

УДК 621.771.001.057

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК НА РАДИАЛЬНО-ОСЕВОМ КОЛЬЦЕПРОКАТНОМ СТАНЕ

**Снитко С.А.<sup>1</sup>**, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» (snitko\_sa@mail.ru)

**Яковченко А.В.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (mond1991@mail.ru)

**Пилипенко В.В.<sup>1</sup>**, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» (VictorPilipenkoDNTU@gmail.com)

**Ивлева Н.И.<sup>2</sup>**, прикладной программист (ivl22@mail.ru)

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет  
(83001, Украина, Донецк, ул. Артема, 58)

<sup>2</sup>Частное научно-производственное предприятие «МОНД»  
(83001, Украина, Донецк, бульвар Пушкина, 12)

**Аннотация.** На базе радиально-осевой прокатки кольцевых заготовок созданы ресурсосберегающие технологии обработки металлов давлением. Определение рациональных параметров этого процесса при освоении новых профилей является актуальной научно-технической задачей. Метод трехмерного конечно-элементного моделирования процесса является наиболее эффективным инструментом совершенствования технологических режимов процесса прокатки колец. Однако, как показала практика, метод конечно-элементного моделирования требует адаптации применительно к каждому процессу обработки металлов давлением. Этому вопросу и посвящена настоящая работа. Обоснована целесообразность использования для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец зависимости для расчета напряжения течения металла, разработанной на базе теории, учитывающей химический состав конструкционной углеродистой стали, ее температуру, скорость деформации, накопленную деформацию, а также процессы динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке. Создана компьютерная программа автоматизированного определения параметров зависимости. Выполнен анализ точности полученной зависимости по отношению к экспериментальным данным. В ходе этих расчетов использовали метод автоматизированного определения напряжения течения металла путем сплайн-интерполяции экспериментальных данных, входящих в компьютерную базу цифровой информации для конкретной марки стали. Средняя относительная погрешность расчетных значений напряжения течения металла относительно экспериментальных составила 8 %. Предложен усовершенствованный метод выполнения расчетов параметров процесса прокатки кольцевых заготовок и выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца. Метод реализуется в системе конечно-элементного моделирования, который аналогичен способу работы системы управления кольцепрокатным станом при решении этой же задачи (выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца) при осуществлении соответствующей прокатки на практике. При вычислении величин обжатий использовали итерационный процесс и метод половинного деления. Средние отклонения расчетных величин параметров процесса прокатки кольцевых заготовок от экспериментальных не превысили 12,4 %, что дает возможность применения предложенного подхода для изучения закономерностей процесса прокатки колец и совершенствования технологии их прокатки.

**Ключевые слова:** прокатка кольцевой заготовки, кольцепрокатный стан, метод конечно-элементного моделирования, напряжение течения металла, промышленный эксперимент, скорость роста диаметра кольца.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-665-673

### ВВЕДЕНИЕ

В технической литературе на базе специализированных систем автоматизированного проектирования и конечно-элементного моделирования проведены исследования многих процессов и получены решения широкого круга задач в области металлургического и машиностроительного производства [1 – 9]. Нестационарный характер процесса прокатки кольцевых заготовок определяет как его сложность, так и значительный круг научно-технических задач, направленных на повышение эффективности производства,

которые не утратили своей актуальности [10 – 14]. Одним из наиболее часто поднимаемых вопросов является выход на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца, а также поиск рационального графика движения валка-оправки [15 – 19] и, соответственно, распределения суммарного радиального обжатия. В связи с этим поставлена задача усовершенствовать метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевых заготовок, обеспечивающий выполнение расчетов параметров процесса прокатки с учетом выхода на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца.

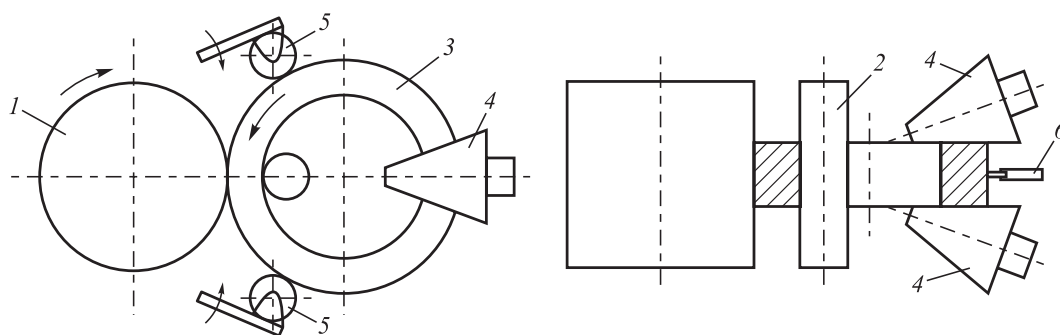


Рис. 1. Схема радиально-осевого кольцепрокатного стана:  
1 – главный приводной валок; 2 – валок-оправка; 3 – кольцо; 4 – конические валки; 5 – центрирующие ролики;  
6 – устройство для измерения скорости роста диаметра кольца

Fig. 1. Scheme of radial-axial ring-rolling mill:

1 – main driver roll; 2 – mandrel; 3 – ring; 4 – axial rolls; 5 – centering rollers; 6 – device for measuring the growth rate of ring diameter

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс прокатки кольцевых заготовок на кольцепрокатном стане реализован в программной среде DEFORM 3D. Построение модели осуществляли в шаблоне RingRolling, который является специализированным модулем, разработанным для решения указанных задач [20 – 23].

В процессе моделирования использовали главный приводной валок 1, валок-оправку 2, конические валки 4. Учтено также влияние центрирующих роликов 5, что исключило отклонение оси кольца при его прокатке от оси прокатного стана (рис. 1).

При проектировании сетки заготовки применяли функции «однородной толщины слоя в окружном направлении» и «грубой внутренней сетки». Боковая поверхность заготовки образована прямоугольными элементами размером  $8 \times 3,25$  мм, что позволило достаточно точно описать ее криволинейную боковую поверхность (рис. 2).

Для кольцевой заготовки использовали пластическую модель материала. В качестве материала применяли углеродистую конструкционную сталь 45, для ко-

торой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяли из базы данных DEFORM 3D. Температура окружающей среды  $t_{\text{окр}}$  и коэффициент конвекции  $\alpha_k$  были приняты постоянными и равными  $20^\circ\text{C}$  и  $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  соответственно.

Поведение материала заготовки в процессе решения описывали на базе диаграммы «напряжение течения – деформация».

При моделировании использовали концепцию напряжения течения, в соответствии с которой материал деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения.

Авторами обоснована целесообразность использования для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , разработанной на базе теории [24]. Поставлена задача определения параметров этой зависимости, в которой учитывается химический состав конструкционной углеродистой стали 45, температура, скорость деформации, накопленная деформация, а также процессы динамического преобразования структуры металла в процессе горячей прокатки. Выбор этой стали связан с необходимостью конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец, для которого в работе [25] имеются результаты эксперимента, выполненного в промышленных условиях. Экспериментальные кривые течения стали 45 [26] показаны на рис. 3 в окне снятия экспериментальной информации и контрольного построения соответствующих сплайн-кривых.

В работе [27] изложен метод автоматизированного определения напряжения течения металла  $\sigma$  в зависимости от фиксированных значений степени деформации  $\epsilon$ , скорости деформации  $U$  и температуры  $T$ , основанный на использовании компьютерных баз цифровой информации (рис. 4).

На рис. 5 показано окно компьютерной программы определения параметров зависимости для расче-

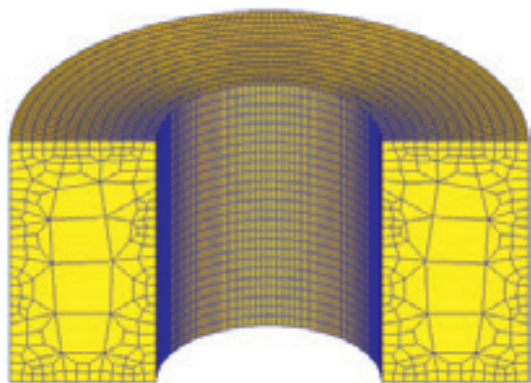


Рис. 2. Объемная сетка кольцевой заготовки

Fig. 2. Volumetric mesh of the ring billet

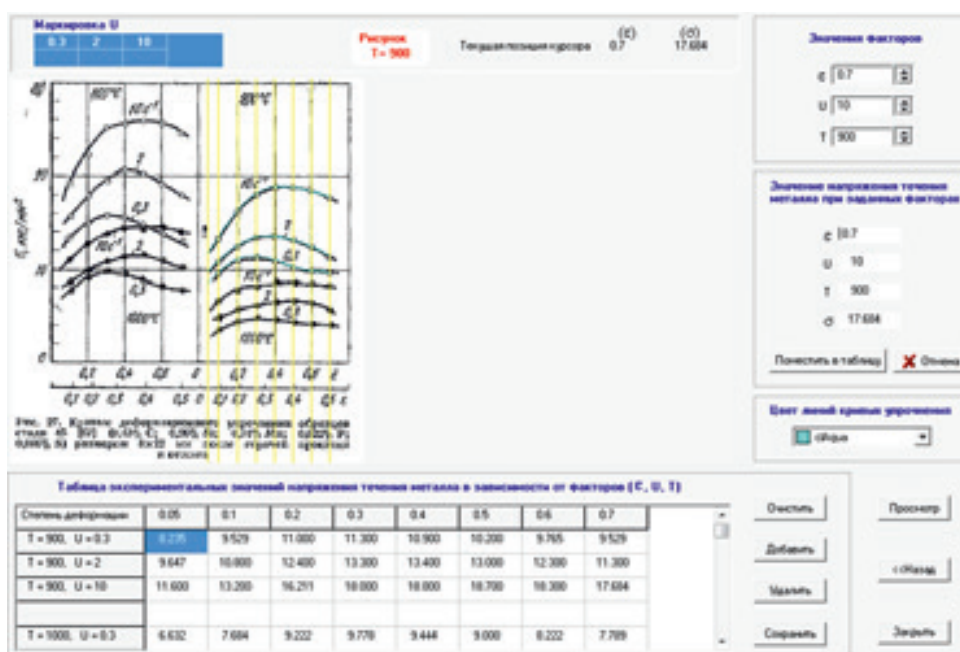


Рис. 3. Окно снятия экспериментальной информации и контрольного построения сплайн-кривых течения стали 45

Fig. 3. Window for reading experimental information and control construction of spline flow curves of steel 45

Наименование марки: Сталь 45

Имя файла: КАТАЛОГ\1\Сталь 45, стр. 104, рис. 27

Таблица экспериментальных значений напряжений течения металла  $\sigma$  (МПа) в зависимости от факторов:  $\epsilon$ ,  $U$  (1/с),  $T$  (град. С)

| Степень деформации | 0.05    | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 1.2     |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| T = 900, U = 0.3   | 90.703  | 93.384  | 107.800 | 110.740 | 106.820 | 99.960  | 95.697  | 93.384  | 93.384  |
| T = 900, U = 2     | 94.541  | 105.840 | 121.520 | 130.340 | 131.320 | 127.400 | 120.540 | 110.740 | 110.740 |
| T = 900, U = 10    | 112.680 | 129.360 | 158.868 | 176.400 | 184.240 | 183.260 | 179.340 | 173.303 | 173.303 |
| T = 1000, U = 0.3  | 64.934  | 75.303  | 90.376  | 95.824  | 92.551  | 88.200  | 80.576  | 76.332  | 76.332  |
| T = 1000, U = 2    | 77.371  | 84.937  | 98.980  | 106.820 | 111.720 | 113.680 | 107.800 | 99.960  | 99.960  |
| T = 1000, U = 10   | 98.000  | 108.780 | 125.852 | 135.132 | 142.395 | 143.394 | 144.423 | 138.229 | 138.229 |
| T = 1200, U = 0.3  | 26.460  | 34.300  | 43.120  | 45.050  | 45.080  | 43.120  | 41.160  | 39.200  | 39.200  |
| T = 1200, U = 2    | 43.120  | 47.040  | 55.960  | 59.780  | 63.700  | 64.680  | 61.740  | 55.960  | 55.960  |
| T = 1200, U = 10   | 51.940  | 64.680  | 76.440  | 78.400  | 83.016  | 81.859  | 81.859  | 78.400  | 78.400  |

Рис. 4. Окно программы с изображением компьютерной базы цифровой информации о кривых течения стали 45

Fig. 4. Program window of computer database of digital information on flow curves of steel 45

та напряжения течения металла  $\sigma$  на базе теории [24]. Указанная зависимость представлена в правой части окна.

Актуальной задачей является выполнение на основе соответствующего планируемого эксперимента научно-обоснованного анализа точности полученной зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , для которой в окне программы (см. рис. 5) определены искомые термокинетические параметры применительно к стали 45.

В работе использована компьютерная программа [27], которая на первом этапе в автоматизированном режиме формирует план-матрицу планируемого

эксперимента, обеспечивающую научно-обоснованный выбор наиболее рациональных точек в области изменения факторов  $\epsilon$ ,  $U$ ,  $T$ , а на следующем этапе определяет соответствующие экспериментальные значения  $\sigma_{\text{эксп}}$ . Метод автоматизированного определения экспериментальных значений напряжения течения металла  $\sigma$  [27] в зависимости от фиксированных значений степени деформации  $\epsilon$ , скорости деформации  $U$  и температуры  $T$  основан на использовании компьютерной базы цифровой информации и ее компьютерной сплайн-интерполяции (см. рис. 4).

Выполнена разработка функций компьютерной программы определения соответствующих расчетных

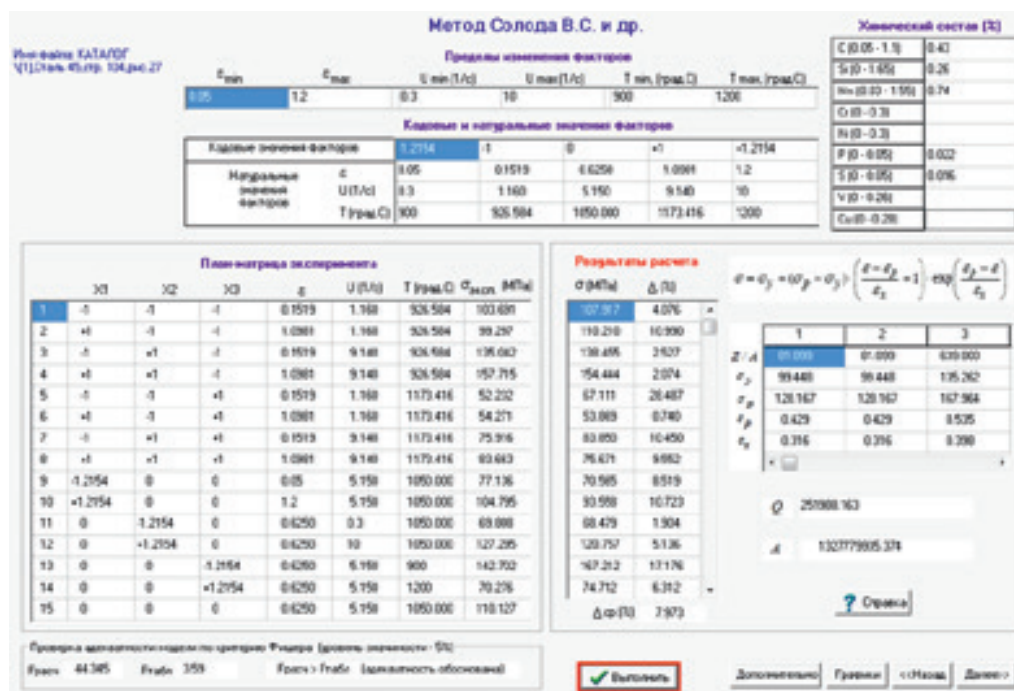


Рис. 5. Окно программы планирования эксперимента, определения термокинетических параметров зависимости расчета напряжения течения  $\sigma$  для стали 45 на базе теории [24] и проверки ее адекватности

Fig. 5. Window of the program for planning the experiment, determining the thermokinetic parameters of the dependence of calculating the flow stress  $\sigma$  for steel 45 based on the theory [24] and verifying its adequacy

значений  $\sigma_{\text{расч}}$  для каждого из пятнадцати опытов на основе полученной зависимости. С учетом значений  $\sigma_{\text{экс}}$  в окне программы (см. рис. 5) для стали 45 определена средняя относительная погрешность по всему планируемому эксперименту, которая составила 8 %.

Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера также реализована в компьютерной программе, окно которой показано на рис. 5. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

Выполнена разработка функций компьютерной программы расчета и построения зависимостей напряжения течения металла ( $\sigma_{\text{расч}}$ ,  $\sigma_{\text{экс}}$ ) от степени суммарной относительной деформации  $\varepsilon$  при фиксированных значениях скорости деформации  $U$  (0,3 с<sup>-1</sup>) и температуры  $T$  (1000, 1200 °C). При указанных значениях факторов  $\varepsilon$  и  $U$  исходные экспериментальные кривые (см. рис. 3) позволяют выполнить их экстраполяцию в диапазоне  $\varepsilon$  от 0,7 до большей величины. Это связано с тем, что по каждой из двух указанных кривых при определенных значениях  $\varepsilon$  зафиксировано разупрочнение металла и величина  $\sigma = \text{const}$ . В дальнейшем интервал по степени истинной деформации рассмотрен от 0,7 до 1,2. Это нашло отражение в компьютерной базе цифровой информации о кривых течения стали 45, представленной на рис. 4. В свою очередь, это позволило выполнить проверку расчетных кривых в более широком диапазоне изменения  $\varepsilon$ .

Результаты, представленные на рис. 6, позволяют сделать вывод о том, что расчетные кривые адекватно

описывают экспериментальные кривые течения для стали 45.

В процессе конечно-элементного моделирования предусмотрен режим компенсации изменения объема заготовки. В качестве целевого был выбран объем исходной заготовки, задаваемый в программу вместе с файлом для описания геометрии.

Для валков выбран недеформируемый тип материала. Дополнительно указаны: направление перемещения, тип зависимости и закон перемещения вала; координаты оси вращения вала, тип зависимости и закон вращения вала. Температура главного вала  $t_{\text{гл.в}} = 100$  °C, вала-оправки  $t_{\text{в-опр}} = 200$  °C, наклонных валков  $t_{\text{накл.в}} = 150$  °C. Коэффициент теплопередачи  $\alpha_t = 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C). В качестве модели контактного трения принята сдвиговая модель (показатель сил трения равен 0,7).

Исходная информация, используемая в процессе конечно-элементного моделирования, представлена в таблице. При проведении эксперимента в промышленных условиях [25] кольцо при прокатке формировалось между неприводным валком-оправкой и главным приводным валком, которые установлены вертикально. Обжатие стенки кольца и соответствующее увеличение его диаметра осуществлялось перемещением вала-оправки в сторону главного вала с помощью гидравлического привода. Стан имеет два конических вала, выполняющих обжатие кольца по высоте, которые установлены диаметрально про-

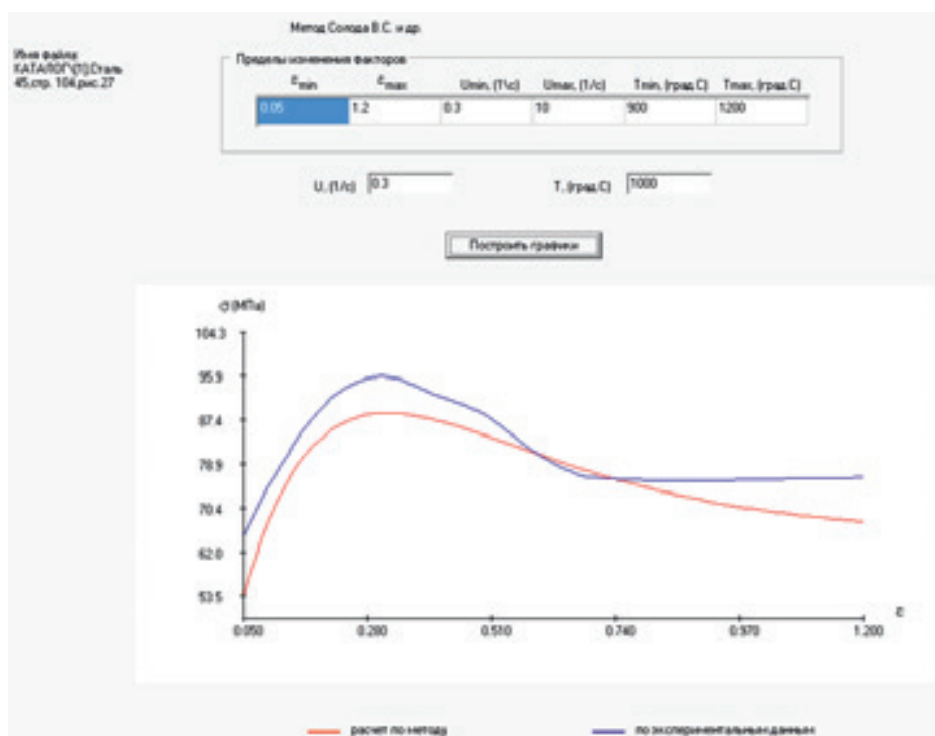


Рис. 6. Окно программы с изображением расчетной и экспериментальной кривой при фиксированных значениях  $U$  и  $T$  ( $U = 0,3 \text{ с}^{-1}$ ,  $T = 1000 \text{ °C}$ )

Fig. 6. Program window of calculated and experimental curves at fixed value  $U$  and  $T$  ( $U = 0,3 \text{ s}^{-1}$ ,  $T = 1000 \text{ °C}$ )

### Основные параметры прокатки колец из стали 45 при эксперименте [25]

#### The main parameters of rolling the rings of steel 45 during the experiment [25]

| Параметр                        | Единица измерения | Обозначение           | Значение параметра |
|---------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| Высота кольцевой заготовки      | мм                | $B_o$                 | 200,0              |
| Толщина кольцевой заготовки     | мм                | $H_o$                 | 105,1              |
| Наружный диаметр заготовки      | мм                | $D_o$                 | 372,7              |
| Внутренний диаметр заготовки    | мм                | $D_B$                 | 162,5              |
| Высота кольца                   | мм                | $b_K$                 | 200,0              |
| Толщина кольца                  | мм                | $h_K$                 | 18,6               |
| Наружный диаметр кольца         | мм                | $d$                   | 1530,7             |
| Внутренний диаметр кольца       | мм                | $d_B$                 | 1493,5             |
| Скорость прокатки               | м/с               | $V_B$                 | 1,2                |
| Диаметр главного валка          | мм                | $D$                   | 850                |
| Диаметр валка-оправки           | мм                | $d_o$                 | 160                |
| Время прокатки                  | с                 | $t$                   | 105                |
| Температурный интервал прокатки | °C                | $\theta_H - \theta_K$ | 1040 – 890         |

типоволожно вертикальным валкам. При прокатке кольцо центрируется роликами (см. рис. 1), которые удерживают его на оси стана и обеспечивают минимальную овальность кольца. При проведении экспериментальных измерений использован комплекс тензометрической аппаратуры, установленной на стане стационарно [25].

В процессе проведения экспериментальной прокатки в течение 5 с был выполнен выход на скорость роста наружного диаметра кольца  $V_d$ , которая системой управления станом с определенной точностью выдерживалась постоянной на основном этапе прокатки кольца (до 0,9 наружного диаметра кольца). Средняя скорость роста наружного диаметра кольца на указан-

ном этапе по экспериментальным данным составила  $V_d = 13,4$  мм/с.

При конечно-элементном моделировании, показанном на рис. 7, также выдерживали указанную скорость роста диаметра кольца, которая по существу и определила параметры, которые были измерены в процессе проведения экспериментальной прокатки.

Скорость роста наружного диаметра кольца зависит от величины обжатия  $\Delta h$ . Требуется, чтобы выполнялось условие:

$$|V_d - Sr| < \delta, \quad (1)$$

где  $Sr$  – требуемое значение скорости роста наружного диаметра кольца;  $\delta$  – заданная величина, определяющая точность выхода на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца.

Для обеспечения этого условия используем итерационный процесс для определения  $\Delta h$ . Опишем этот процесс. Зададимся начальной величиной  $\Delta h = \eta$ . Будем давать некоторое приращение величине  $\Delta h$  и вычислять соответствующее значение  $V_d$ . Начальная величина приращения  $d\Delta h$  пусть также будет также равна  $\eta$ .

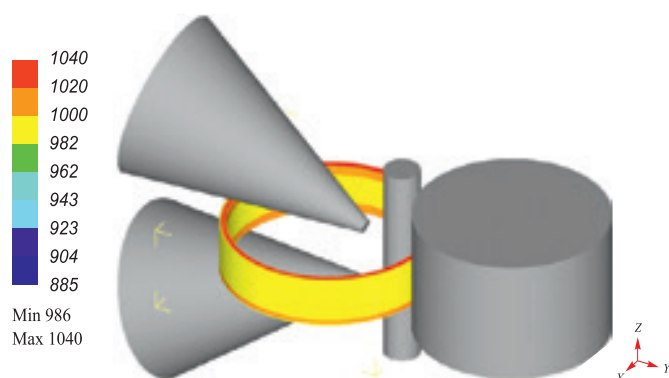


Рис. 7. Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольца (распределение температуры кольца)

Fig. 7. Visualization of finite element modeling of the ring rolling process (ring temperature distribution)

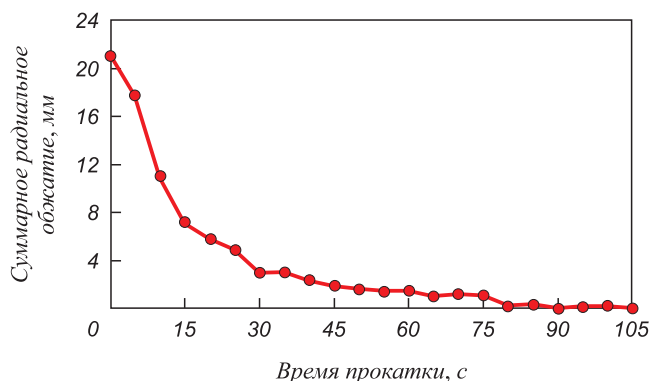


Рис. 8. Расчетная величина суммарного радиального обжатия

Fig. 8. Calculated value of the total radial reduction

Наращивая  $\Delta h$  с шагом  $d\Delta h$  может оказаться, что при некотором значении  $\Delta h$  условие (1) выполнится, значит поиск  $\Delta h$  можно прекратить.

Если этого не произошло, продолжаем наращивать  $\Delta h$  до тех пор, пока соответствующее значение  $V_d$  не превысит  $Sr$  более, чем на  $\delta$ . Тогда приращение  $d\Delta h$  делим на два и с этим приращением начинаем уменьшать значение  $\Delta h$ .

Если окажется, что значение  $V_d$  меньше  $Sr$  более, чем на  $\delta$ , текущее приращение  $d\Delta h$  снова делим на два и с этим приращением начинаем увеличивать  $\Delta h$ .

Таким образом, приращение  $d\Delta h$  делим на два каждый раз, когда увеличение обжатия  $\Delta h$  изменяем на его уменьшение, а также когда уменьшение обжатия  $\Delta h$  изменяем на его увеличение. Этот процесс продолжаем до тех пор, пока не выполнится условие (1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По существу предложенный и реализованный метод выполнения расчетов параметров процесса прокатки кольцевых заготовок на базе конечно-элементного моделирования при выходе на требуемую в соответствии с экспериментом скорость роста диаметра кольца, аналогичен способу работы системы управления кольце-прокатным станом при решении этой же задачи в ходе реализации соответствующей экспериментальной прокатки. Расчетные величины суммарных радиальных обжатий, обеспечившие выполнение условия (1), представлены на рис. 8.

Установлено, что среднее отклонение расчетной величины скорости роста наружного диаметра кольца (рис. 9) от экспериментальной составляет 12,2 %.

Максимальное отклонение расчетной величины наружного диаметра прокатанного кольца (рис. 10) от экспериментальной составляет 1,8 %. Среднее отклонение расчетной величины силы прокатки (рис. 11) от экспериментальной – 12,4 %.

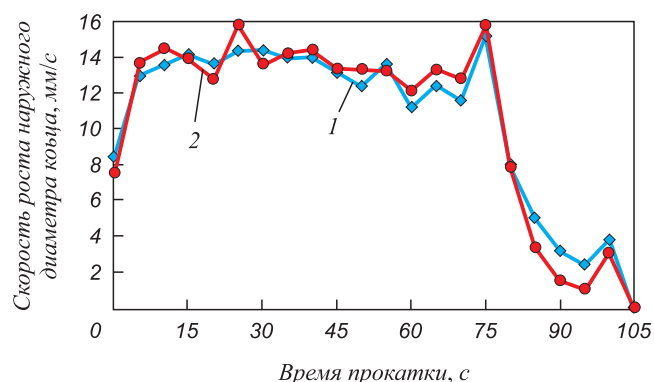


Рис. 9. Скорость роста наружного диаметра кольца:

1 –  $V_{d \text{ exp}}$ ; 2 –  $V_{d \text{ calc}}$

Fig. 9. Growth rate of the ring outer diameter:

1 –  $V_{d \text{ exp}}$ ; 2 –  $V_{d \text{ calc}}$

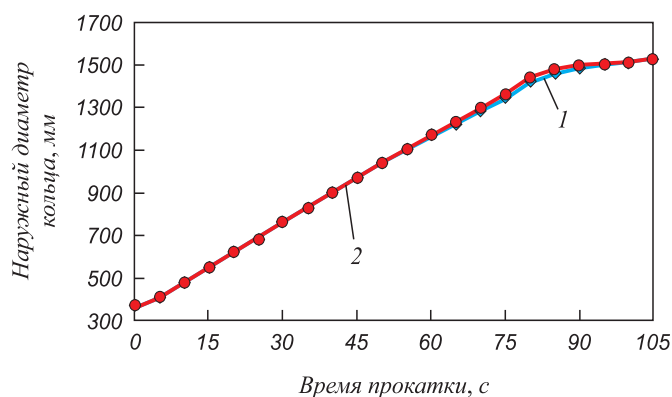


Рис. 10. Изменение наружного диаметра кольца:  
1 –  $D_{\text{эксп}}$ ; 2 –  $D_{\text{расч}}$

Fig. 10. Change of the ring outer diameter:  
1 –  $D_{\text{exp}}$ ; 2 –  $D_{\text{calc}}$

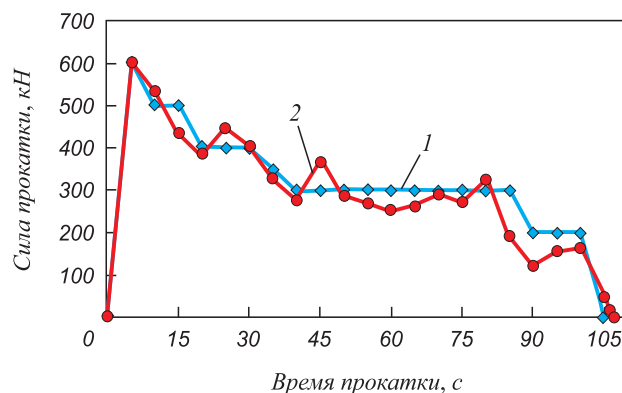


Рис. 11. Сила прокатки:  
1 –  $P_{\text{эксп}}$ ; 2 –  $P_{\text{расч}}$

Fig. 11. Rolling force:  
1 –  $P_{\text{exp}}$ ; 2 –  $P_{\text{calc}}$

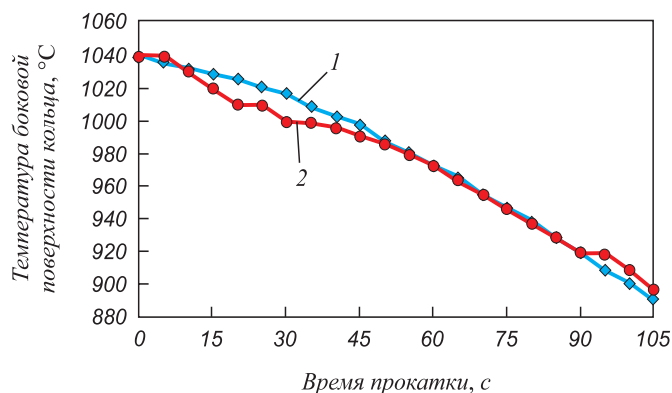


Рис. 12. Температура боковой поверхности кольца:  
1 –  $T_{\text{эксп}}$ ; 2 –  $T_{\text{расч}}$

Fig. 12. The temperature of the side surface of the ring:  
1 –  $T_{\text{exp}}$ ; 2 –  $T_{\text{calc}}$

Максимальное отклонение расчетной величины температуры поверхности кольца (рис. 12) от экспериментальной составляет 1,8 %.

## Выводы

Совершенствование метода моделирования процесса прокатки кольцевых заготовок на радиально-осевом кольцепрокатном стане заключается в следующем:

- определение напряжения течения металла при конечно-элементном моделировании процесса прокатки кольцевых заготовок выполнено на базе зависимости, учитывающей процессы динамического преобразования структуры при горячей прокатке;
- предложен усовершенствованный метод выполнения расчетов параметров процесса прокатки кольцевых заготовок и выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца. Метод реализуется в системе конечно-элементного моделирования, который аналогичен способу работы системы управления кольцепрокатным станом при решении этой же задачи (выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца) при реализации соответствующей прокатки на практике.

Качественный ход расчетных кривых (скорости роста наружного диаметра кольца, величины наружного диаметра кольца, силы прокатки и температуры боковой поверхности кольца) соответствует экспериментальным кривым. Средние отклонения расчетных величин от экспериментальных не превышают 12,4 %, что позволяет сделать вывод о возможности применения предложенного подхода для изучения закономерностей процесса прокатки колец и совершенствования технологии их прокатки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls // Metallurgist. 2012. Vol. 56. No. 3 – 4. P. 279 – 283.
2. Снитко С.А., Яковченко А.В., Сотников А.Л. Влияние схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного пресса и износ инструмента деформации // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 5. С. 385 – 392.
3. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics elastic-plastic deformation for hollow shapes used in energy absorption devices // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol. 18. No. 2. P. 30 – 34.
4. Belevitin V.A., Smirnov Y.N., Kovalenko S.Y. etc. Modeling of the energy potential saving in the production of seamless pipes // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 718 – 723.
5. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories // Metallurgist. 2008. Vol. 52. No. 7 – 8. P. 420 – 423.
6. Смирнов Е.Н., Смирнов А.Н., Скляр В.А. и др. Оценка технологической целесообразности снижения температуры начала прокатки в условиях стана с обжимными клетями трио // Сталь. 2018. № 6. С. 21 – 26.
7. Gorbatyuk S.M., Pavlov S.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experimental use of rotary rolling mills to deform compacts of refractory metals // Metallurgist. 1998. Vol. 42. No. 5 – 6. P. 178 – 183.
8. Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Смирнов А.Н. и др. Исследование влияния температурного состояния торцевой области кратной непрерывнолитой сортовой заготовки на растрескивание торцов раската при прокатке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 7. С. 539 – 547.

9. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 5. С. 410 – 415.
10. Seitz J., Schwich G., Guenther S., Hirt G. Investigation of a composite ring rolling process by FEM and experiment // The 12<sup>th</sup> Int. Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Process (NUMIFORM) 2016, 4 – 7.7.2016, Troyes (France). – Troyes: Curran Associates, Inc., 2016. P. 622 – 629.
11. Gorbatyuk S.M., Osadchii V.A., Tuktarov E.Z. Calculation of the geometric parameters of rotary rolling by using the automated design system autodesk inventor // Metallurgist. 2011. Vol. 55. No. 7 – 8. P. 543 – 546.
12. Lee K.H., Ko D.C., Kim D.H. etc. Design method for intermediate roll in multi-stage profile ring rolling process: the case for excavator idler rim // Int. Journal of Processing and Manufacturing. 2014. Vol. 15. No. 3. P. 503 – 512.
13. Seitz J., Jenkouk V., Hirt G. Manufacturing dish shaped rings on radial-axial ring rolling mills // Production Engineering. 2013. Vol. 7. No. 6. P. 611 – 618.
14. Li L., Yang H., Guo L., Sun Z. A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 205. No. 1 – 3. P. 99 – 110.
15. Park M., Lee Chanjoo, Lee Jungmin etc. Development of L-sectioned ring for construction machines by profile ring rolling process // Int. Journal of Processing and Manufacturing. 2016. Vol. 17. No. 2. P. 233 – 240.
16. Sun B., Xu J., Xing C. Numerical and experimental investigations on the effect of mandrel feeding speed for high-speed rail bearing inner ring // The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 100. No. 5 – 8. P. 1993 – 2006.
17. Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Speed roll laws influence in a ring rolling process // Key Engineering Materials. 2013. Vol. 554 – 557. P. 337 – 334.
18. Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Speed idle roll law optimization in a ring rolling process // Key Engineering Materials. 2015. Vol. 651 – 653. P. 248 – 253.
19. Allegri G., Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Driver roll speed influence in ring rolling process // 12<sup>th</sup> Int. Conference on the Technology of Plasticity (ITCP), 17 – 22.9.2017, Cambridge (United Kingdom). – Cambridge: Procedia Engineering. P. 1230 – 1235.
20. Giorleo L., Giardini C., Ceretti E. Validation of hot ring rolling industrial process 3D simulation // Int. Journal of Material Forming. 2013. Vol. 6. No. 1. P. 145 – 152.
21. Zhou P., Zhang L., Gu S. etc. Mathematic modeling and FE simulation of radial-axial ring rolling large L-section ring by shape axial roll // Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 72. No. 5 – 8. P. 729 – 738.
22. Kang J.H. Research on filling limit of profile ring rolling on circumferential surface // Int. Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. Vol. 4. No. 12. P. 40 – 45.
23. Deform 3D v6.1. Ring Rolling System Manual. – Columbus: Scientific Forming Technologies Corporation, 2007. – 30 p.
24. Солод В.С., Бейгельзимер Я.Е., Кулагин Р.Ю. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Металл и литье Украины. 2006. № 7 – 8. С. 52 – 56.
25. Яковченко А.В. Экспериментальные исследования энергосиловых и температурных параметров при нестационарном процессе прокатки колец // Металл и литье Украины. 1997. № 1. С. 44 – 45.
26. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
27. Яковченко А.В., Снитко С.А., Ивлева Н.И. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации: Учеб. пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – 197 с.

Поступила в редакцию 24 марта 2020 г.

После доработки 27 марта 2020 г.

Принята к публикации 12 августа 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 8, pp. 665–673.

## MODELING OF RING BILLETS ROLLING ON RADIAL-AXIAL RING-ROLLING MILL

S.A. Snitko<sup>1</sup>, A.V. Yakovchenko<sup>1</sup>, V.V. Pilipenko<sup>1</sup>, N.I. Ivleva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

<sup>2</sup>Private research and production enterprise “MOND”, Donetsk, Ukraine Donetsk, Ukraine

**Abstract.** On the basis of radial-axial rolling of ring billets, resource-saving technologies for metal forming have been created. Determining the rational parameters of this process is the actual scientific and technical task at development of new profiles. The method of three-dimensional finite element modeling is the most effective tool for improving the technological conditions of ring rolling process. However, as practice has shown, the finite element modeling method requires adaptation to each process of metal forming. This is the subject of the present work. The expediency of using dependency for calculating the metal flow stress for finite-element modeling of ring-rolling processes is substantiated. This dependence was developed on the basis of a theory that takes into account the chemical composition of structural carbon steel, its temperature, strain rate, accumulated deformation, and also the processes of dynamic transformation of the metal structure during hot rolling. A computer program for automated determination of dependency parameters has been developed. The analysis of the accuracy of the obtained dependence was performed in relation to the experimental data. In the course of these calculations, the method of automated determination of the metal flow stress was used by spline interpolation

of the experimental data included in the computer database of digital information for a particular steel grade. The average relative error of calculated values of the metal flow stress was 8 % relative to the experimental ones. An improved method is proposed for calculating the parameters of ring billets rolling and reaching the required growth rate of the ring diameter implemented in a finite element modeling system, which is similar to the way the control system of the ring-rolling mill works in solving the same problem (reaching the required growth rate of the ring diameter) when implemented appropriate rolling in practice. When calculating the size of the compression, the iterative process and the method of half division were used. The average deviations of calculated values of the parameters of ring billets rolling from the experimental did not exceed 12.4 %, which makes it possible to apply the proposed approach to study the patterns of the rings rolling process and to improve the rolling technology.

**Keywords:** ring billet rolling, ring-rolling mill, finite element modeling method, metal flow stress, industrial experiment, growth rate of ring diameter.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-665-673

## REFERENCES

1. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 3-4, pp. 279–283.

2. Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Sotnikov A.L. Influence of wheel billet stamping schemes on power modes of forming press operation and on wear of the deformation tool. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 385–392. (In Russ.).
3. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics elastic-plastic deformation for hollow shapes used in energy absorption devices. *CIS Iron and Steel Review*. 2019, vol. 18, no. 2, pp. 30–34.
4. Belevitin V.A., Smyrnov Y.N., Kovalenko S.Y., Suvorov A.V., Skliar V.A. Modeling of the energy potential saving in the production of seamless pipes. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 4, pp. 718–723.
5. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. *Metallurgist*. 2008, vol. 52, no. 7-8, pp. 420–423.
6. Smirnov E.N., Sklyar V.A., Smirnov A.N., Belevitin V.A., Eron'ko S.P., Pivovarov R.E. Effects of decreasing the initial rolling temperature in three-high roughing stands. *Steel in Translation*. 2018, vol. 48, no. 6, pp. 381–387.
7. Gorbatyuk S.M., Pavlov S.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experimental use of rotary rolling mills to deform compacts of refractory metals. *Metallurgist*. 1998, vol. 42, no. 5-6, pp. 178–183.
8. Smirnov E.N., Sklyar V.A., Smirnov A.N., Belevitin V.A., Pivovarov R.E. Influence of thermal state of the end area of multiple continuous-cast billet on cracking of the ends of hot-rolled breakdown at rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 7, pp. 539–547. (In Russ.).
9. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410–415. (In Russ.).
10. Seitz J., Schwich G., Guenther S., Hirt G. Investigation of a composite ring rolling process by FEM and experiment. In: *The 12<sup>th</sup> Int. Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Process (NUMIFORM)*. 2016, 4-7.7.2016, Troyes (France). Troyes: Curran Associates, Inc., 2016, pp. 622–629.
11. Gorbatyuk S.M., Osadchii V.A., Tuktarov E.Z. Calculation of the geometric parameters of rotary rolling by using the automated design system autodesk inventor. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 7-8, pp. 543–546.
12. Lee K.H., Ko D.C., Kim D.H., Lee S.B., Sung N.M., Kim B.M. Design method for intermediate roll in multi-stage profile ring rolling process: the case for excavator idler rim. *Int. Journal of Processing and Manufacturing*. 2014, vol. 15, no. 3, pp. 503–512.
13. Seitz J., Jenkouk V., Hirt G. Manufacturing dish shaped rings on radial-axial ring rolling mills. *Production Engineering*. 2013, vol. 7, no. 6, pp. 611–618.
14. Li L., Yang H., Guo L., Sun Z. A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, vol. 205, no. 1-3, pp. 99–110.
15. Park M., Lee Chanjoo, Lee Jungmin, Lee Inkyu, Kim B., Lee Kyunghun. Development of L-sectioned ring for construction machines by profile rolling process. *Int. Journal of Processing and Manufacturing*. 2016, vol. 17, no. 2, pp. 233–240.
16. Sun B., Xu J., Xing C. Numerical and experimental investigations on the effect of mandrel feeding speed for high-speed rail bearing inner ring. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 100, no. 5-8, pp. 1993–2006.
17. Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Speed roll laws influence in a ring rolling process. *Key Engineering Materials*. 2013, vol. 554-557, pp. 337–334.
18. Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Speed idle roll law optimization in a ring rolling process. *Key Engineering Materials*. 2015, vol. 651-653, pp. 248–253.
19. Allegri G., Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Driver roll speed influence in ring rolling process. In: *12<sup>th</sup> Int. Conference on the Technology of Plasticity (ITCP)*, 17-22.9.2017, Cambridge (United Kingdom). Cambridge: Procedia Engineering, pp. 1230–1235.
20. Giorleo L., Giardini C., Ceretti E. Validation of hot ring rolling industrial process 3D simulation. *Int. Journal of Material Forming*. 2013, vol. 6, no. 1, pp. 145–152.
21. Zhou P., Zhang L., Gu S., Ruan J., Teng L. Mathematic modeling and FE simulation of radial-axial ring rolling large L-section ring by shape axial roll. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, vol. 72, no. 5-8, pp. 729–738.
22. Kang J.H. Research on filling limit of profile ring rolling on circumferential surface. *Int. Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014, vol. 4, no. 12, pp. 40–45.
23. *Deform 3D v6.1. Ring Rolling System Manual*. Columbus: Scientific Forming Technologies Corporation, 2007, 30 p.
24. Solod V.S., Beigel'zimer Ya.E., Kulagin R.Yu. Mathematical modeling of deformation stress during hot rolling of carbon steels. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2006, no. 7-8, pp. 52–56. (In Russ.).
25. Yakovchenko A.V. Experimental studies of power and temperature parameters during non-stationary ring rolling process. *Metall i lit'e Ukrainy*. 1997, no. 1, pp. 44–45. (In Russ.).
26. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivleniye plasticheskoi deformatsii metallov i spлавov: spravochnik* [Plastic strength of metals and alloys: Guide]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 488 p. (In Russ.).
27. Yakovchenko A.V., Snitko S.A., Ivleva N.I. *Metody komp'yuternogo modelirovaniya napryazheniya techeniya metalla v protsessakh goryachei plasticheskoi deformatsii: ucheb. posobie* [Computer modeling techniques for metal flow stresses during hot plastic deformation: Manual]. Donetsk: DonNTU, 2018, 197 p. (In Russ.).

#### Information about the authors:

**S.A. Snitko**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Metal Forming" (snitko\_sa@mail.ru)

**A.V. Yakovchenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming" (mond1991@mail.ru)

**V.V. Pilipenko**, Postgraduate of the Chair "Metal Forming" (VictorPilipenkoDNTU@gmail.com)

**N.I. Ivleva**, Application Programmer (ivl22@mail.ru)

Received March 24, 2020

Revised March 27, 2020

Accepted August 12, 2020