

УДК 621.785

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

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ОВАЛЬНОГО РАСКАТА В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ

Метод конечно-элементного моделирования является эффективным инструментом совершенствования технологии прокатки сортовых профилей. Известно, что он требует адаптации применительно к каждому исследуемому процессу. Настоящая работа посвящена его адаптации применительно к процессу прокатки овального раската в круглом калибре. С использованием метода расчета напряжения течения металла, учитывающего накопленную деформацию, а также процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке разработана функция компьютерной программы по автоматизированному формированию компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла, которая необходима для выполнения конечно-элементных расчётов в системе DEFORM-3D. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки в клети 750 круга диаметром 150 мм из стали 45. Отклонение расчетного значения силы прокатки от экспериментального составило 9,3 %.

Ключевые слова: процесс прокатки овального раската в круглом калибре; система DEFORM-3D; конечно-элементное моделирование; напряжение течения металла; накопленная деформация; динамическое преобразование структуры металла при горячей прокатке; компьютерная программа.

На базе конечно-элементного моделирования выполнены исследования многих процессов обработки металлов давлением и получены решения широкого круга задач [1–6]. Совершенствование калибровок валков для прокатки круглых профилей по системе калибров овал — круг, которые являются одним из основных элементов рассматриваемой технологии, непосредственно связано с конечно-элементным моделированием напряженно-деформированного состояния металла в очаге.

Поставлена задача адаптации метода конечно-элементного моделирования применительно к процессу прокатки овального раската в круглом калибре. При этом актуальным вопросом является разработка компьютерной программы автоматизированного формирования компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла, которая необходима для вы-

полнения конечно-элементных расчётов в системе DEFORM-3D. Также необходимо, используя результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки круга, выполнить сопоставление расчётной и экспериментальной информации по размерам полученного профиля и силе прокатки.

Реализация моделирования процесса прокатки выполнена в системе DEFORM-3D. Проверка адекватности результатов моделирования осуществлена на основе экспериментально установленных в работе [7] закономерностей изменения температурно-скоростных и силовых параметров процесса прокатки круглых профилей Ø150 мм из конструкционной стали 45 в клети 750. Калибровка валков представлена на рисунке 1.

Использовали автоматический режим генерации конечно-элементной сетки с четырёхузловыми тетраэдрами, имеющими

размеры в диапазоне 2,5–7,5 мм (рис. 2). 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 су-

щественному повышению времени моделирования, не обеспечивая уточнение получаемых результатов расчета.

Моделирование выполняется для нестационарного теплового режима раската с учетом процессов теплообмена обрабатываемого металла с окружающей средой как при деформации, так и во время междеформационных пауз, а также с учетом теплового эффекта пластической деформации.

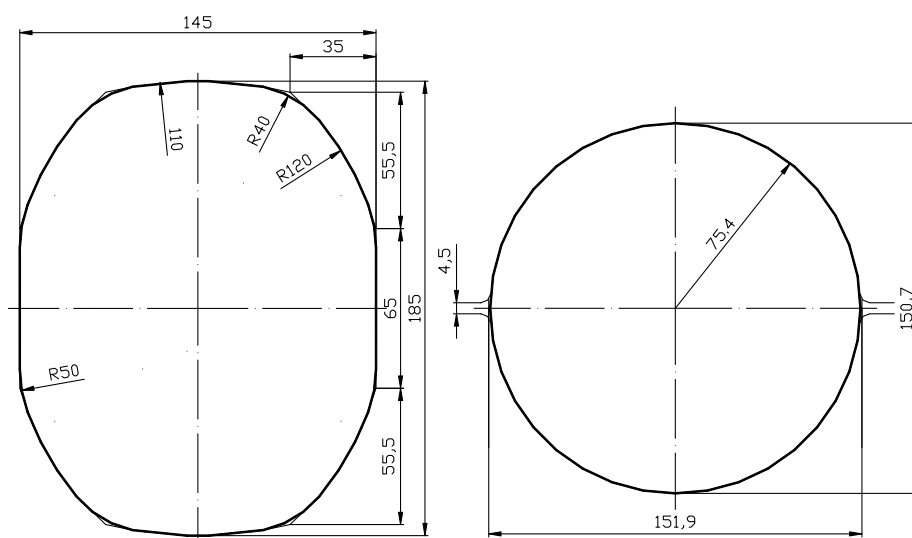


Рисунок 1 Калибровка для прокатки круга $\varnothing 150$ мм из овального раската

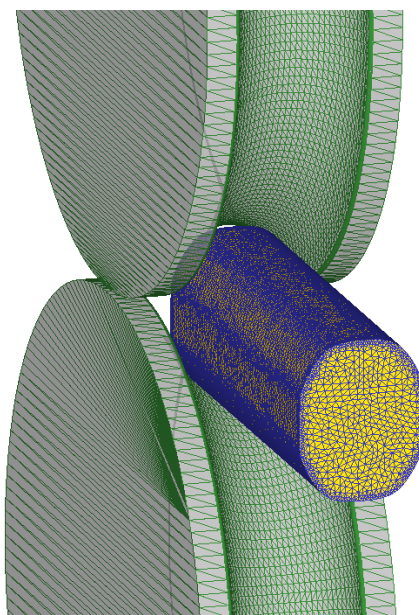


Рисунок 2 Визуализация сетки конечных элементов овального раската, задаваемого в круглый калибр

Моделирование процесса теплообмена выполнено на основе известной зависимости

$$q = A\alpha(t_s - t_c), \quad (1)$$

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 $20\text{ }^\circ\text{C}$ и $100\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ соответственно. Коэффициент теплопередачи на контакте раската с валками равен $5000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$. Температура валков принята постоянной и равной $50\text{ }^\circ\text{C}$, температура выдачи заготовок из печи — $1240\text{ }^\circ\text{C}$.

Для заготовки использовали пластическую модель материала. В качестве материала использовали 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 750 мм . Скорость прокатки овального раската в круглом калибре принята постоянной — $3,5\text{ м/с}$.

Поведение материала раската в процессе решения описывается диаграммой «эквивалентное напряжение течения — эквива-

лентная деформация». При моделировании металл деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения. Соответствующие кривые течения в исследуемом диапазоне температур $850\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ в системе DEFORM-3D строятся на основе базы цифровой информации о напряжении течения металла, для получения которой в настоящей работе была предусмотрена новая функция компьютерной программы, созданной в [8]. Расчёт напряжения течения металла выполнялся с учётом накопленной деформации, а также процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке по методу [9].

Исходная информация по химическому составу стали 45 и диапазонам изменения факторов накопленной деформации ε , скорости деформации U и температуры T применительно к исследуемому процессу прокатки представлены в фрагменте окна программы [8] на рисунке 3.

Новое окно программы автоматизированного формирования компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла показано на рисунке 4.

На рисунке 5 представлены кривые течения для стали 45 с учётом накопленной деформации ε в диапазоне $0,01\text{--}5,0$.

Марка стали сталь 45 по ГОСТ 1050-2013					
Пределы изменения факторов					
ε_{\min}	ε_{\max}	U_{\min} (1/с)	U_{\max} (1/с)	T_{\min} (град.С)	T_{\max} (град.С)
0.01	5	0.01	150	850	1250
OK					

C (0.05 - 1.1)	0.46
Si (0 - 1.65)	0.27
Mn (0.03 - 1.55)	0.65
Cr (0 - 0.3)	0.125
Ni (0 - 0.3)	0.125
P (0 - 0.05)	0.0175
S (0 - 0.05)	0.02
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.125

Рисунок 3 Исходная информация по химическому составу стали 45 и диапазонам изменения факторов ε , U , T в окне компьютерной программы, разработанной в [8], для расчёта напряжения течения металла по методу [9]

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Исходная информация

Степень деформации (ϵ)
Количество значений: 18
1.50
1.75
2.0
3.0
4.0
5.0

Скорость деформации ($U, 1/c$)
Количество значений: 8
0.50
1.0
10
50
100
150

Температура ($T, \text{град.С}$)
Количество значений: 5
850
950
1050
1150
1250

Продолжить...

$T (^{\circ}\text{C})$ 1050

Результаты расчета

ϵ	$U, (1/c)$							
	0.01	0.10	0.50	1.0	10	50	100	150
0.25	49.673	68.200	83.412	90.643	118.488	142.711	154.784	162.396
0.30	47.951	67.737	84.217	92.052	121.940	147.436	159.976	167.833
0.40	43.895	64.586	82.628	91.333	124.640	152.635	166.183	174.596
0.50	40.491	60.704	79.203	88.329	123.885	153.966	168.454	177.413
0.75	36.074	53.495	70.711	79.632	116.473	149.267	165.298	175.235
1.00	34.823	50.281	65.682	73.823	108.814	141.584	158.016	168.304
1.25	34.522	49.104	63.323	70.820	103.469	134.988	151.132	161.343
1.50	34.456	48.712	62.326	69.430	100.230	130.268	145.854	155.785

Рисунок 4 Окно компьютерной программы автоматизированного формирования компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла на основе программы [8] и метода [9]

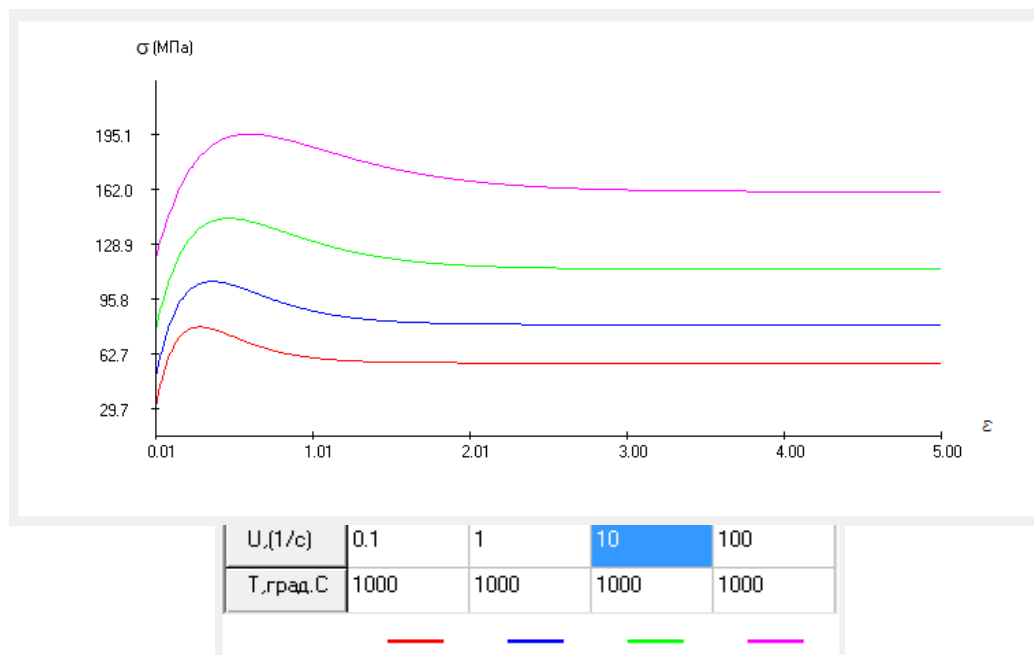


Рисунок 5 Графические зависимости напряжения течения стали 45 с учётом накопленной деформации ϵ в диапазоне 0,01–5,0

В качестве модели контактного трения принята сдвиговая модель

$$\tau_{mp} = mk, \quad (2)$$

где τ_{mp} — напряжение трения; m — фактор трения; 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 рас-

ката перед прокаткой в круглом калибре равнялась 485 мм, что позволило учесть влияние внешних зон и обеспечить наличие установившейся стадии прокатки (рис. 6, а).

На рисунке 7 показано распределение по длине очага при прокатке овального раската в круглом калибре накопленной деформации ε (а) и скорости деформации U (б). Полученные результаты позволили уточнить диапазоны изменения факторов ε , U при разработке базы цифровой информации, показанной на рисунке 4.

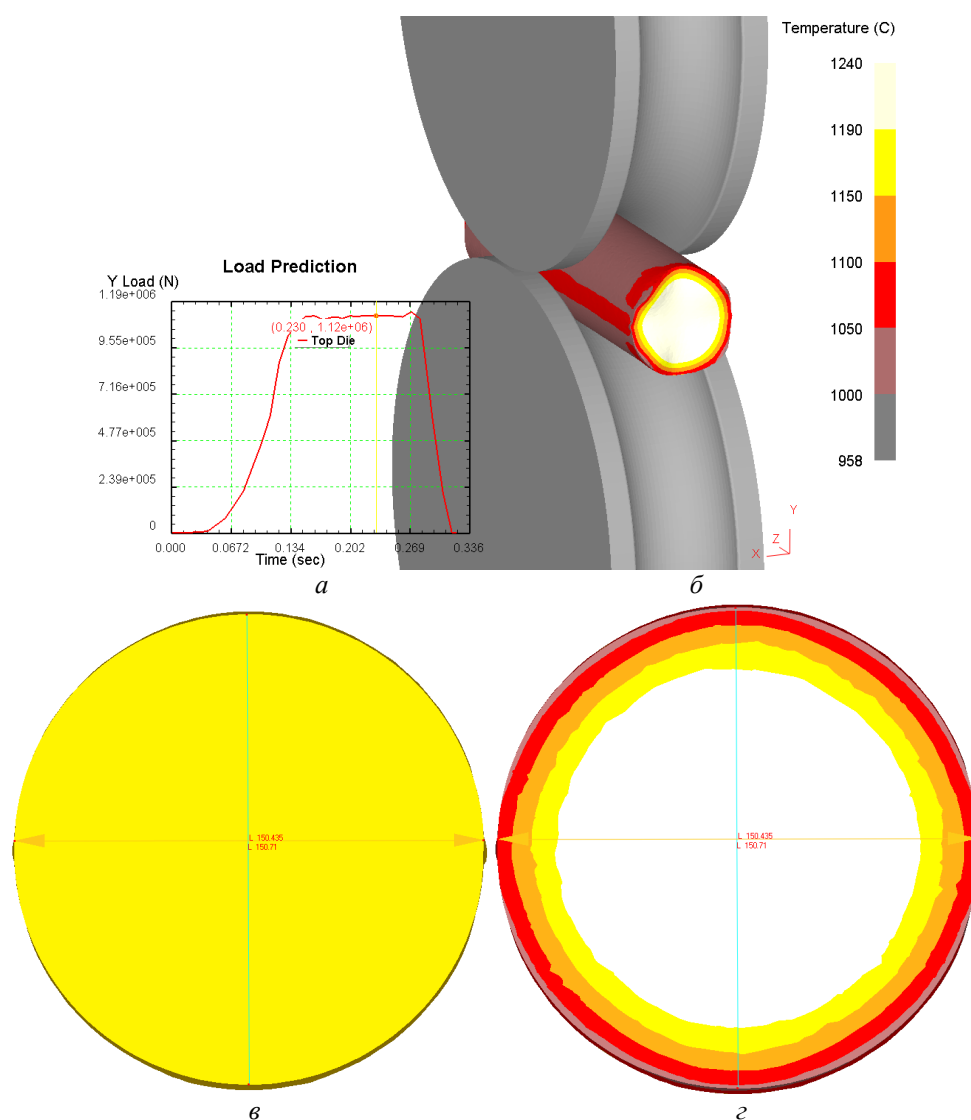


Рисунок 6 Результаты моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре: а — график силы прокатки; б — очаг деформации; в, г — сечения прокатанного круга с указанными размерами и температурным полем

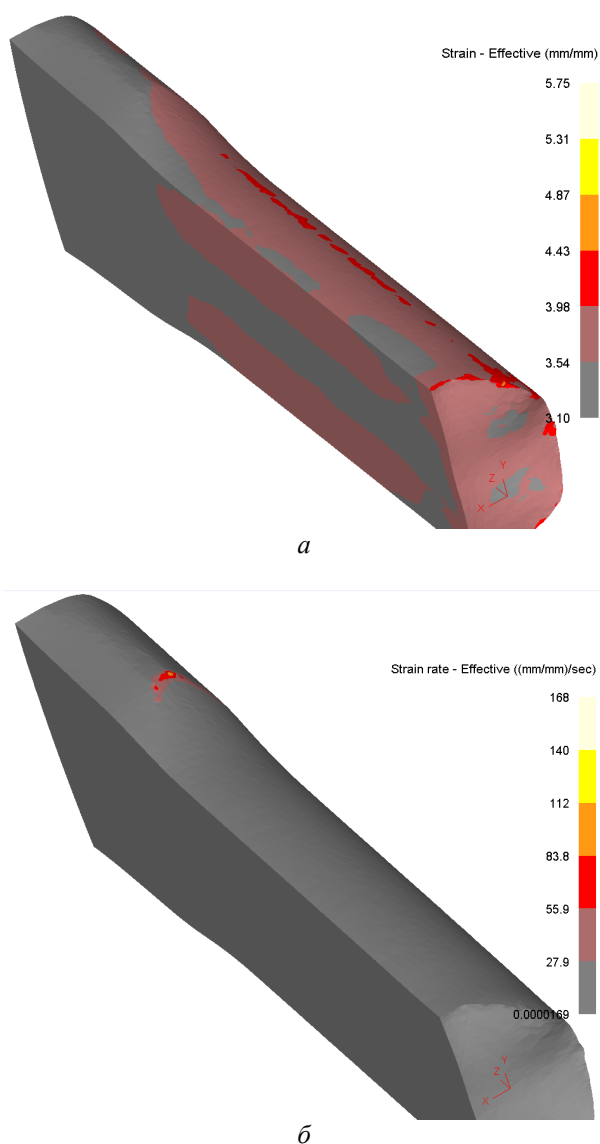


Рисунок 7 Распределение накопленной деформации ε (а) и скорости деформации U (б) по длине очага при прокатке круга $\varnothing 150$ мм

Анализ полученных результатов показал, что при прокатке в круглом калибре металл имел температуру в диапазоне 958–1240 °С. Температура металла на поверхности круга 1045 °С (рис. 6, *з*). Отклонение расчетного значения температуры металла на поверхности круга от экспериментального (1000 °С) [7] составило 4,5 %. Сила прокатки 1,12 МН (рис. 6, *а*). Отклонение расчетного значения силы прокатки от экспериментального (1,025 МН) [7] составило 9,3 %. Размеры круга получены в пределах поля допусков по ГОСТ 2590–2006.

Выполнена адаптация метода конечно-элементного моделирования применительно к процессу прокатки овального раската в круглом калибре. При этом определён режим генерации конечно-элементной сетки, выбраны модели процесса теплообмена, деформируемого материала и валков, напряжения течения металла.

Разработана функция компьютерной программы по автоматизированному формированию компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла, которая необходима для выполнения

конечно-элементных расчётов в системе DEFORM-3D. При этом использовали метод расчета напряжения течения металла, учитывающий накопленную деформацию, а также процессы динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке.

Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки в клети 750 круга диаметром 150 мм из стали 45. Отклонение расчетного значения силы прокатки от экспериментального состави-

ло 9,3 %. Отклонение расчетного значения температуры металла на поверхности круга от экспериментального составило 4,5 %. Размеры круга получены в пределах поля допусков по ГОСТ 2590–2006.

Перспективным направлением дальнейших исследований является совершенствование способов и калибровок для прокатки круглых профилей с использованием конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния металла в очаге.

Библиографический список

1. Ершов, С. В. О моделировании процесса прокатки с использованием метода конечных элементов [Текст] / С. В. Ершов // *Металлы*. — 2004. — № 4. — С. 36–40.
2. Dimensional analysis in steel rod rolling for different types of grooves [Text] / F. Capece Minutolo [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2005. — Vol. 14. — Iss. 3. — P. 373–377.
3. Mathematical model of neutral line on the contact zone in alloyed bar rolling by the round-oval-round pass sequence [Text] / Yo. Dong [et al.] // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2016. — Vol. 115–116. — P. 180–189.
4. Analytical model for predicting the surface profile of a work piece in round-to-2-R and square-to-2-R oval groove rolling [Text] / U. K. Yoo [et al.] // *Journal of Mechanical Science and Technology*. — 2010. — Vol. 24. — Iss. 11. — P. 2289–2295.
5. Dong, Yo. Novel analytic model for the projected contact zone based on the flow line element method in alloyed bar rolling [Text] / Yo. Dong, H. Zhu, J. Song // *Open Access Library Journal*. — 2017. — Vol. 4, e3247. — 16 p.
6. Зуев, И. А. Разработка способа повышения качества проката и износостойкости инструмента в условиях стана 150 ОАО «БМЗ — Управляющая компания холдинга „БМК“» [Текст] / И. А. Зуев // *Литье и металлургия*. — 2016. — Вып. 85. — № 4. — С. 56–61.
7. Производство трубной заготовки [Текст] / А. П. Чекмарёв [и др.]. — М. : Металлургия, 1970. — 304 с.
8. Зависимость напряжения течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn, учитывающая при горячей прокатке процессы динамического преобразования структуры [Текст] / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, В. В. Пилипенко, Н. И. Ивлева // *Вестник Донецкого национального технического университета*. — 2020. — Том 19. — № 1. — С. 45–52.
9. 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.

© Снитко С. А.

© Денищенко Н. П.

© Пилипенко В. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМД ДонГТИ Денищенко П. Н.,
д.т.н., проф. каф. ОМД ДонНТУ Яковченко А. В.**

Статья поступила в редакцию 10.06.2021.

Doctor of Technical Sciences Snitko S. A. (DonNTU, Donetsk, DPR, snitko_sa@mail.ru),
Denishchenko N. P. (DonSTI, Alchevsk, LPR, nd76696@gmail.ru), **Pilipenko V. V.** (DonNTU,
Donetsk, DPR, dvenaxa94@mail.ru)

ADAPTATIVE METHOD OF FINITE-ELEMENT SIMULATION OF ROLLING THE OVAL ROLL IN ROUND PASS

The finite-element simulation method is an effective tool for improving the rolling technology of section bars. It is known to require adaptation for each process under research. The present work is devoted to its adaptation to the process of rolling the oval roll in a round pass. Utilize the method of metal flow stressing, considering the accumulated deformation, as well as the processes of dynamic transformation of metal structure during hot rolling, a function of software application for automated formation of computer database of digital information on the metal flow stress, which is necessary for performing finite-element calculations in the DEFORM-3D system, has been developed. Finite-element simulation of rolling process in 750 circle stand with diameter of 150 mm made of steel 45 was performed. The deviation of the calculated rolling force value from the experimental one was 9,3 %.

Key words: rolling the oval roll in round pass, DEFORM-3D system, finite-element simulation, metal flow stressing, cumulative deformation, dynamic conversion of metal structure at hot rolling, software application.