

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*)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧАГОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРЕДЧИСТОВЫХ ОВАЛЬНЫХ РАСКАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ

На базе конечно-элементного моделирования выполнены комплексные исследования основных параметров очагов деформации при прокатке предчистовых овальных раскатов различных типов (плоского овала, а также двухрадиусного, трехрадиусного и двух четырёхрадиусных овалов) в идентичных условиях в круглом калибре. Выполнен сравнительный анализ калибровок по разновременности захвата овального раската, степени охвата овального раската по его периметру ручьями круглого калибра, неравномерности деформации металла, величине и распределению нормальных напряжений. Показано, что использование четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, имеет преимущества.

Ключевые слова: *прокатка круглых профилей, предчистовой овал, конечно-элементное моделирование, разновременность захвата овального раската, охват овального раската по его периметру, неравномерность деформации металла, нормальные напряжения.*

Повышение качества круглых профилей, получаемых прокаткой, является актуальной задачей. Её решение рассмотрено в работах [1–11 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 плавного и надежного захвата металла валками, устойчивого положения раската в круглом калибре, наименьшего и равномерного износа валков. Разработка указанной калибровки требует учитывать закономерности течения металла в круглом калибре.

На практике установлены следующие известные положения [1–4]:

– разновременность захвата овального раската и неравномерность деформации металла валками по ширине круглого калибра отрицательно сказываются на качестве наружной поверхности горячекатаного металла, в том числе повышают вероятность появления трещин и других дефектов на поверхности круглых профилей;

– обеспечение сечения профиля овального раската, полностью соответствующего вертикальному сечению круглого калибра в плоскости захвата, улучшает устойчивость полосы в момент захвата;

– практически полный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра уменьшает глубину наружных пороков сталеплавильного происхождения и возможность образования дефектов прокатного производства.

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

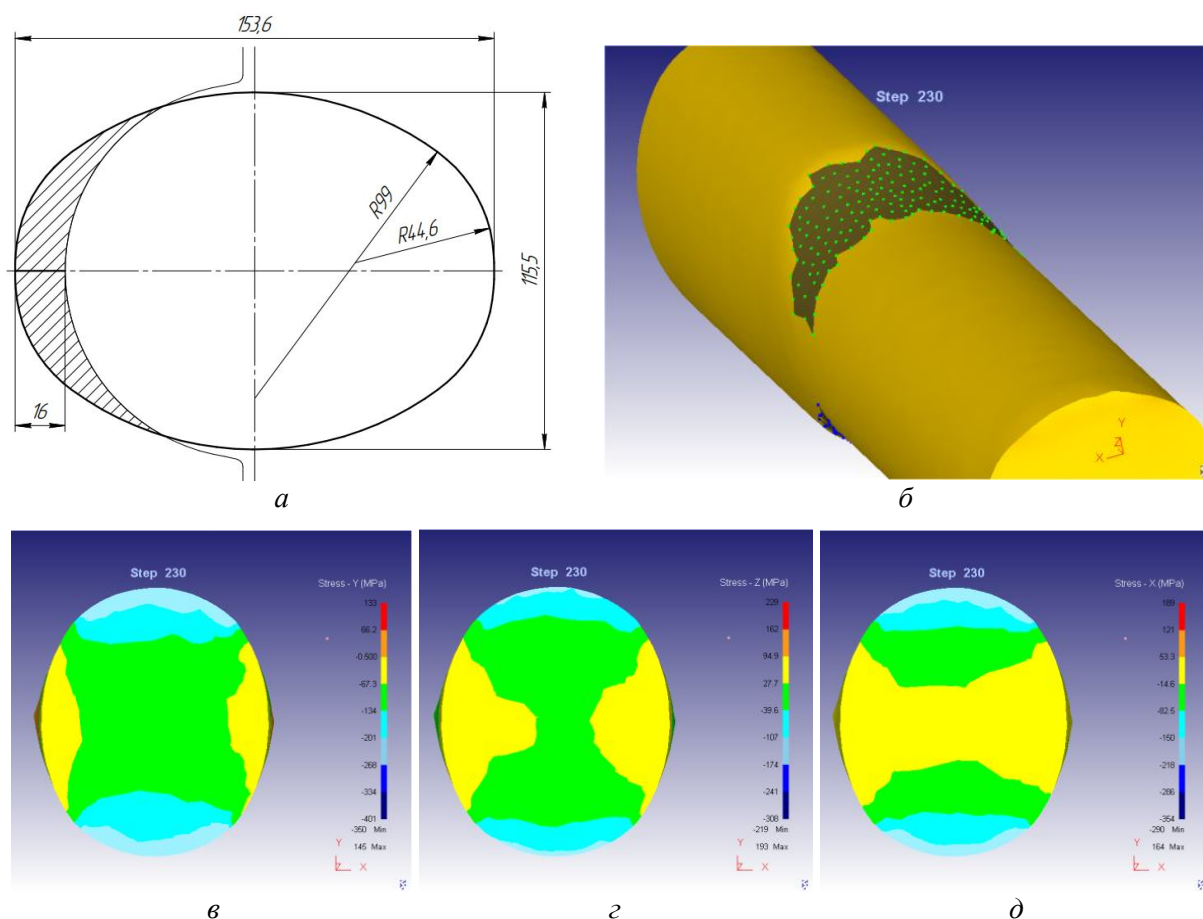
номерностей напряженно-деформированного состояния металла. Планируется выполнить сравнительный анализ основных параметров очагов деформации при прокатке в круглом калибре овалов различных типов и усовершенствованных предчистовых овалов.

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 [9]. Методика исследований изложена в работах [7, 9].

Результаты моделирования процесса прокатки предчистового овального раската по калибровке завода А (Днепропетцсталь)

представлены на рисунке 1, по калибровке завода Б (Донецкий металлургический завод) — на рисунке 2, по калибровке завода В (Алчевский металлургический комбинат) — на рисунке 3, по усовершенствованным калибровкам — на рисунках 4–9. Вытяжка при прокатке указанных овалов в круглом чистовом калибре, показанном на рисунках 5 и 8, равна 1,217.

Калибр завода А (рис. 1, а) представляет собой двухрадиусный овал. Имеет место значительная разновременность захвата овального раската (рис. 1, б). При этом наибольшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наименьшая — в зонах боковых стенок его ручьев.



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 1 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската по калибровке завода А в круглом калибре

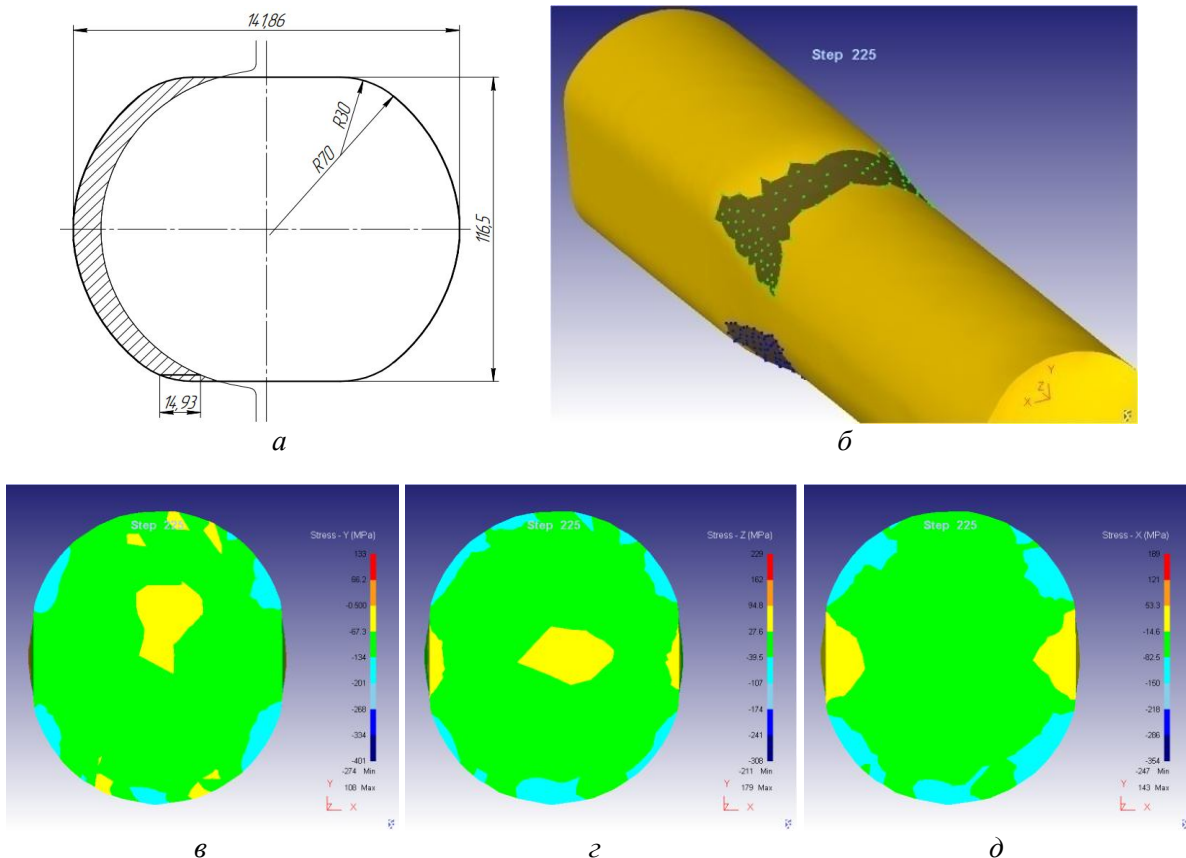
Калибр завода Б (рис. 2, а) представляет собой плоский овал. Имеет место значительная разновременность захвата овального раската (рис. 2, б). При этом наименьшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наибольшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр завода В (рис. 3, а) представляет собой специальный трехрадиусный овал. Имеет место некоторая 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, показанный на рисунках 5 и 6, а, представляет собой специальный четырёхрадиусный овал с выпуклым дном. В этом

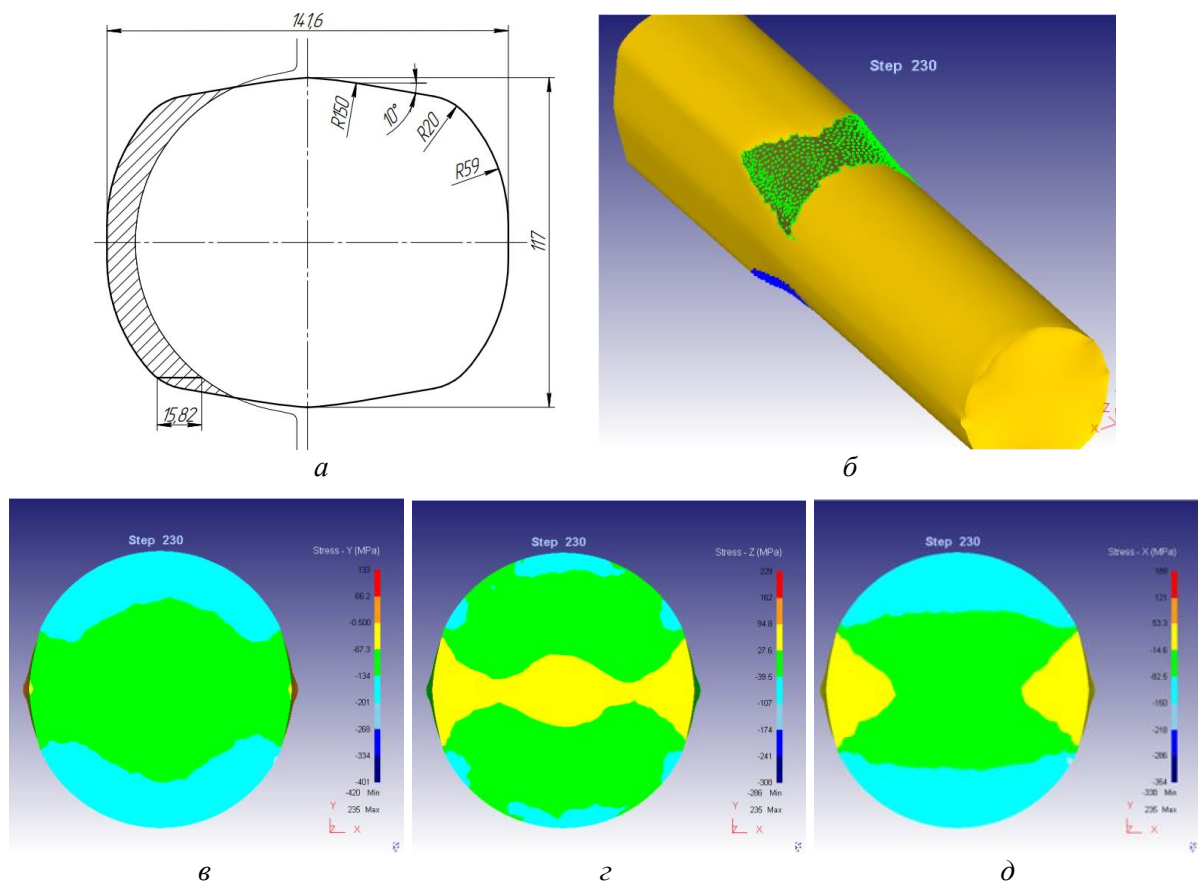
случае обеспечивается одновременный захват овального раската (рис. 6, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации по ширине круглого калибра. Калибровка овала разработана на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [6, 8].

Калибр, показанный на рисунках 8 и 9, а, представляет собой специальный четырёхрадиусный овал с вогнутым дном. В этом случае обеспечивается одновременный захват овального раската по дну и части боковых стенок круглого калибра (рис. 9, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации в указанной зоне. Калибровка овала разработана на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [6, 8].



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

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



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

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

Представление о неравномерности деформации металла валками по ширине круглого калибра применительно к каждому из пяти типов предчистовых овалов дают рисунки 1–3, а, 6, а, 9, а. Неравномерность деформации по каждой калибровке оценивали отклонением значения максимального обжатия от значения среднего приведенного обжатия по ширине калибра. Среднее приведенное обжатие по каждой калибровке находили как частное от деления площади заштрихованной зоны (показанной на каждом из указанных рисунков) на высоту этой зоны. Для калибровки А указанное отклонение составило 24,2 %, для калибровки Б — 32,9 %, для калибровки В — 29,4 %, для калибровки, показанной на рисунке 6, а, — 6,2 %, для ка-

либровки, показанной на рисунке 9, а, — 19,7 %. Наибольшая неравномерность деформации по указанному показателю получена по калибровке Б, наименьшая — по усовершенствованной калибровке, показанной на рисунке 6, з. Неравномерность деформации по каждой калибровке оценили также отклонением относительного обжатия, соответствующего максимальному абсолютному обжатию, от относительного обжатия, соответствующего абсолютному среднему приведенному обжатию. Для калибровки А указанное отклонение составило 0,5 %, для калибровки Б — 86,7 %, для калибровки В — 65,0 %, для калибровки, показанной на рисунке 6, а, — 15,1 %, для калибровки, показанной на рисунке 9, а, — 7,1 %.

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) 4.0 (δ)

информация по умолчанию для заготовки

B (мм)	117.5
T (мм)	0
u1 (град.)	40
u2 (град.)	81
r0 (мм)	-100
r1 (мм)	20
r2 (мм)	0
B2 (мм)	0

Вытяжка 1.217

Масштаб M:1 M=2

Результаты расчета

Ld (мм)	71.585
z1 (мм)	39.049
y1 (мм)	57.264
R0 (мм)	64.044
R1 (мм)	59.580
V (мм)	10.727
φ (град.)	41.432
B1 (мм)	0.500
Sk (мм ²)	11599.4
Sz (мм ²)	14116.5

	x (мм)	y (мм)	z (мм)
1	71.585	18.766	60.002
2	71.585	23.903	59.002
3	71.585	27.628	58.002
4	71.585	30.680	57.002
5	71.585	33.312	56.002
6	71.585	35.648	55.002

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

Рисунок 4 Проектирование овального раската, полученного в специальном четырёхрадиусном овальном калибре с выпуклым дном

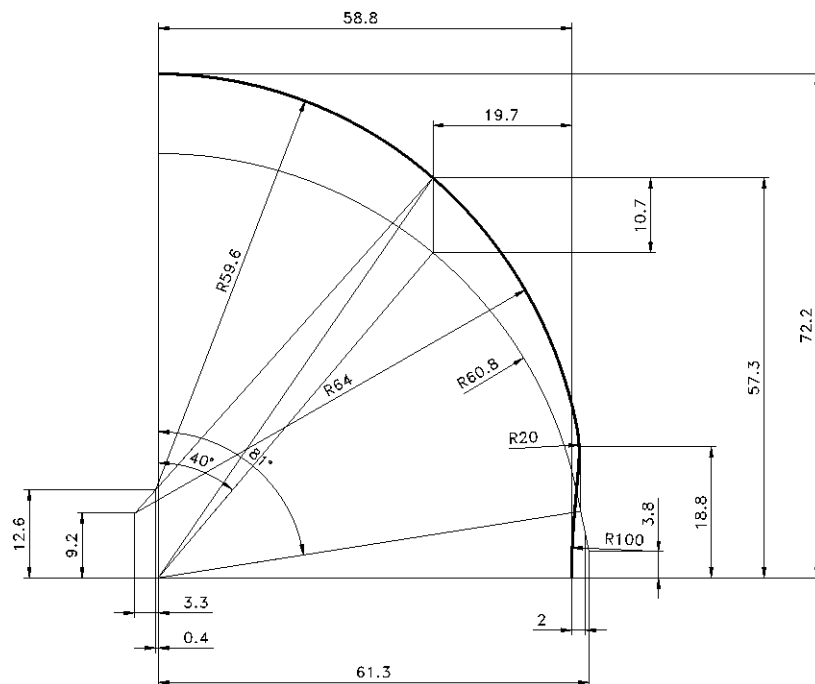
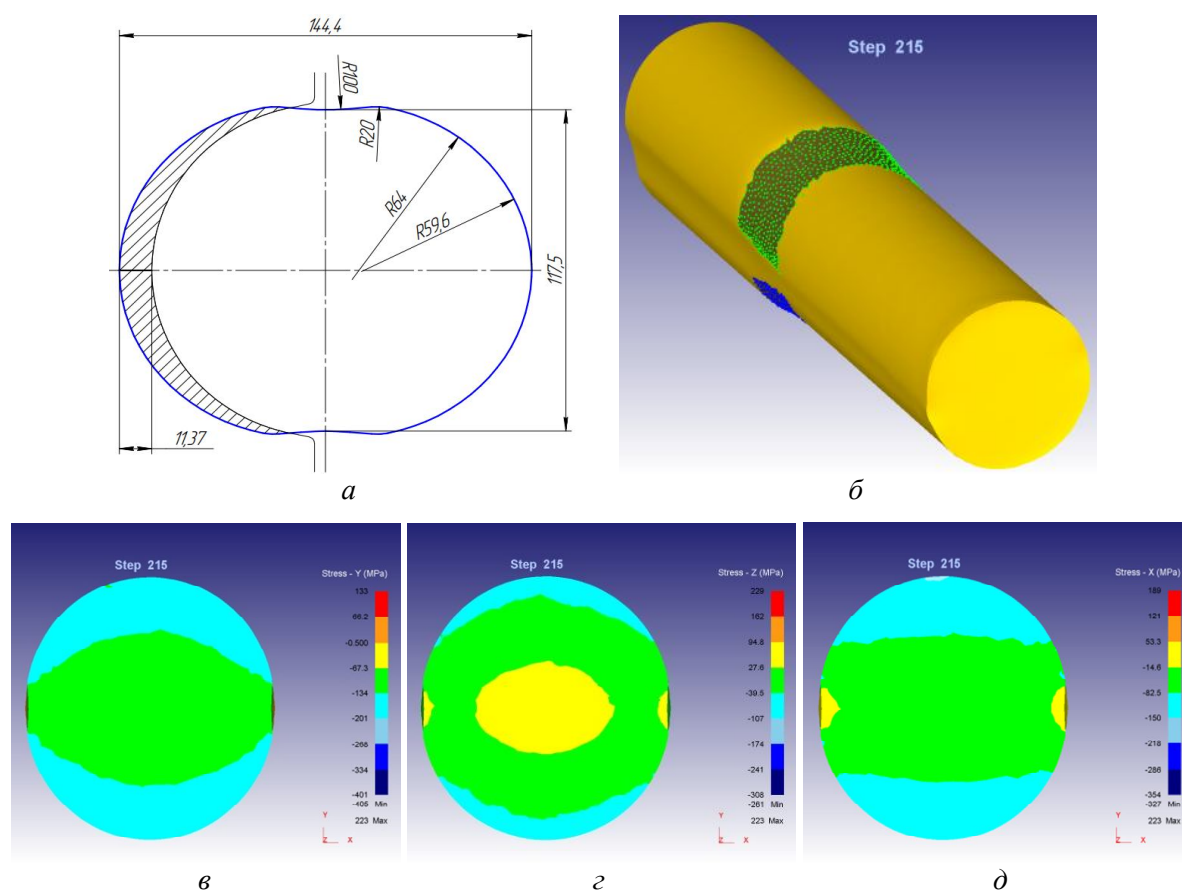


Рисунок 5 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром для прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортном стане «600» (проектирование выполнено в окне программы, показанном на рисунке 4)



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 6 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската (по калибровке, представленной на рисунках 4, 5) в круглом калибре

Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов, показанные на рисунках 1–3, б, 6, б, 9, б, позволяют судить о степени охвата овального раската по его периметру ручьями круглого калибра, причем как при захвате, так и по всей длине очага деформации. Так, по калибровке А захват начинается по дну круглого калибра, соответственно, охват овального раската отсутствует. По калибровке Б захват начинается на небольших участках боковых стенок круглого калибра, соответственно, охват овального раската выполняется только по ним. По калибровке В захват начинается в зоне перехода дна круглого калибра в его боковые

стенки и достаточно быстро распространяется на всё дно калибра. То есть охват овального раската после захвата выполняется практически по дну круглого калибра. По калибровке, показанной на рисунке 9, б, одновременный захват начинается по дну и части боковых стенок круглого калибра, соответственно, охват овального раската выполняется в указанной зоне. Анализ рисунков 1–3, б, 9, б позволяет сделать вывод о том, что по рассматриваемым калибровкам степень охвата овальных раскатов по их периметрам ручьями круглого калибра является неполной как при захвате, так и по всей длине очага деформации. По калибровке, показанной на рисунке 6, б, имеет место практически пол-

ный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра. Так, при диаметре прокатанного круга в горячем состоянии 121,6 мм контакт уже в первый момент захвата получен на ширине калибра, равной 120 мм. Далее по длине очага деформации степень охвата овального раската по его периметру ручьями круглого калибра несколько увеличивается.

Рассмотрим распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной оси (рис. 1–3, в, 6, в, 9, в). Необходимо отметить, что сжимающие напряжения по всему сечению очага получены по всем пяти калибровкам. При этом максимальные сжимающие напряжения 200–250 МПа по дну круглого калибра получены по калибровке А (рис. 1, в) и калибровке, показанной на рисунке 9, в; по калибровке Б (рис. 2, в) — 0,5–130 МПа; по калибровкам С (рис. 3, в) и представленной на рисунке 6, в — 130–200 МПа.

Вместе с тем по всей боковой поверхности контакта наибольшие сжимающие напряжения 130–200 МПа получены только по калибровке, представленной на рисунке 6, в, по остальным они ниже.

На рисунках 1–3, з, 6, з, 9, з показано распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по продольной оси (в направлении прокатки). По всем калибровкам имеются зоны сжимающих напряжений (40–100 МПа), которые показаны голубым цветом; зоны сжимающих напряжений (от 40 МПа), переходящие в растягивающие напряжения (до 28 МПа), которые показаны зеленым цветом; зоны растягивающих напряжений (28–95 МПа), которые показаны желтым цветом. При этом наибольшая по протяженности зона сжимающих напряжений (40–100 МПа) по дну и боковым стенкам круглого калибра имеет место по калибровке, представленной на рисунке 6, з.

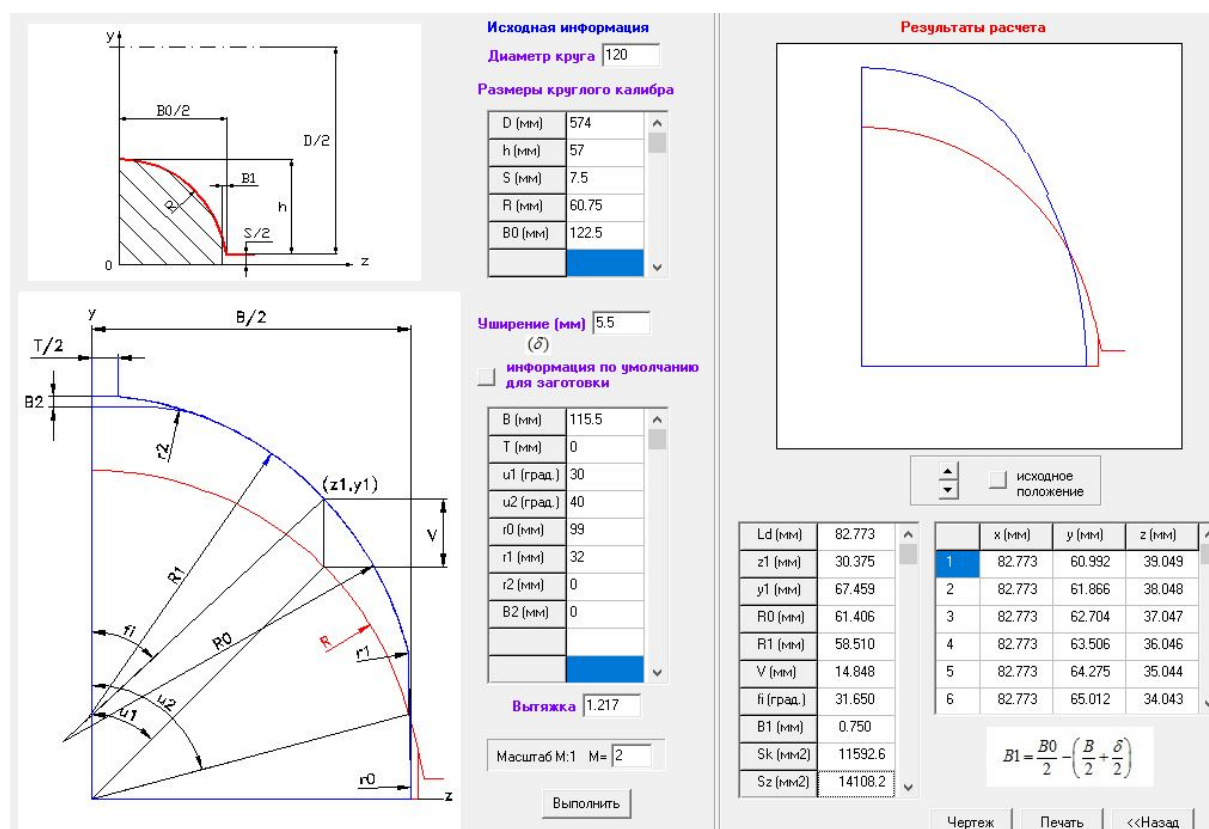


Рисунок 7 Проектирование овального раската, полученного в специальном четырёхрадиусном овальном калибре с вогнутым дном

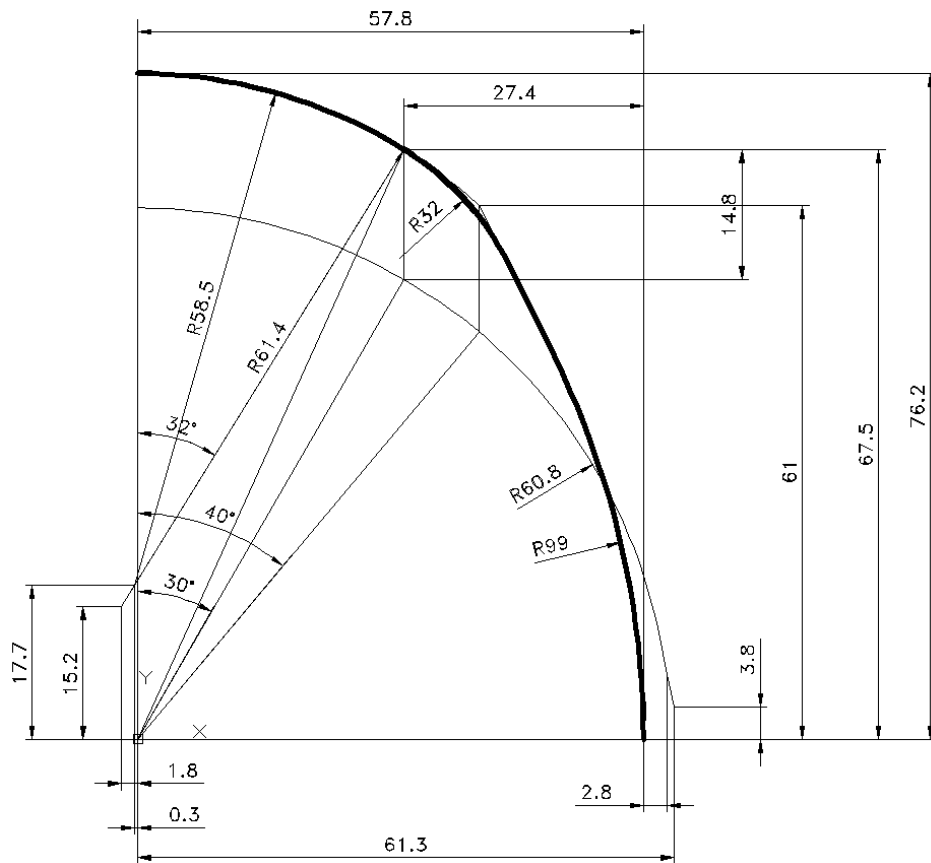
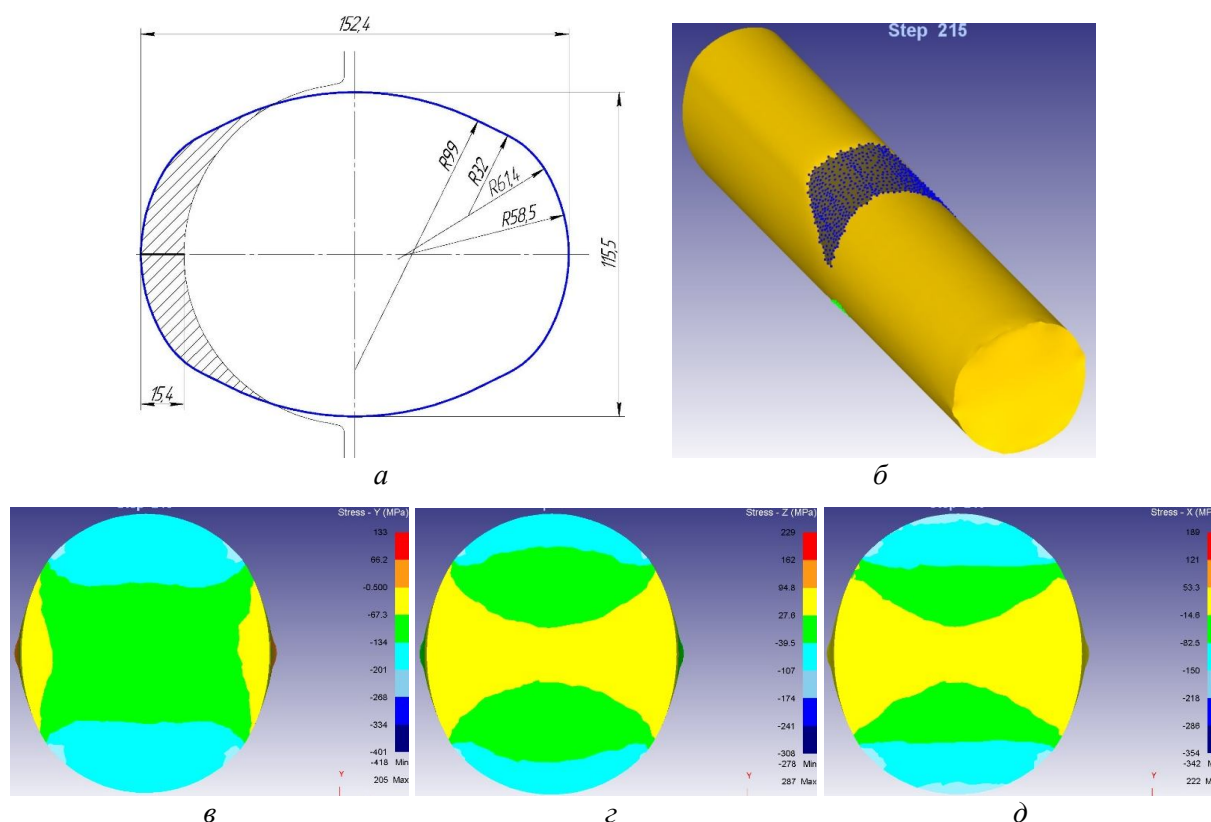


Рисунок 8 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром для прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортом стане «600» (проектирование выполнено в окне программы, показанном на рисунке 7)

Распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по поперечной оси (в направлении течения металла в уширение) показано на рисунках 1–3, д, 6, д, 9, д. При этом максимальные сжимающие напряжения 200–250 МПа по дну круглого калибра получены по калибровке А (рис. 1, д) и калибровке, показанной на рисунке 9, д. По остальным калибровкам сжимающие напряжения по дну круглого калибра находятся в диапазоне 15–150 МПа. В сечениях раскатов имеются сжимающие напряжения в диапазоне 15–80 МПа, показанные зеленым цветом. Имеются также растягивающие напряжения (не более 50 МПа), показанные желтым цветом. При этом наименьшая протяженность зон растягивающих напряжений, показанных желтым цветом, получена по калибровке, представленной на рисунке 6, д. Причем они

расположены только у зазоров круглого калибра и связаны с течением металла в уширение.

Разновременность захвата овального раската и неравномерность деформации металла валками по ширине круглого калибра обуславливают неравномерный износ валков, что в конечном итоге приводит к появлению дефектов на поверхности горячекатаного металла. Наиболее существенными факторами, определяющими износ валков, являются величины проскальзывания деформируемого металла относительно поверхностей валков и значения контактных давлений. Представляет интерес выполнить на базе конечно-элементного моделирования сравнительный анализ износа валков в зоне круглого калибра в случае прокатки в нем предчистовых овалов различных типов.



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 9 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската (по калибровке, представленной на рисунках 7, 8) в круглом калибре

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Выполнены комплексные исследования в идентичных условиях основных параметров очагов деформации при прокатке предчистовых овальных раскатов различных типов (плоского овала, двухрадиусного, трехрадиусного, а также двух четырехрадиусных овалов) в круглом калибре. Вытяжка при прокатке четырех указанных овалов равнялась 1,217.

2. Выполнен сравнительный анализ выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при прокатке овалов различных типов в круглом калибре. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной оси показал, что наибольшие

сжимающие напряжения (130–200 МПа) по всей боковой поверхности контакта получены при прокатке четырехрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по продольной оси (в направлении прокатки) показал, что наибольшая по протяженности зона сжимающих напряжений (40–100 МПа) по дну и боковым стенкам круглого калибра имеет место при прокатке четырехрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по поперечной оси (в направлении течения металла в уширение) показал, что наименьшая протяженность зон растягивающих напря-

жений (не более 50 МПа) получена при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Причем они расположены только у зазоров круглого калибра и связаны с течением металла в уширение.

3. Показано, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, его сечение полностью соответствует вертикальному сечению круглого калибра в плоскости захвата, что улучшает устойчивость полосы в момент захвата.

4. Установлено, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, обеспечивается одновременный захват металла валками практически по всей ширине круглого калибра, что снижает вероятность появления трещин.

5. Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов показали, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в спе-

циальном овальном калибре с выпуклым дном, имеет место практически полный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра. Так, при диаметре прокатанного круга в горячем состоянии 121,6 мм контакт уже в первый момент захвата получен на ширине калибра, равной 120 мм.

6. Неравномерность деформации металла, которая отрицательно сказывается на качестве наружной поверхности горячекатаного металла, оцениваемая по каждой калибровке отклонением значения максимального обжатия от значения среднего приведенного обжатия по ширине калибра при прокатке, составила при использовании двухрадиусного овала 24,2 %, плоского овала — 32,9 %, трехрадиусного овала — 29,4 %, четырёхрадиусного овала (калибр с вогнутым дном) — 19,8 %, четырёхрадиусного овала (калибр с выпуклым дном) — 6,2 %.

7. Направление дальнейших исследований связано с исследованием износа валков при прокатке в круглом калибре предчистовых овалов различных типов.

Библиографический список

1. *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. *Пат. 102915 Украина, МПК (2012) B21B 1/02. Способ прокатки круглых профилей / В. Б. Шум, А. В. Яковченко, В. М. Никишин, А. В. Курилов, Р. Е. Гайдук, В. В. Борискин ; заявитель и патентообладатель Донец. нац. техн. ун-т. — № а201200925; заявл. 30.01.12; опубл. 27.08.13, Бюл. № 16. — 6 с. : ил.*
8. *Снитко, С. А. Математическая модель поверхности круглого калибра [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2020. — Т. 20. — № 4. — С. 43–48.*
9. *Снитко, С. А. Исследование процесса самоцентрировки овального раската специальной формы в круглом калибре на базе метода конечных элементов [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко //*

Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : сб. науч. тр. — 2021. — Т. 36. — № 3. — С. 71–82.

10. Развитие теории и технологии прокатки круглых профилей [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 25 (68). — С. 32–45.

11. 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.

© Снитко С. А.

© Денищенко Н. П.

© Яковченко А. В.

© Денищенко П. Н.

**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 28.09.2022.

Doctor of Technical Sciences Snitko S. A. (*DonNTU, Donetsk, DPR, snitko_sa@mail.ru*),
Denishchenko N. P. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, nd76696@gmail.ru*), **Doctor of Technical Sciences**
Yakovchenko A. V. (*DonNTU, Donetsk, DPR, mond1991@mail.ru*), **PhD in Engineering**
Denishchenko P. N. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, pavel.denishchenko@gmail.com*)

INVESTIGATION OF ROLL PASSES OF THE PRE-FINISHING OVAL ROLLS OF VARIOUS TYPES IN A ROUND GROOVE

On the basis of finite-element modeling, complex studies of the main parameters of roll pass of 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 performed. A comparative analysis of grooving was carried out on timing of capture oval roll, the degree of coverage of oval roll along its perimeter by roll-groove, the unevenness of metal deformation, the magnitude and distribution of normal stresses. It is shown that the use of a four-radius oval obtained in a special oval groove with a convex bottom has advantages.

Key words: *rolling of round profiles, pre-finishing oval, finite-element modeling, timing of capture oval roll, coverage of oval roll along its perimeter, unevenness of metal deformation, normal stresses.*