

УДК 621.771.27

д.т.н. Снитко С. А.
 (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, snitko_sa@mail.ru),
 Денищенко Н. П.
 (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, nd76696@gmail.ru),
 д.т.н. Яковченко А. В.
 (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, mond1991@mail.ru),
 к.т.н. Денищенко П. Н.
 (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, pavel.denischenko@gmail.com),
 к.т.н. Пилипенко В. В.
 (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, dvenaxa94@mail.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗНОСА РУЧЬЁВ ЧИСТОВОГО КРУГЛОГО КАЛИБРА ПРИ ПРОКАТКЕ ПРЕДЧИСТОВЫХ ОВАЛЬНЫХ РАСКАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

На базе конечно-элементного моделирования выполнены исследования процессов прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов (плоского овала, а также двухрадиусного, трехрадиусного и двух четырёхрадиусных овалов) в идентичных условиях в круглом калибре. При этом выполнен сравнительный анализ износа валков в зоне круглого калибра, скорости проскальзывания металла относительно валка и контактного давления. Показано, что чем меньше величина проскальзывания деформируемого металла относительно поверхности круглого калибра, тем меньше величина износа валка. Этому условию удовлетворяют двухрадиусный овал и четырёхрадиусный овал, полученный в специальном овальном калибре с вогнутым дном.

Ключевые слова: прокатка круглых профилей, предчистовой овал, конечно-элементное моделирование, износ валка в зоне круглого калибра, скорость проскальзывания металла относительно валка, контактное давление.

Повышение качества круглых профилей, получаемых прокаткой, является актуальной задачей. Её решение рассмотрено в работах [1–10] и др. На практике для прокатки круглых профилей широко применяется система калибров «овал — круг». При этом используются различные типы предчистовых овальных калибров, которые имеют свои преимущества и недостатки. Рациональная калибровка валков для прокатки предчистового овала должна обеспечить получение круглого профиля заданных размеров, высокой точности и хорошего качества, а также создать условия для наименьшего и равномерного износа валков.

Поставлена задача конечно-элементного моделирования процессов прокатки предчистовых овалов различных типов в круглом калибре и на этой основе установле-

ния закономерностей износа валков в зоне круглого калибра в зависимости от скорости проскальзывания металла относительно валка и контактного давления.

Исследование износа ручьёв круглого калибра при прокатке овальных раскатов различных типов выполняли на основе результатов конечно-элементного моделирования в системе Deform 3D.

В процессе расчета величины износа (W) учитывали только абразивный износ, при этом использовали модель Арчарда [9, 10]:

$$W = \int_0^t K \frac{p^a \mathcal{G}^b}{H^c} dt, \quad (1)$$

где \mathcal{G} , p — соответственно, скорость проскальзывания металла относительно инструмента и давление на контактной поверхности; K , a , b , c — эмпирические

коэффициенты; H — твердость материала валка; t — время протекания процесса.

Значения эмпирических коэффициентов в расчетах использовали следующие: $K=2 \cdot 10^{-6}$, $a=b=1$, $c=2$.

В системе Deform 3D использовали автоматический режим генерации конечно-элементной сетки с четырехузловыми тетраэдрами, имеющими размеры в диапазоне: на раскате 2,5–5 мм; на валке 1–5 мм (рис. 1). Это позволило адекватно описать геометрию раската до и после деформирования, а также исключить пробуксовку валков, связанную с занижением фактической площади контакта металла с валками, которое имеет место при использовании конечных элементов большего размера. Установлено, что дальнейшее измельчение сетки нецелесообразно, поскольку приводит к существенному повышению времени моделирования, не обеспечивая уточнение получаемых результатов расчета.

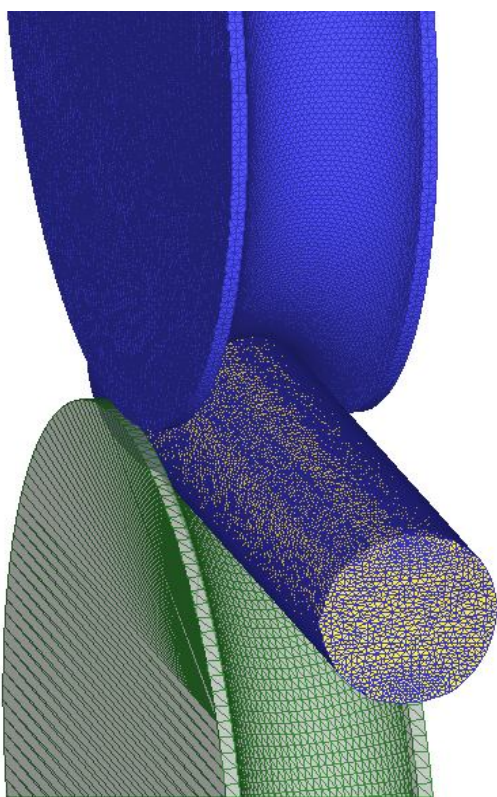


Рисунок 1 Объемная сетка валка и прокатываемого круглого профиля

Моделирование выполнялось для нестационарного теплового режима раската с учетом процессов теплообмена деформируемого металла с окружающей средой, а также с учетом теплового эффекта пластической деформации.

Моделирование процесса теплообмена выполнено на основе известной зависимости

$$q = A\alpha(t_s - t_c), \quad (2)$$

где q — тепловой поток; A — площадь поверхности, на которой происходит теплообмен; α — коэффициент теплообмена; t_s , t_c — температура поверхности металла и окружающей среды соответственно.

Температура окружающей среды и коэффициент конвекции были приняты постоянными и равными 20 °С и 100 Вт/(м²·°С) соответственно.

Коэффициент теплопередачи на контакте раската с валками равен 5000 Вт/(м²·°С). Температура валков принята постоянной и равной 50 °С.

Для овального раската использовали пластическую модель материала. В качестве материала использовали углеродистую качественную конструкционную сталь 45, для которой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяли из базы данных Deform 3D.

Для валков была выбрана модель недеформируемого материала. Расстояние между осями валков 589 мм. Скорость прокатки овального раската в круглом калибре принята 2,5 м/с.

Поведение материала раската в процессе решения описывается диаграммой «эквивалентное напряжение течения — эквивалентная деформация». При моделировании металл деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения. Расчёт напряжения течения металла выполнялся с учётом накопленной деформации, а также процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке по методу [11].

В качестве модели контактного трения принята известная сдвиговая модель:

$$\tau_{mp} = mk, \quad (3)$$

где τ_{mp} — напряжение трения; m — фактор трения, для условий горячей прокатки ($m = 0,7$); k — напряжение течения металла заготовки на сдвиг.

В процессе решения учитывали условие непроницаемости на контакте металла с валками.

Моделирование выполняли путем решения объемной задачи. Длина овального раската перед прокаткой в круглом калибре равнялась 500 мм, что позволило учесть влияние внешних зон и обеспечить наличие установившейся стадии прокатки. На указанной длине раската и выполнялся расчет износа валка по формуле (1) в зоне круглого калибра.

Реализация моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов в круглом калибре выполнена в системе Deform 3D. Адаптация метода конечно-элементного моделирования применительно к решению такого рода задач выполнена в работе [8]. Адаптация метода конечно-элементного моделирования износа инструмента деформирования металла выполнена в работе [12].

Результаты моделирования процесса прокатки предчистового овального раската по калибровке завода А (Днепропетцсталь) представлены на рисунке 2, по калибровке завода Б (Донецкий металлургический завод) — на рисунке 3, по калибровке завода В (Алчевский металлургический комбинат) — на рисунке 4, по усовершенствованным калибровкам — на рисунках 5–10. Вытяжка при прокатке пяти указанных овалов в круглом чистовом калибре, показанном на рисунках 6 и 9, равна 1,217.

Калибр завода А (рис. 2, а) представляет собой двухрадиусный овал. Имеет место значительная разновременность захвата овального раската (рис. 2, б). При этом наибольшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а

наименьшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр завода Б (рис. 3, а) представляет собой плоский овал. Имеет место значительная разновременность захвата овального раската (рис. 3, б). При этом наименьшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наибольшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр завода В (рис. 4, а) представляет собой специальный трехрадиусный овал. Имеет место некоторая разновременность захвата овального раската (рис. 4, б). При этом наименьшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наибольшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр, показанный на рисунках 6 и 7, а, представляет собой специальный четырехрадиусный овал с выпуклым дном. В этом случае обеспечивается одновременный захват овального раската (рис. 7, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации по ширине круглого калибра. Калибровка овала разработана (рис. 5) на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [7 и др.].

Калибр, показанный на рисунках 9 и 10, а, представляет собой специальный четырехрадиусный овал с вогнутым дном. В этом случае обеспечивается одновременный захват овального раската по дну и части боковых стенок круглого калибра (рис. 10, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации в указанной зоне. Калибровка овала разработана (рис. 8) на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [7] и др.

Представление о распределении износа валка в зоне круглого калибра при прокатке в идентичных условиях предчистовых овальных раскатов различных типов дают рисунки 2–4, в, 7, в, 10, в.

Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов, показанные на рисунках 2–4, з, 7, з, 10, з, позволяют судить о скорости проскальзывания

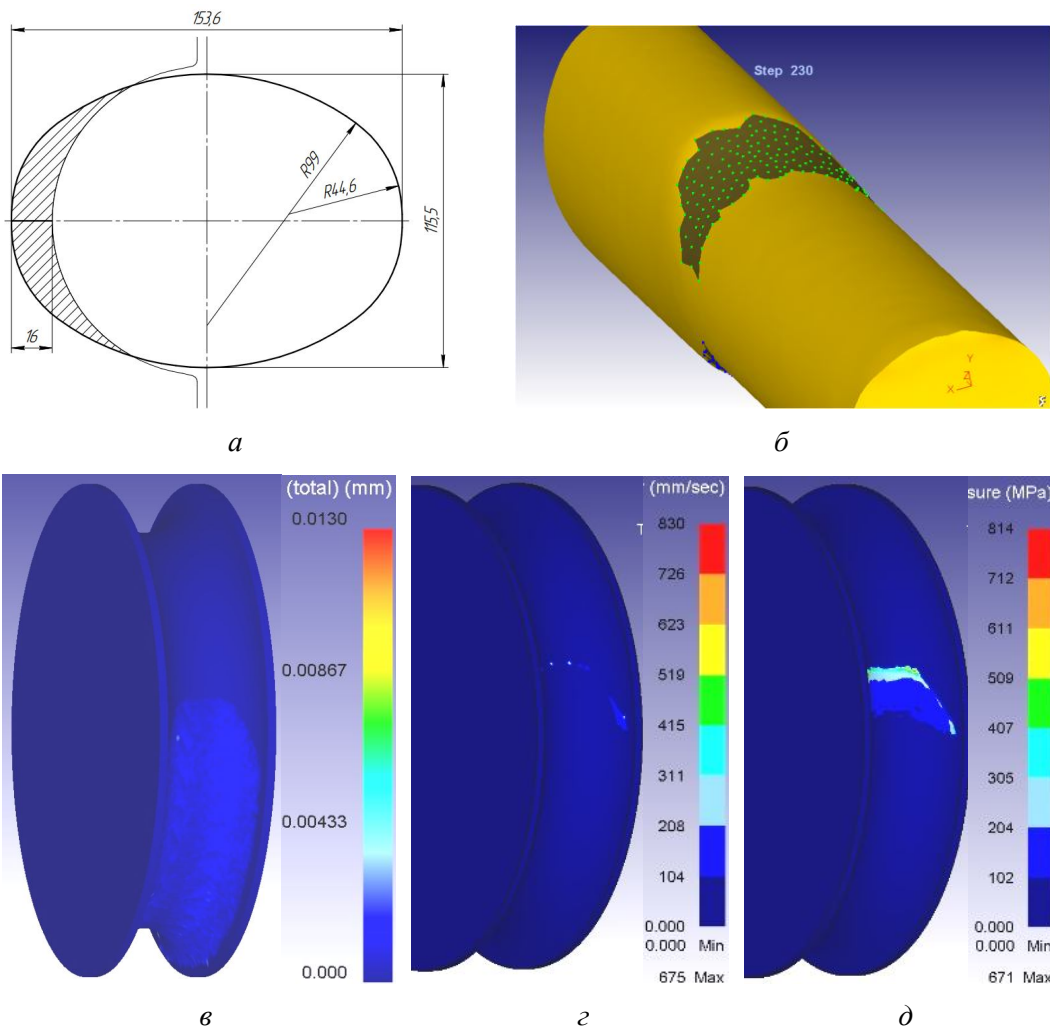
металла относительно валка, которая оказывает существенное влияние на износ валка.

Распределение давления на контактных поверхностях, также оказывающего влияние на износ валка при прокатке предчистовых овальных раскатов различных типов, показано на рисунках 2–4, *д*, 7, *д*, 10, *д*.

Полученные результаты показали, что наименьший износ валков в зоне круглого калибра получен при конечно-элементном моделировании процессов прокатки

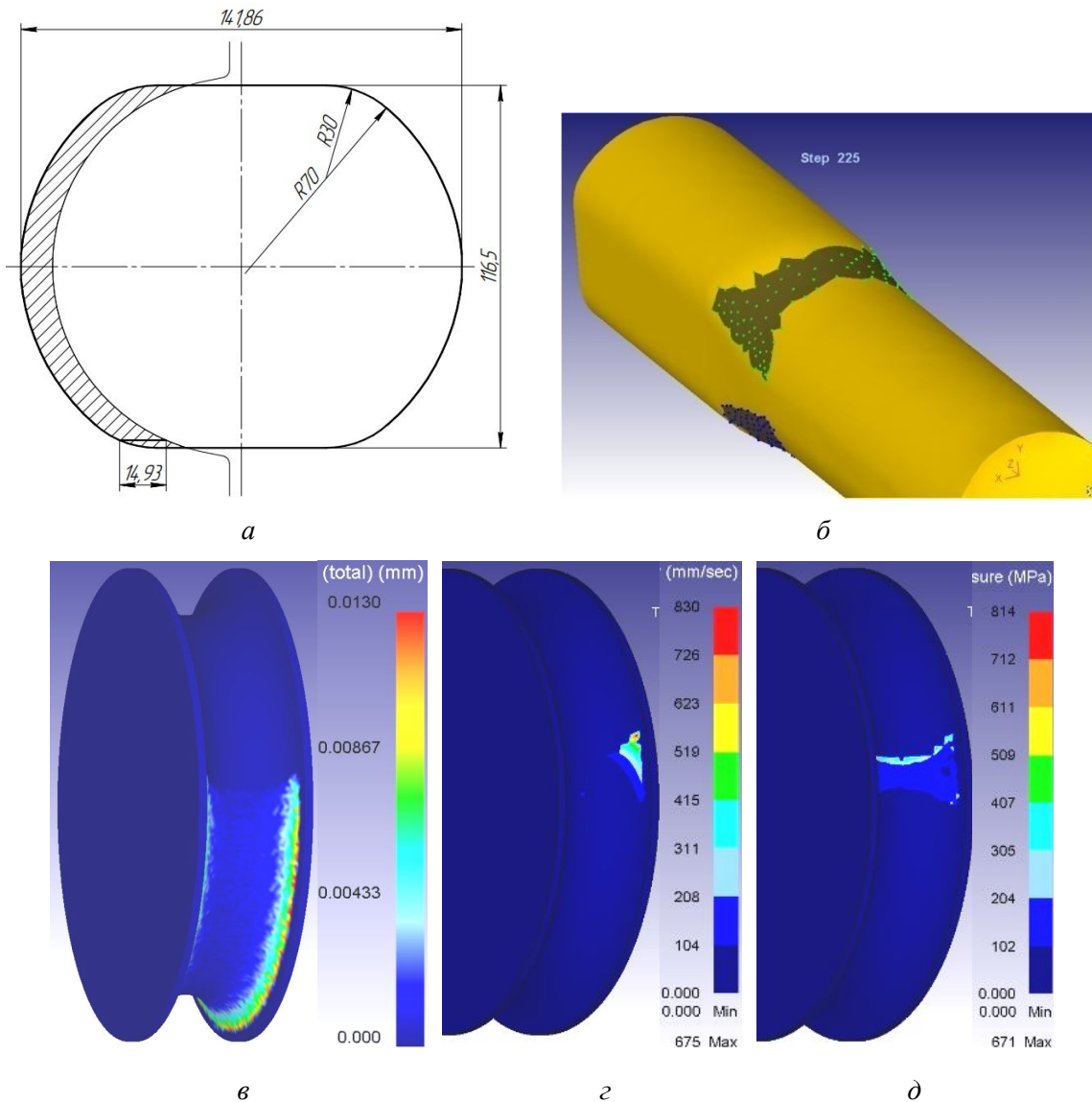
овальных раскатов, представленных на рисунках 2, *а* и 10, *а*. Далее по мере возрастания износа следуют овальные раскаты, представленные на рисунках 7, *а*, 4, *а*, 3, *а*.

Полученные результаты по скорости проскальзывания металла относительно валков показали, что наименьшие значения получены при прокатке овальных раскатов, представленных на рисунках 2, *а* и 10, *а*, далее по мере возрастания следуют овальные раскаты, представленные на рисунках 4, *а*, 7, *а*, 3, *а*.



а — чертеж предчистового овала; *б* — конфигурация очага деформации; *в*, *г*, *д* — распределение износа валка в зоне круглого калибра, скорости проскальзывания металла относительно валка, контактного давления соответственно

Рисунок 2 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската по калибровке завода А в круглом калибре



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение износа валка в зоне круглого калибра, скорости проскальзывания металла относительно валка, контактного давления соответственно

Рисунок 3 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската по калибровке завода Б в круглом калибре

Полученные результаты по давлению на контактных поверхностях показали, что наименьшие значения получены при прокатке овального раската, представленного на рисунке 3, а, далее по мере возрастания следуют овальные раскаты, представленные на рисунках 4, а, 7, а, 2, а и 10, а.

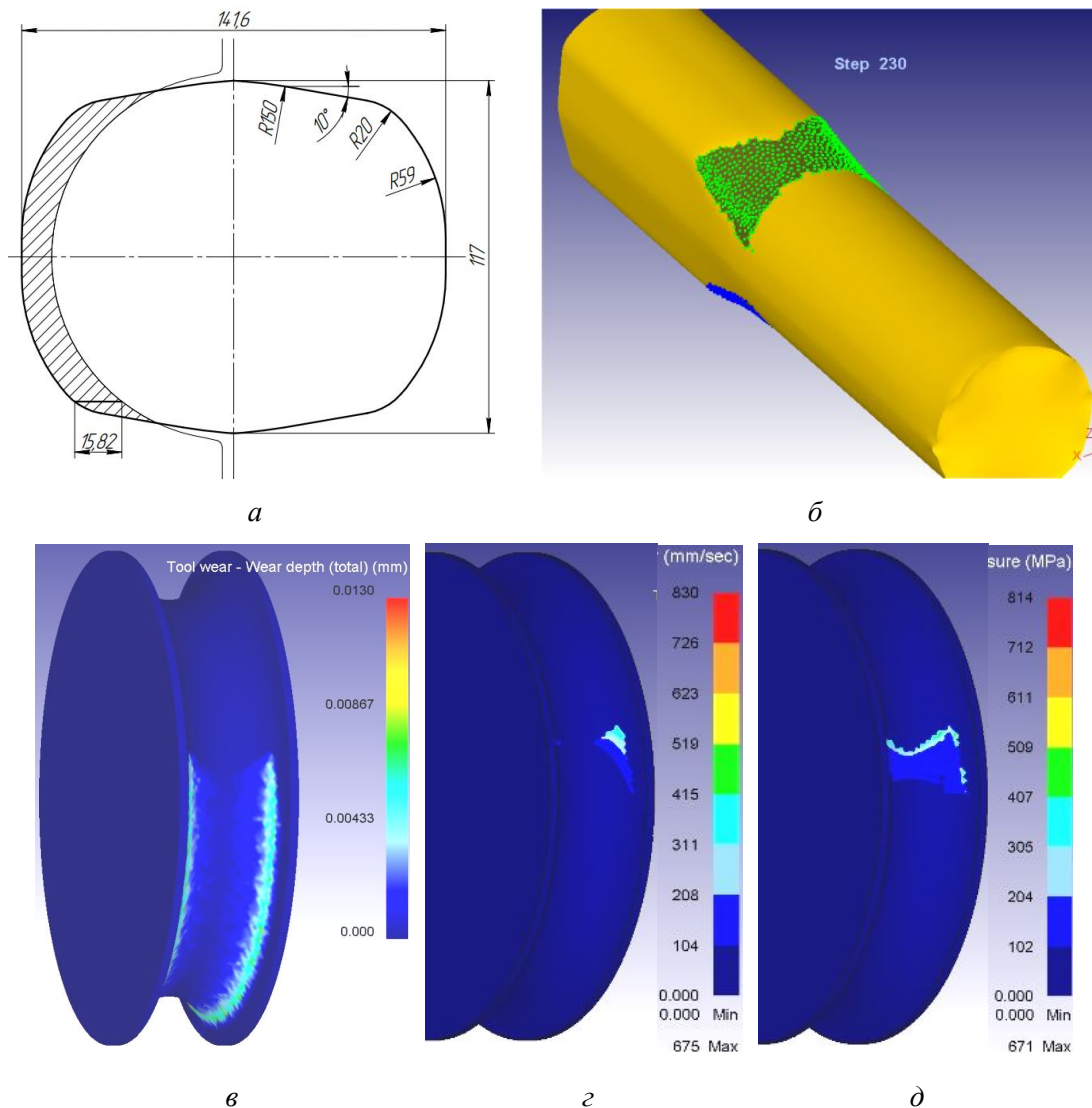
Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что наиболее существенное влияние на износ оказывает именно

скорость проскальзывания металла относительно валка. Так, наименьший износ валков в зоне круглого калибра получен при прокатке овальных раскатов, представленных на рисунках 2, а и 10, а, где значения этого фактора минимальны. И это несмотря на то, что в этих процессах значения давления на контактных поверхностях получены наибольшие. Показано, что в указанных процессах наименьшая длина очага дефор-

мации получена именно в зонах боковых стенок ручьев калибров (рис. 2, б, 10, б), где как раз и имеют место наименьшие значения скоростей проскальзывания металла относительно валка (до 200 мм/с).

Наибольший износ валка в зоне круглого калибра получен при прокатке овального раската, представленного на рисунке 3, а. В этом случае значения скоростей проскальзывания металла относительно валка мак-

симальны, а значения давления на контактных поверхностях получены наименьшие. Показано, что в указанном процессе наибольшая длина очага деформации получена именно в зонах боковых стенок его ручьев (рис. 3, б), где как раз и имеют место наибольшие значения скоростей проскальзывания металла относительно валка (до 730 мм/с) и получен максимальный износ валка.



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение износа валка в зоне круглого калибра, скорости проскальзывания металла относительно валка, контактного давления соответственно

Рисунок 4 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската по калибровке завода В в круглом калибре

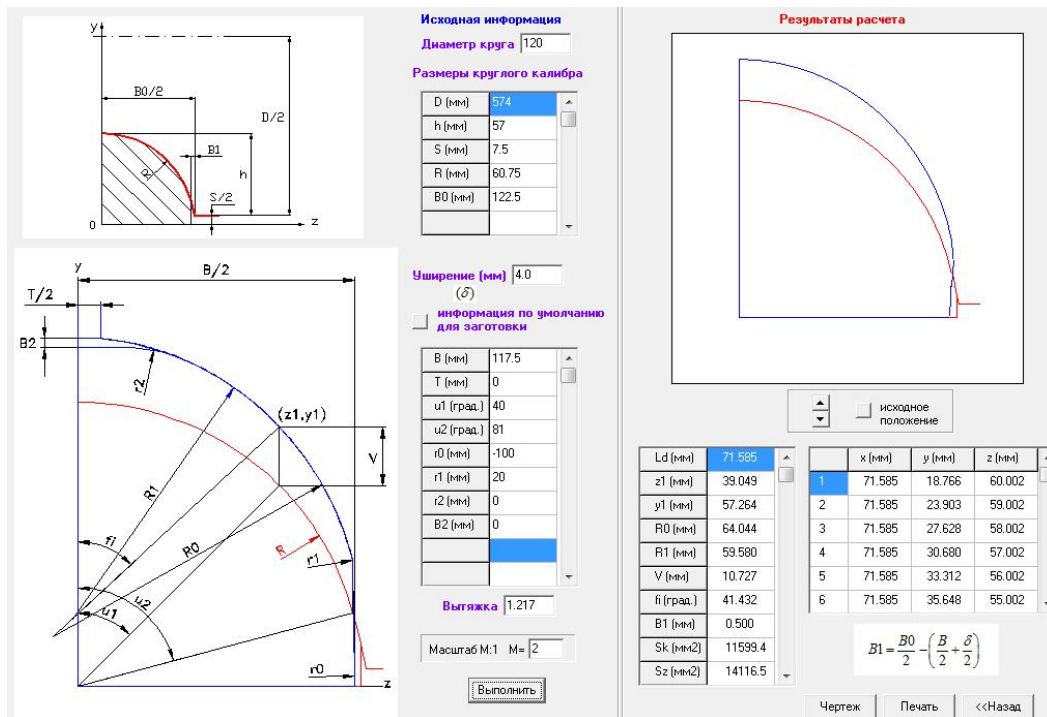


Рисунок 5 Проектирование овального раската, полученного в специальном четырёхрадиусном овальном калибре с выпуклым дном

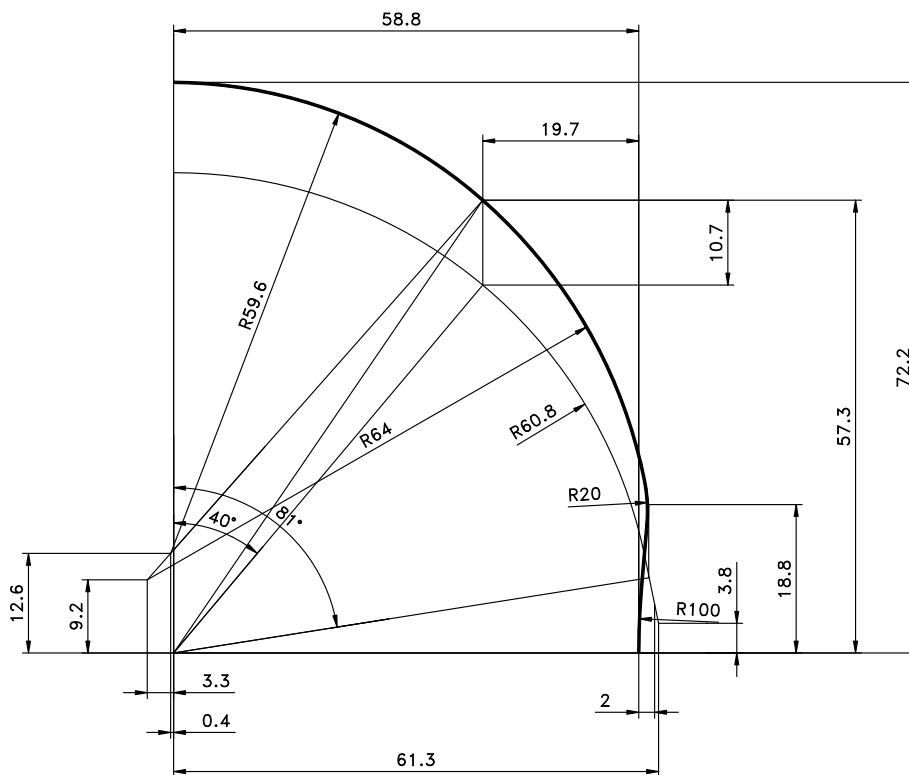
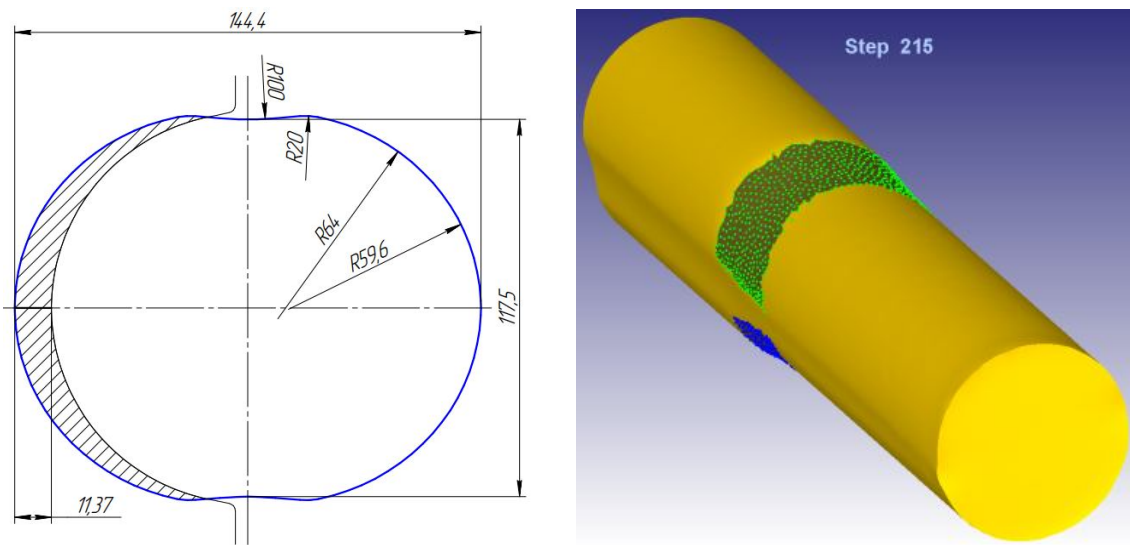
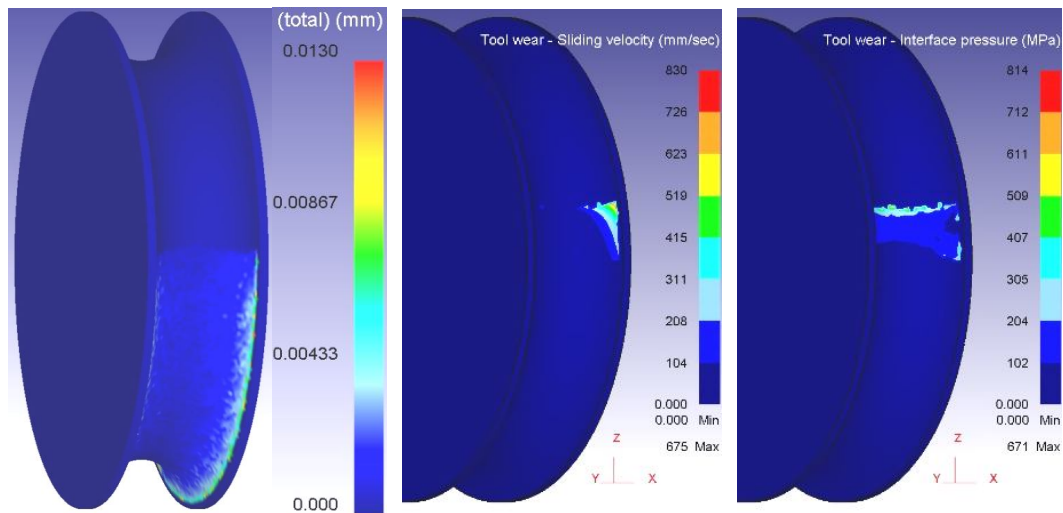


Рисунок 6 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром для прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортом стане «600» (проектирование выполнено в окне программы, показанном на рисунке 5)



а

б



в

г

д

а — чертеж предчистового овала; **б** — конфигурация очага деформации; **в, г, д** — распределение износа валка в зоне круглого калибра, скорости проскальзывания металла относительно валка, контактного давления соответственно

Рисунок 7 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската (по калибровке, представленной на рисунках 5, 6) в круглом калибре

Исходная информация
Диаметр круга 120

Размеры круглого калибра

D (мм)	574
h (мм)	57
S (мм)	7.5
R (мм)	60.75
B0 (мм)	122.5

Уширение (мм) (δ) 5.5

информация по умолчанию для заготовки

Выяжка 1.217

Масштаб M:1 M=2

Выполнить

Результаты расчета

Ld (мм)	82.773
z1 (мм)	30.375
y1 (мм)	67.459
R0 (мм)	61.406
R1 (мм)	58.510
V (мм)	14.848
fi (град.)	31.650
B1 (мм)	0.750
Sk (мм ²)	11592.6
Sz (мм ²)	14108.2

	x (мм)	y (мм)	z (мм)
1	82.773	60.952	39.049
2	82.773	61.866	38.048
3	82.773	62.704	37.047
4	82.773	63.506	36.046
5	82.773	64.275	35.044
6	82.773	65.012	34.043

$$B1 = \frac{B0}{2} - \left(\frac{B}{2} + \frac{\delta}{2} \right)$$

Чертеж Печать <<Назад

Рисунок 8 Проектирование овального раската, полученного в специальном четырёхрадиусном овальном калибре с вогнутым дном

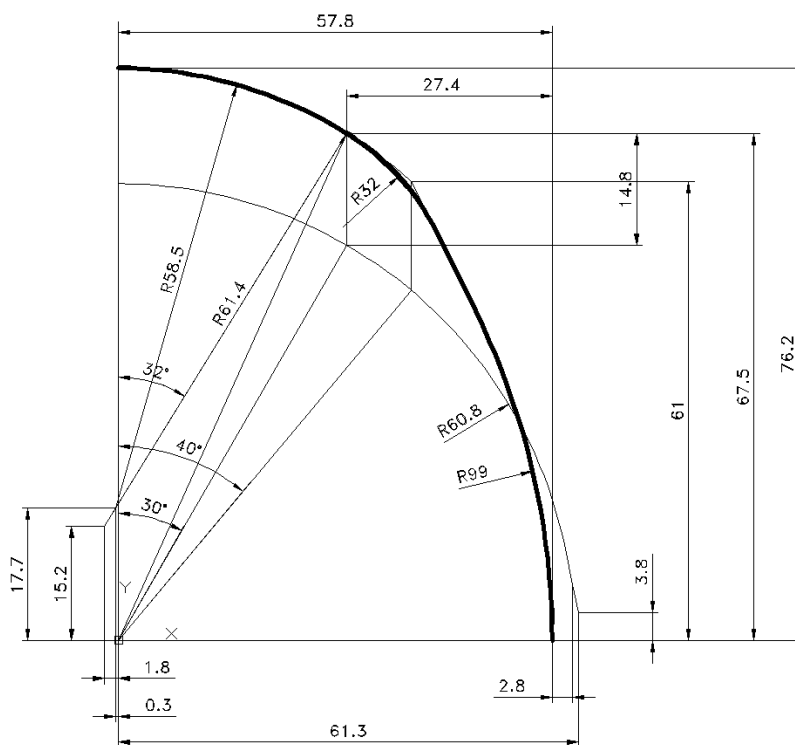
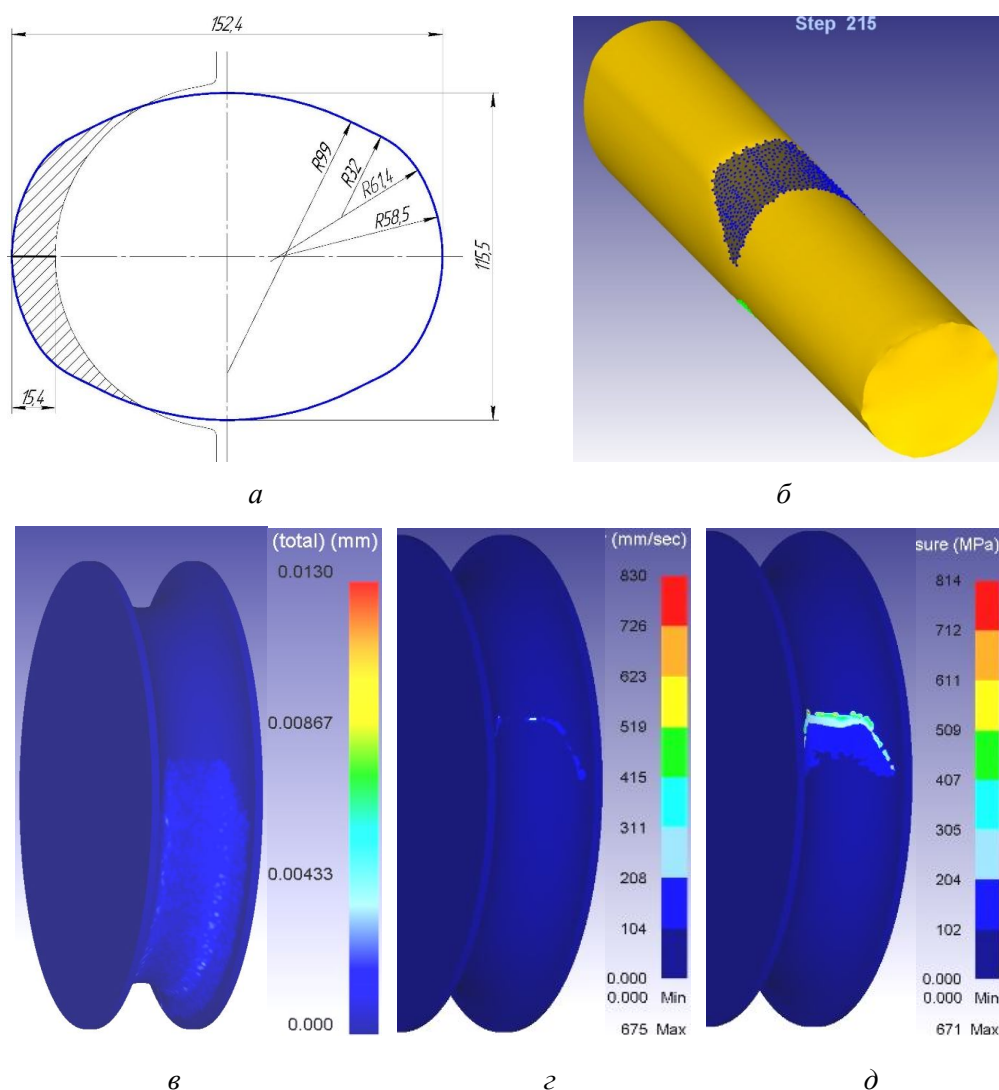


Рисунок 9 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром для прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортом стане «600» (проектирование выполнено в окне программы, показанном на рисунке 8)



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение износа валка в зоне круглого калибра, скорости проскальзывания металла относительно валка, контактного давления соответственно

Рисунок 10 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската (по калибровке, представленной на рисунках 8, 9) в круглом калибре

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. На базе конечно-элементного моделирования выполнены комплексные исследования износа валков в зоне круглого калибра при прокатке предчистовых овальных раскатов различных типов (плоского овала, двухрадиусного, трехрадиусного, а также двух четырехрадиусных овалов).

2. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что наиболее существенное влияние на износ оказывает ско-

рость проскальзывания металла относительно валка. Так, наименьший износ валков в зоне круглого калибра получен при прокатке двухрадиусного овала и четырехрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с вогнутым дном. И это несмотря на то, что в этих процессах значения давления на контактных поверхностях получены наибольшие. Показано, что в указанных процессах наименьшая длина очага деформации получена именно в зонах боковых стенок ручьев калибров,

где как раз и имеют место наименьшие значения скоростей проскальзывания металла относительно валка (до 200 мм/с).

3. Наибольший износ валка в зоне круглого калибра получен при прокатке плоского овала. В этом случае значения скоростей проскальзывания металла относительно валка максимальны, а значения давления на контактных поверхностях получены наименьшие. Показано, что в указанном процессе наибольшая длина очага

деформации получена именно в зонах боковых стенок его ручьев, где как раз и имеют место наибольшие значения скоростей проскальзывания металла относительно валка (до 730 мм/с) и где получен максимальный износ валка.

4. Направление дальнейших исследований связано с исследованием износа валков при прокатке предчистового овального раската в круглом калибре в условиях промышленного производства.

Библиографический список

1. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка [Текст] : справочник. В 6 т. Т. 1 / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под ред. Б. М. Илюковича. — Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. — 506 с.
2. Чекмарев, А. П. Калибровка прокатных валков [Текст] / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машиковцев. — М. : Металлургия, 1971. — 512 с.
3. Бахтинов, Б. П. Калибровка прокатных валков [Текст] / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. — М. : Металлургияиздат, 1953. — 784 с.
4. Бахтинов, В. Б. Технология прокатного производства [Текст] / В. Б. Бахтинов. — М. : Металлургия, 1983. — 486 с.
5. Hong, H. Roll pass design and simulation on continuous rolling of alloy steel round bar [Text] / H. Hong // Procedia Manufacturing : 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019). — 2019. — Vol. 37. — P. 127–131.
6. Бочков, Н. Г. Производство качественного металла на современных сортовых станах [Текст] / Н. Г. Бочков. — М. : Металлургия, 1988. — 312 с.
7. Развитие теории и технологии прокатки круглых профилей [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2022. — Вып. 25 (68). — С. 32–45.
8. Снитко, С. А. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, В. В. Пилипенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 23 (66). — С. 32–39.
9. Дья, Х. Теоретический анализ износа калибров в процессе прокатки круглых прутков [Текст] / Х. Дья, М. Сыгут // Вестник МГТУ им. Г. Н. Носова. — 2013. — № 3. — С. 41–47.
10. Рычков, С. С. Моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы [Текст] / С. С. Рычков, Д. И. Кинзин // Калибровочное бюро. — 2013. — Вып. 1. — С. 29–42.
11. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей [Текст] / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // Металл и литье Украины. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.
12. Снитко, С. А. Износ инструмента деформации при штамповке колесных заготовок [Текст] / С. А. Снитко, А. Л. Сотников, А. В. Яковченко // Вестник ДонНТУ. — 2018. — № 2 (12). — С. 9–15.

© Снитко С. А.
 © Денищенко Н. П.
 © Яковченко А. В.
 © Денищенко П. Н.
 © Пилипенко В. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
к.т.н., доц., пом. нач. СПЦ по технологии
Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Чичканом А. А.*

Статья поступила в редакцию 15.12.2022.

Doctor of Technical Sciences Snitko S. A. (*DonNTU, Donetsk, DPR, snitko_sa@mail.ru*),

Denishchsenko N. P. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, nd76696@gmail.ru*),

Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V. (*DonNTU, Donetsk, DPR, mond1991@mail.ru*),

PhD in Engineering Denishchsenko P. N. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, pavel.denischenko@gmail.com*),

PhD in Engineering Pilipenko V. V. (*DonNTU, Donetsk, DPR, dvenaxa94@mail.ru*)

**STUDYING THE WEAR REGULARITIES OF PASSES OF THE FINISHING ROUND
GROOVE AT ROLLING PRE-FINISHING OVAL ROLLS OF VARIOUS TYPES**

On the basis of the finite-element modeling, studies of the processes of rolling pre-finishing oval rolls of various types (flat oval, as well as two-radius, three-radius and two four-radius ovals) under identical conditions in a round groove were carried out. At the same time, a comparative analysis of the wear of the rolls in the round groove zone, the rate of metal slippage relative to the roll and the contact pressure was performed. It is shown that the smaller the amount of slippage of the deformable metal relative to the surface of the round groove, the smaller the amount of roll wear. This condition is satisfied by a two-radius oval and a four-radius oval obtained in a special oval groove with a concave bottom.

Key words: *rolling of round profiles, pre-finishing oval, finite-element modeling, roll wear in the round groove zone, metal slip rate relative to the roll, contact pressure.*