроки ввода в строй.

Именно поэтому калибровочные бюро сортовых производств занимаются не только разработкой калибровок при освоении новых видов продукции, но и корректировками контрактных калибровок с целью снижения затрат энергии, повышения стойкости оборудования и оптимизации валкового хозяйства.

Внесение любых изменений в геометрию калибров может привести к неоднозначным результатам, когда улучшение одного показателя приводит к ухудшению других. Именно поэтому особо актуальна возможность провести моделирование методом конечных элементов без необходимости затрачивать средства на опытные прокатки с использованием экспериментальной калибровки, которые в условиях реального производства провести практически невозможно.

Целью данной работы является моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы.

Поставлены следующие задачи:

- учёт ограничений программы DEFORM;
- выбор модели расчёта износа и её коэффициентов;
- учёт изменения формы калибра в процессе износа;
- проверка адекватности моделирования на основе экспериментальных данных;
- моделирование износа валков в системе калибров шестиугольник-квадрат с различными геометрическими соотношениями в неравноосном калибре.

1. Условия моделирования

Процесс: симметричный (использование четвертой части поперечного сечения заготовки и валков); установившийся (произвольное Лагранж-Эйлерово поведение элементов ALE); неизотермический (расчёт температурного профиля заготовки и валков).

Конечные элементы – гексаэдры. Выбор количества и типа элементов был обоснован ранее [1].

Заготовка: температура перед клетью 1000°C ; 200 элементов в поперечном сечении; 72 слоя в продольном сечении; более плотное размещение элементов в окрестности очага деформации с коэффициентом отношения 6:1; длина 280 мм (7 длин геометрического очага деформации); показатель трения – 0,52; материал – сталь AISI 1015 (сталь 15).

Валки: абсолютно жёсткие, несжимаемые; 100 элементов в продольном сечении; 90 слоёв в радиальном направлении; температура 50°C ; твёрдость по Роквеллу 50 HRC, по сечению постоянная, от изменения температуры не зависит; скорость вращения 508,7 об/мин.

В поперечном сечении валка всего 100 элементов, несмотря на то, что площадь сечения значительно превышает таковую у заготовки. Это было сделано сознательно. Мы проводим моделирование износа, следовательно, интерес представляет только приконтактная зона валка. Поэтому конечные элементы сконцентрированы в ней (рис. 1).

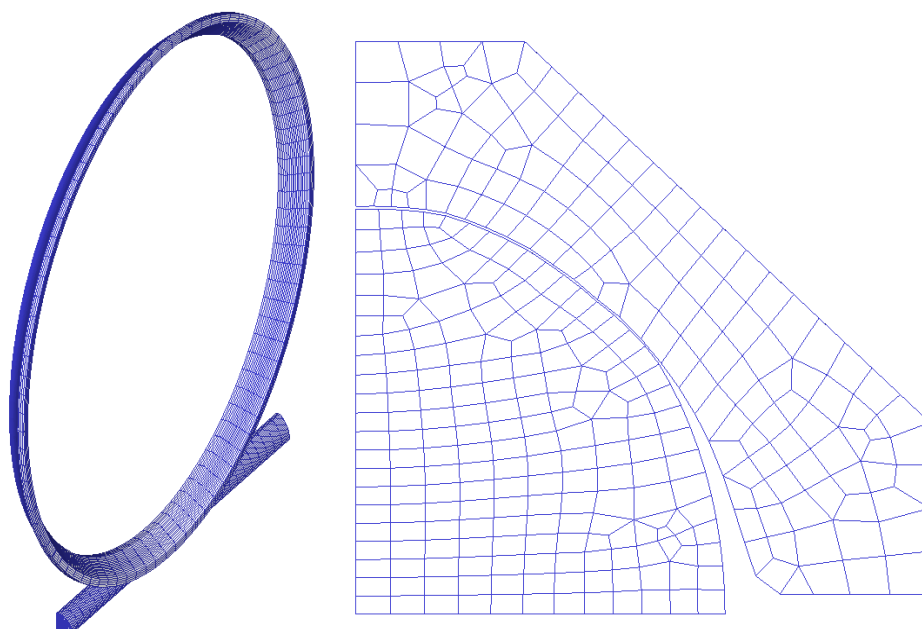


Рис. 1. Упрощённое представление заготовки и валка в среде DEFORM в объёме (слева) и плоскости поперечного сечения (справа)

В DEFORM для расчёта износа реализована модель Аркхарда для тех способов обработки давлением, в которых преобладает абразивный износ [2].

$$W = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt, \quad (1)$$

где: p – контактное напряжение;
 v – скорость скольжения;
 H – твёрдость материала инструмента;
 t – продолжительность контакта;
 a, b, c, K – коэффициенты;
 $a = 1; b = 1; c = 2$.

Формула учитывает влияние контактных напряжений, скорости скольжения металла об инструмент, твёрдости инструмента, продолжительности взаимодействия заготовки и инструмента.

Значения коэффициентов a, b, c выбрали на основе рекомендаций руководства пользователя DEFORM и Воронцова [3]. Выбор величины коэффициента K описан в следующем разделе.

2. Моделирование износа вала при производстве

круглого проката диаметром 23 мм на стане 370 ОАО «ММК»

Для проверки адекватности моделирования воспользовались данными замеров износа, полученными инженерами лаборатории прокатных валков ОАО «ММК» в производственных условиях [4], в отличие от данных Ли [5], собранных на лабораторных установках.

Недостатки лабораторного метода: невозможность учёта циклического изменения температуры поверхности инструмента и наличия зоны прилипания (трения качения) наряду с зоной скольжения, приработанность поверхностей инструмента и заготовки после начального периода испытаний. В то же время обработка данных со стана учитывает эти факторы, хотя динамику изменения

формы калибра в процессе работы отследить невозможно, так как из-за производственных ограничений замеры проводили на изношенных валках, готовых к переточке.

На рис. 2 представлены конструктивные размеры чистового калибра и износ валков, произведённых ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» (МЗПВ) и фирмой «Akers». Осевой износ валков МЗПВ после прокатки на них 308 тонн составил 0,6 мм.

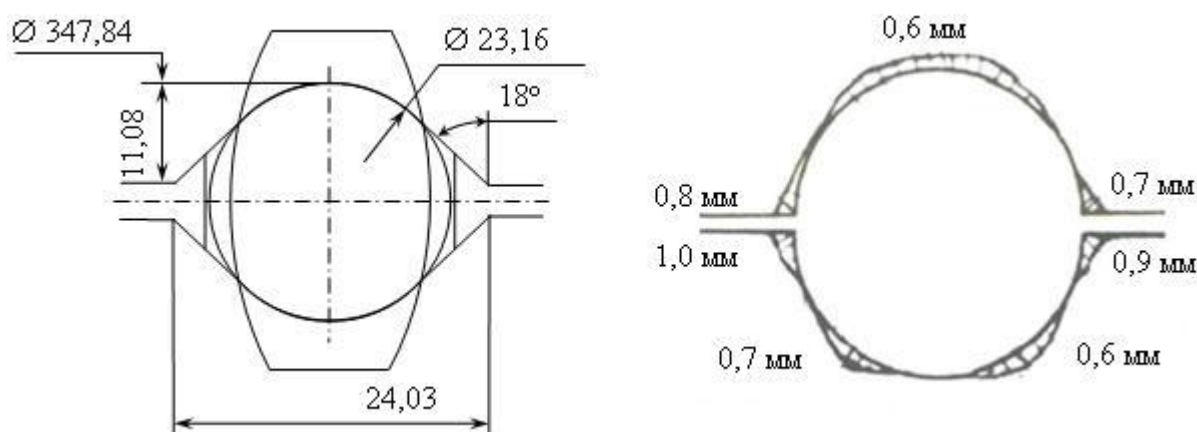


Рис. 2. Основные размеры и износ валков ЗАО «МЗПВ» (верхний ручей) и «Akers» (нижний ручей) при прокатке круглого проката диаметром 23 мм в клетки №16 стана 370 ОАО «ММК» после 308 и 282 тонн соответственно

Твёрдость валка СШХНМ-64И(Ц) – валка сортового с шаровидной формой графита, легированного хромом, никелем и молибденом, со структурой рабочего слоя «индефинит», отлитого центробежным способом на МЗПВ и минимальной твёрдостью по Шору 64 HSd – находится в диапазоне 45-53 HRC. По условиям моделирования твёрдость валка оставалась постоянной. В действительности же скорость износа может повыситься от разогрева валка в процессе деформации заготовки, что приведёт к падению твёрдости. В случае сильного вреза калибра в валки его твёрдость в различных точках также значительно варьируется, причём бурты и выпуск будут более износостойкими, чем дно калибра. Новый валок будет иметь более высокую твёрдость по сравнению с максимально переточенным валком, так как к центру валка твёрдость металла падает из-за ограниченной глубины рабочего слоя. Переточенный валок в про-

цессе эксплуатации длительное время подвергается воздействию высоких температур, что также негативно сказывается на твёрдости и равномерности её распределения по контуру калибра. Все эти факторы невозможно учесть в рамках моделирования без значительного увеличения количества расчётов и проведения натуральных экспериментов.

Для выбора значения коэффициента K в уравнении (1) необходимо вычислить интенсивность износа в точке валка за один его контакт с металлом.

На стане 370 используется заготовка сечением 150x150 мм длиной 11,7 м, а площадь поперечного сечения предчистового овала составляет 484 мм². Отсюда, длина раската на входе в чистовую клеть

$$L_{15} = LS / S_{15} = 11,7 \cdot 150^2 / 484 = 544 \text{ м}, \quad (2)$$

где: L – длина заготовки, м;

S – площадь поперечного сечения заготовки, мм²;

S_{15} – площадь поперечного сечения овала, мм²;

Длина дуги контакта

$$C_{\text{конт}} = \pi D = 3,14 \cdot 0,352 = 1,106 \text{ м}, \quad (3)$$

где D – катающий диаметр, м.

В процессе прокатки одной заготовки происходит следующее число контактов точки валка с металлом:

$$N_K = L_{15} / C_{\text{конт}} = 544 / 1,106 = 491,86. \quad (4)$$

При прокатке 308 тонн металла количество контактов составит

$$N_{308} = N_K P_{308} / P = 491,86 \cdot 308 / 2,05 = 73899, \quad (5)$$

где: P – масса заготовки;

P_{308} – масса прокатанного металла до достижения осевого износа в 0,6 мм.

Интенсивности износа при прокатке овального раската в круглом калибре

$$W = W_{308} / N_{308} = 6 \cdot 10^{-4} / 73899 = 8,12 \text{ нм}, \quad (6)$$

где W_{308} – фактический износ калибра после прокатки 308 тонн металла, м.

Значение K подбирается механически, чтобы в процессе моделирования в DEFORM получать рассчитанную величину интенсивности износа W по оси калибра равную 8,12 нм. Таким образом, $K = 1,185 \cdot 10^{-4}$.

Однако технические возможности существующих на рынке программных комплексов для моделирования процессов ОМД на основе метода конечных элементов не позволяют провести проверку адекватности расчёта износа для 74 тысяч контактов металла с валком, в котором за один контакт высота калибра будет увеличиваться всего на несколько нанометров. Поэтому мы ввели «коэффициент тоннажа» K_T , который позволит нам провести достаточно малое число прокаток, сэкономить время, снизить объём вычислений, но при этом увидеть динамику износа калибра.

Допустим стойкость круглого калибра 300 тонн, а количество проходов при моделировании равно пяти. Следовательно, один проход равносителен прокатке 60 тонн в реальных условиях. Тогда коэффициент тоннажа

$$K_T = \frac{C L S K}{N P S_{15} \pi D} = \frac{300 \cdot 11,7 \cdot 150^2 \cdot 1,185 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 2,05 \cdot 484 \cdot 3,14 \cdot 0,352} = 1,705, \quad (7)$$

где: C – стойкость калибра, т;

N – число проходов моделирования.

Получаемое значение K_T подставляется в формулу (1) вместо K , который используется как константа в формуле выбора величины K_T при моделировании прокатки в других клетях стана.

Таким образом, были получены данные о характере износа (рис. 3 и 4.)

Форма калибра после моделирования качественно совпадает с данными со стана 370 (рис. 2). По контуру калибра максимальный износ приходится на участок с наибольшим обжатием металла. При оценке овальности готового проката именно в этом месте диаметр будет наибольшим.

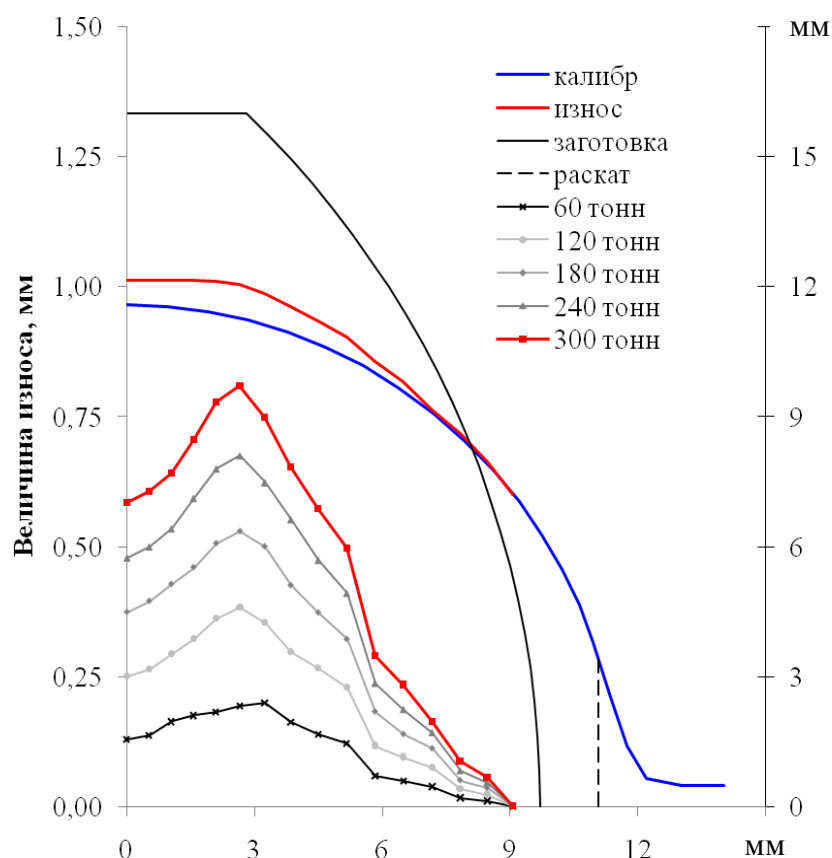


Рис. 3. Результаты моделирования износа калибра при прокатке 300 тонн круглого проката диаметром 23 мм на стане 370 ОАО «ММК»

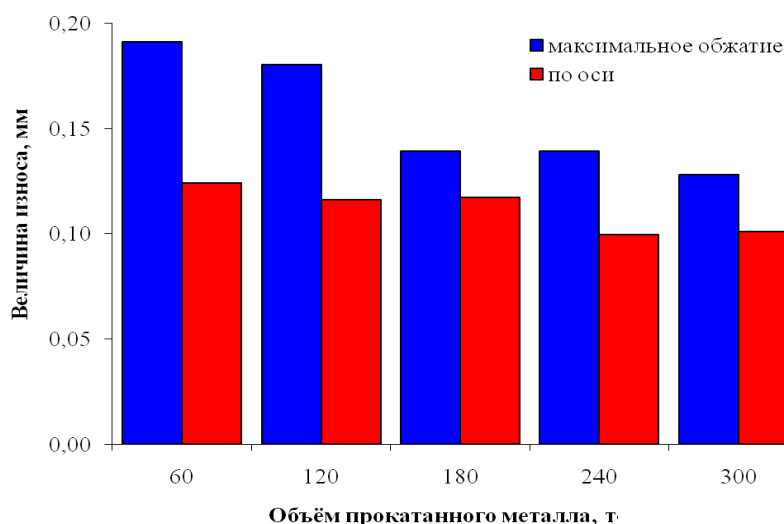


Рис. 4. Влияние объёма прокатанного металла на интенсивность износа по оси калибра и в месте максимального обжатия

В черновых калибрах такое изменение формы сечения заготовки может привести к образованию заката при прокатке в следующем равноосном калибре, так как высота калибра по оси с увеличением прокатанного тоннажа стано-

вится меньше высоты калибра по месту максимального обжатия (линия «износ» на рис. 3). Чётко видно образование угла у изношенного калибра, т.е. стремление круглого калибра обрести форму ящичного, повысив сродство входящего и выходящего сечений раската.

Отсутствие износа по выпуску калибра обусловлено ограничениями, наложенными при моделировании: наличие плоскостей симметрии заготовки, установившийся ALE процесс, отсутствие подпора (натяжения) от предчистовой клетки и отсутствие проводок на входе в клетку и на выходе из неё, отсутствие биения полосы в процессе прокатки.

Если сравнивать величину износа за каждые 60 тонн (рис. 4), можно отметить следующее: по оси калибра износ валка практически не меняет своей интенсивности, а в местах максимального обжатия она становится значительно меньше. Это объясняется снижением величины напряжений и продолжительности контакта из-за уменьшения обжатия и длины дуги контакта. Уменьшение длины дуги контакта по месту с максимальным обжатием происходит более интенсивно, так как начальный диаметр валка в данной зоне был больше, и убывает он более значительно, следовательно, быстрее сокращается длина дуги контакта и интенсивность износа.

3. Моделирование износа валков

в системе калибров шестиугольник-квадрат

Интерес вызывает не только возможность моделирования износа в одном калибре, но и как влияют различные геометрические соотношения неравноосного калибра на износ в системе калибров «неравноосное-равноосное сечение». В данной работе мы рассмотрим одну из таких систем – шестиугольник-квадрат (рис. 5, табл. 1).

По сравнению с моделированием износа калибра при производстве круглого проката диаметром 23 мм условия изменились следующим образом: скорость вращения валков первой клетки 60 об/мин, второй – 87 об/мин; длина заго-

товки 350 мм; для 15 тыс. контактов металла и валков выбрали $K_T = 1,185 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 10^4 = 1,778$; моделирование одного прохода в каждой из клеток.

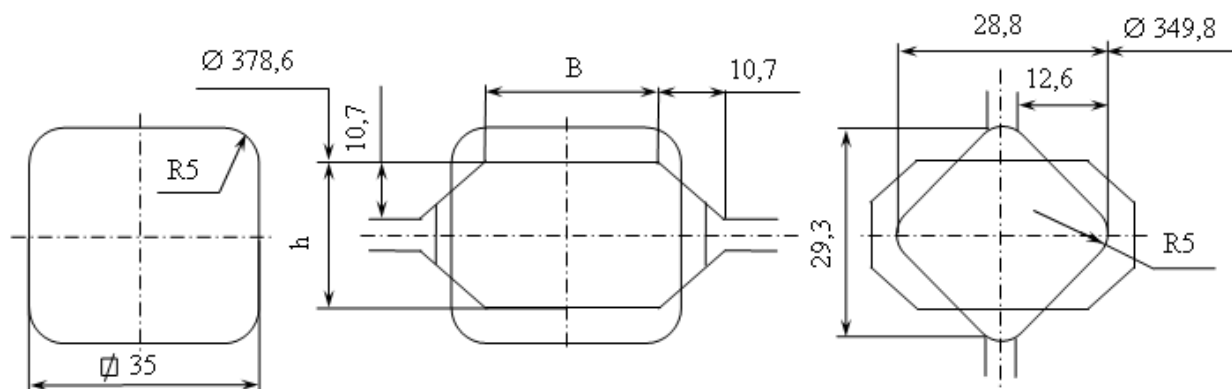


Рис. 5. Размеры заготовки и калибров

Таблица 1

Размеры неравноосных калибров, мм

Ширина калибра		Высота калибра	Зазор
по дну (В)	по врезу		
25,00	46,40	23,15	1,75
27,50	48,90	22,75	1,35
30,00	51,40	22,20	0,80
32,50	53,90	21,90	0,50
35,00	56,40	21,43	0,03

В одном из ранних исследований мы работали с этой системой калибров при оценке влияния форм различных неравноосных калибров на суммарный коэффициент эффективности, общую работу деформации и величину степени использования запаса пластичности на выходе из чистовой клетки. Неравноосный калибр с минимальной шириной по дну и максимальной высотой калибра обеспечил лучший результат по всем перечисленным показателям [6]. Поэтому мы ожидали получение схожих результатов при моделировании износа валков.

На рис. 6 представлены результаты моделирования износа для систем калибров шестиугольник-квадрат, в которых неравноосные шестиугольники имели ширину по дну 25, 30 и 35 мм соответственно.

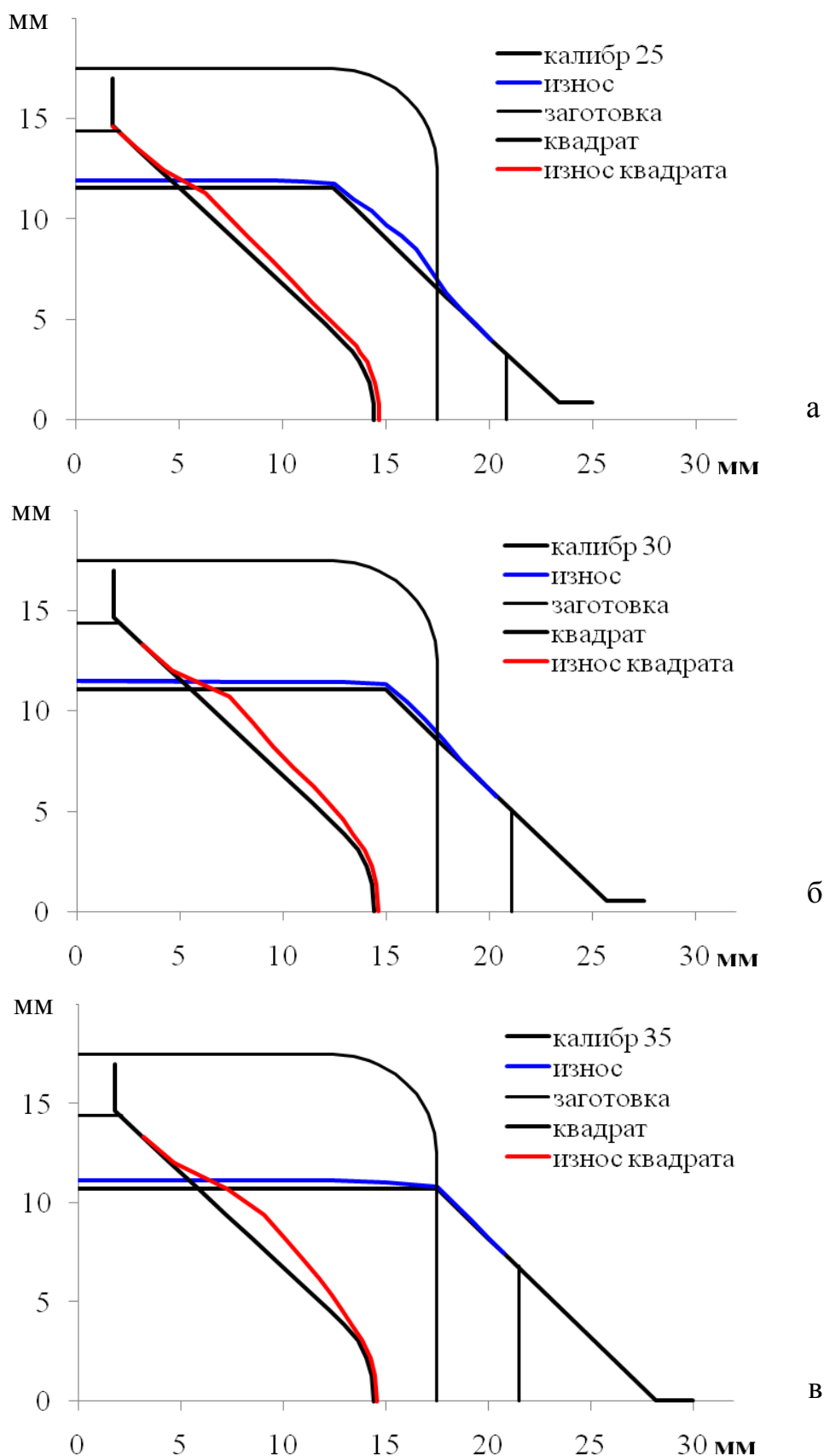


Рис. 6. Износ шестиугольных и квадратных калибров при использовании шестиугольного калибра шириной по дну 25 (а), 30 (б) и 35 мм (в)

Неравноосные калибры. Максимальный износ калибра с шириной по дну 25 мм приходится на выпуск (рис. 6а), а у калибров с шириной по дну 30 и 35 мм – на вертикальную ось калибра (рис. 6б и 6в). Более стеснённые условия деформации, бóльшая скорость износа, а в итоге и бóльшая величина переточки валка с узким шестиугольником приведут к сокращению срока службы валка.

Равноосные калибры. Форма раската после прокатки в широком шестиугольном калибре (ширина по дну 35 мм) приводит к увеличению разницы в уровне обжатия металла при движении от вертикальной оси к разъёму калибра. Абсолютное обжатие и длина дуги контакта по вертикальной оси калибра соответственно в 1,6 и 1,3 раза меньше, чем по месту максимального обжатия. Всё это ведёт к большей длительности контакта и высоким значениям интенсивности напряжений в плоскости максимального обжатия, которые ускоряют износ.

С другой стороны, узкий неравноосный калибр снижает неравномерность деформации раската в квадратном калибре. Длина дуги контакта и обжатие в разных точках калибра изменяются менее чем на 3%. В связи с этим форма калибра после 15 тыс. контактов совсем незначительно отклонилась от изначальной. Такой равномерный износ легко компенсировать уменьшением зазора между валками. В случаях на рис. 6б и 6в искажение формы получаемого раската неустранимо и необходим переход на новый чистовой калибр.

В целом, можно отметить, что в представленной системе шестиугольник-квадрат повышение стойкости квадратного калибра ведёт к падению стойкости шестиугольного и наоборот (рис. 7).

Однако стойкость равноосного калибра является более значимой, так как именно из него выпускаются сортовые профили простой формы. К тому же на сортовых станах стойкость неравноосных калибров в любой группе клеток всегда выше, поэтому можно ей пожертвовать ради увеличения срока службы валков с равноосными калибрами.

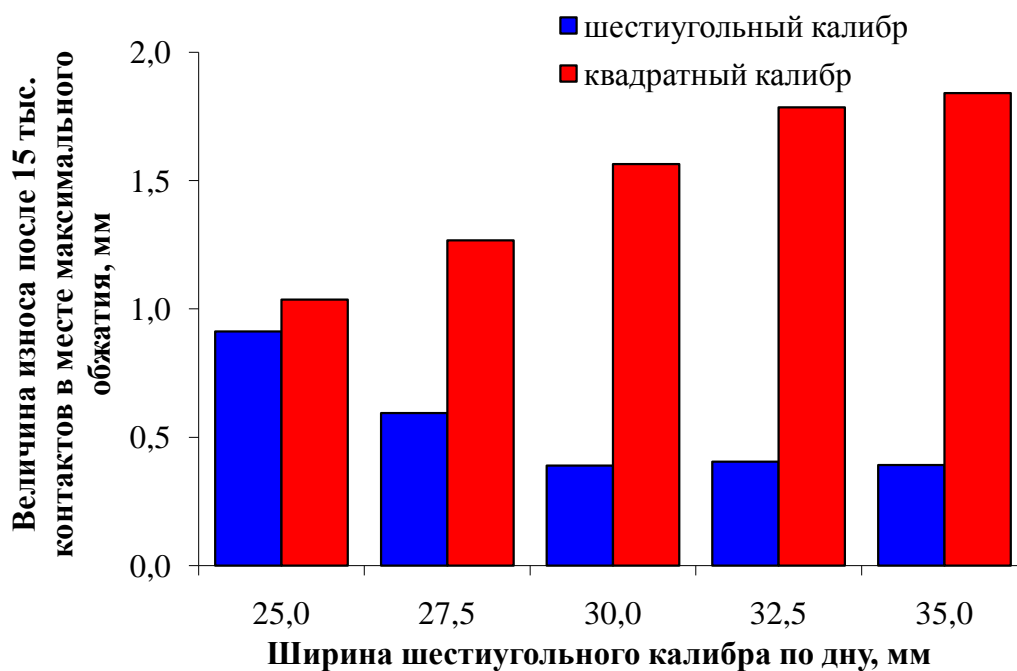


Рис. 7. Влияние ширины шестиугольного калибра на износ в обоих проходах

4. Заключение

Для адекватной оценки износа валков при прокатке сортовых профилей простой формы в программном комплексе DEFORM провели подготовительную работу для выбора значений коэффициента K в модели Аркхарда и ввели поправочный коэффициент тоннажа K_T для ускорения расчётов и выявления динамики изменения формы калибра. Это позволило смоделировать прокатку 300 тонн металла за пять проходов и получить результаты, которые согласуются с данными, полученными на стане 370 ОАО «ММК» как по значениям осевого износа, так и по характеру изменения формы калибра.

Полученное значение K можно считать базовым для расчёта K_T в других клетях стана при условии, что в них используются валки аналогичной твёрдости.

Моделирование износа в шестиугольных калибрах подтвердило наше предположение о преимуществах использования узких и высоких калибров, обеспечивающих более высокую стойкость чистового калибра наряду с боль-

шей эффективностью, меньшими энергозатратами и меньшими значениями степени использования запаса пластичности системы калибров шестиугольник-квадрат.

Следующим этапом работы станет оценка калибровки, используемой на стане 370 ОАО «ММК» с точки зрения износостойкости валков, и внесение изменений в калибровку для улучшения существующей ситуации.

Библиографический список

1. Рычков С.С. О выборе формы и размеров конечных элементов при моделировании процессов сортовой прокатки // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. Вып. 37. С. 146-151.

2. DEFORM 3D Version 10.0 User's manual. Columbus, Ohio, USA, 2009.

3. Эксплуатация валков обжимных и сортовых станов / Н.М. Воронцов, В.Т. Жадан, Б.Я. Шнееров, и др. Металлургия, 1973, 288 с.

4. Опыт эксплуатации валков ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» на сортопрокатных станах ОАО «ММК». И.В. Боровков, О.В. Пальчиков, С.Я. Унру, Т.Н. Зубков, Т.А. Мурзабаев, Р.В. Новицкий. // Совершенствование технологии в ОАО «ММК»: сб. науч. тр. / Центральная лаборатория ОАО «ММК». Вып. 14. Магнитогорск, 2009. С. 254-260.

5. Lee Y. Rod and bar rolling. Theory and applications. Marcel Dekker, Inc., New York, 2004. 465 p.

6. Кинзин Д.И., Рычков С.С. Исследование эффективности калибровки сортовых профилей с помощью программы DEFORM-3D // Труды международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2010». М.: РУДН, 2010. С. 133-136.