

УДК 621.771.01

Капанов В. И.
Иванов А. А.
Коренко М. Г.
Картавенко А. С.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ЛЕНТОЧНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИХ ГОРЯЧЕМ ПЛЮЩЕНИИ И ПРОКАТКЕ В РАЗГОННЫХ КАЛИБРАХ

Многообразие технологических схем процесса горячей прокатки, реализуемых на штрипсовых и сортовых станах [1], свидетельствует о целесообразности использования не только одномерных по кинематике методов расчета [2], а и более строгих двух- и трехмерных численных методов анализа напряженно-деформированного состояния металла. Отмеченное в полной мере касается реализуемых на ряде сортовых станов процессов горячего плющения (рис. 1) и процессов горячей прокатки ленточных заготовок с использованием разгонных калибров (рис. 2), предназначенных для обеспечения возможности целенаправленного изменения конечной ширины $b_{1к}$ при фиксированном значении конечной толщины $h_{1к}$ [3, 4]. Вместе с тем специфика, имеющего место в этом случае механизма формирования напряженно-деформированного состояния металла делает необходимым и разработку соответствующих методов его расчета.

Целью работы является разработка конечно-элементных трехмерных математических моделей напряженно-деформированного состояния металла при реализации процессов горячего плющения и прокатки ленточных заготовок в разгонных калибрах.

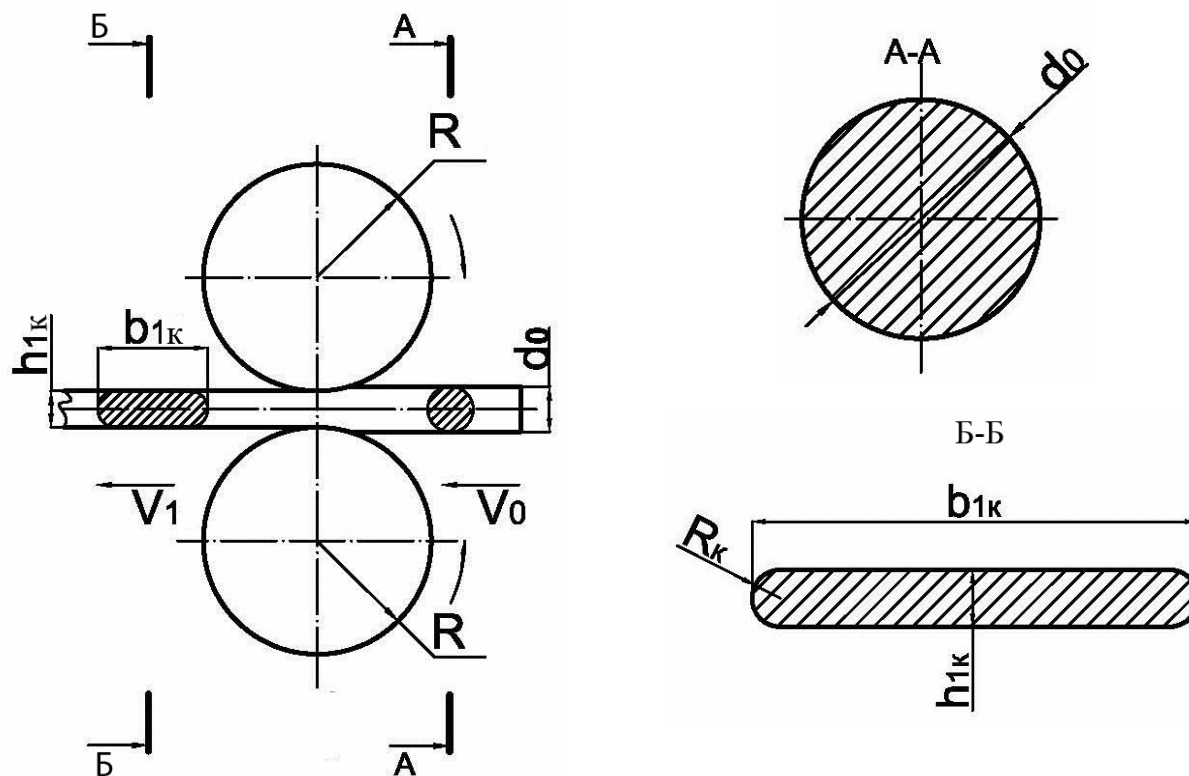


Рис. 1. Технологическая схема процесса плющения применительно к производству горячекатаных ленточных заготовок

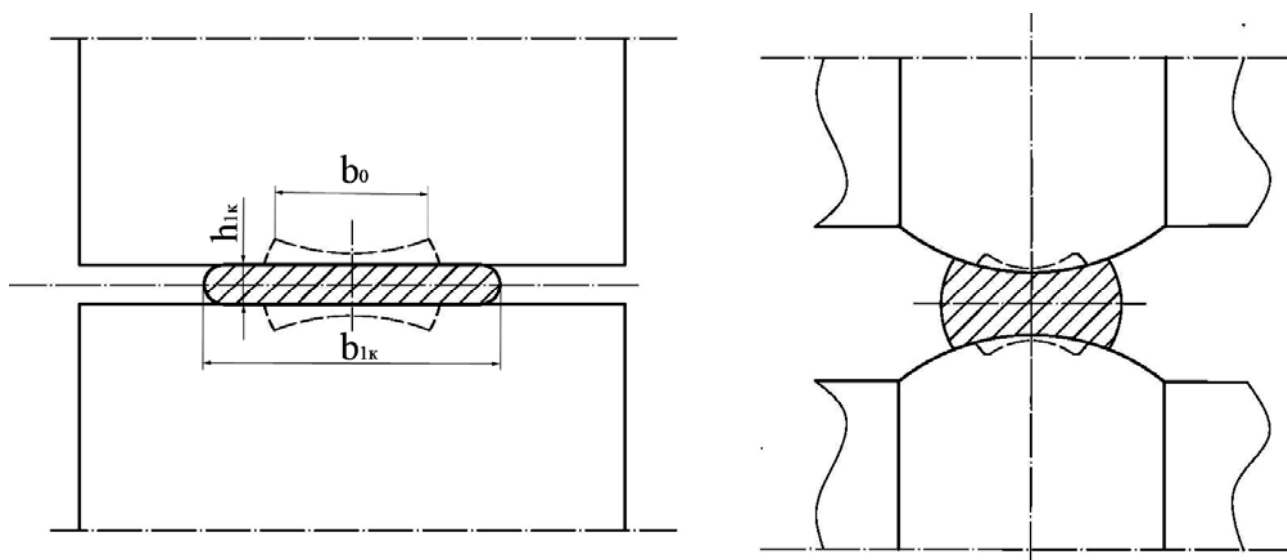


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема условий реализации процесса производства горячекатаных лент на основе плющения исходных круглых заготовок с использованием разгонных калибров

Решение данной задачи было осуществлено с использованием программного комплекса QForm-3D [5], обеспечивающего моделирование всех стадий процесса горячей прокатки, начиная с анализа условий захвата заготовки рабочими валками и её последующей пластической деформации по переходам.

Данный программный комплекс позволяет генерировать конечно-элементную сетку в полностью автоматическом режиме без какого-либо вмешательства со стороны пользователя. Плотность сетки зависит от формы валков и заготовки, от хода моделирования и других параметров, в результате, сетка, сгенерированная программой, имеет более высокое качество, чем если бы она создавалась опытными специалистами в области метода конечных элементов. Адаптивный самоконтролируемый алгоритм обеспечивает оптимальную плотность сетки, то есть меньшие элементы автоматически создаются в критических областях для анализа особых эффектов, таких как дефекты течения материала и другие. Результаты моделирования показываются с помощью 3D-графики в процессе моделирования, что позволяет получать постоянный отклик со стороны программы [5].

Основными отличительными особенностями использования конечно-элементного ядра QForm-3D являются:

- объемная конечно-элементная сетка – линейные тетраэдры, поверхностная пространственная сетка – квадратичные треугольники;
- построение конечно-элементной сетки как на поверхности, так и в объеме полностью автоматическое без вмешательства пользователя. Перестроение и адаптация сетки производится также автоматически, исходя из требуемой точности решения задачи;
- пошаговая процедура расчета формоизменения при прокатке является адаптивной с автоматическим выбором шага по времени;
- материал заготовки рассматривается как вязкопластическое тело, а материал инструментов – упруго-пластический, либо абсолютно твердый;
- механические свойства металла зависят от степени, скорости и температуры деформации.

Среди возможностей расчетной программы можно отметить то, что пластическое формоизменение заготовки рассматривается с учетом тепловых процессов, при этом теплообмен между заготовкой и инструментами учитывается коэффициентом теплопередачи.

Непосредственно численная модель процессов горячей прокатки основана на основных элементах теории течения [6]. В частности, материал заготовки рассматривается как

несжимаемое жесткопластическое тело. Упругие деформации не рассматриваются ввиду их незначительной величины по сравнению с пластическим формоизменением заготовки, а система исходных уравнений включает в себя:

– уравнение движения:

$$\sigma_{ij,j} + \rho(dv_i/dt) = 0; \quad (1)$$

– кинематические соотношения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i})/2; \quad (2)$$

– определяющие уравнения:

$$\sigma_{ij} = 2\bar{\sigma}\dot{\varepsilon}_{ij}/(3\dot{\varepsilon}); \quad (3)$$

– условие несжимаемости:

$$v_{i,i} = 0; \quad (4)$$

– уравнение теплопроводности:

$$\rho c T = (k_1 T_i)_i + \beta \bar{\sigma} \dot{\varepsilon}; \quad (5)$$

– уравнение сопротивления деформации для жесткопластического материала:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, T), \quad (6)$$

где $\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, v_i$ – тензоры напряжений, скоростей деформации и вектор скорости соответственно; S_{ij} – девиатор тензора напряжений; $\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}$ – интенсивность напряжений, деформаций и скоростей деформаций соответственно; T, c, k_1 – температура деформируемой заготовки, а также теплоемкость и теплопроводность ее материала; β – коэффициент перехода энергии деформации в тепло, принимаемый равным 0,90...0,95.

В плоскости сопряжения деформируемой заготовки и инструмента количественная оценка касательных контактных напряжений производится в соответствии с законом Леванова [7]:

$$F_t = m \bar{\sigma} \left(1 - e^{-1,25(\sigma_n/\bar{\sigma})}\right) / \sqrt{3}, \quad (7)$$

где m, σ_n – фактор трения и величина нормальных контактных напряжений.

Дискретизацию уравнений (1)–(4) производили на основе принципа виртуальных скоростей и работ, а также метода конечных элементов. Неизвестными являются узловые значения скоростей и средних напряжений. Конечно-элементная сетка состоит из линейных четырехузловых тетраэдров и квадратичных треугольников с шестью узлами [8]. Инструмент, рассматриваемый как абсолютно жесткое тело и пластически формоизменяемая заготовка импортируется из CAD-систем при помощи STEP или IGES форматов.

В качестве примера результатов численной реализации рассмотренного программного продукта, на рис. 3 представлены исходные и результирующие геометрические характеристики, а также расчетные распределения деформаций и напряжений, полученные применительно к условиям реализации процесса горячего плющения исходной заготовки диаметром 10 мм из стали 10. В соответствии с технологическими режимами работы мелкосортного прокатного стана 250-2 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» [1] конечная толщина в этом случае соответствовала $h_1 \approx 7$ мм, а радиус рабочих валков принят равным $R = 150$ мм. Аналогичные результаты были получены применительно к конечным толщинам 9 мм и 8 мм, а их количественные оценки сведены в табл. 1.

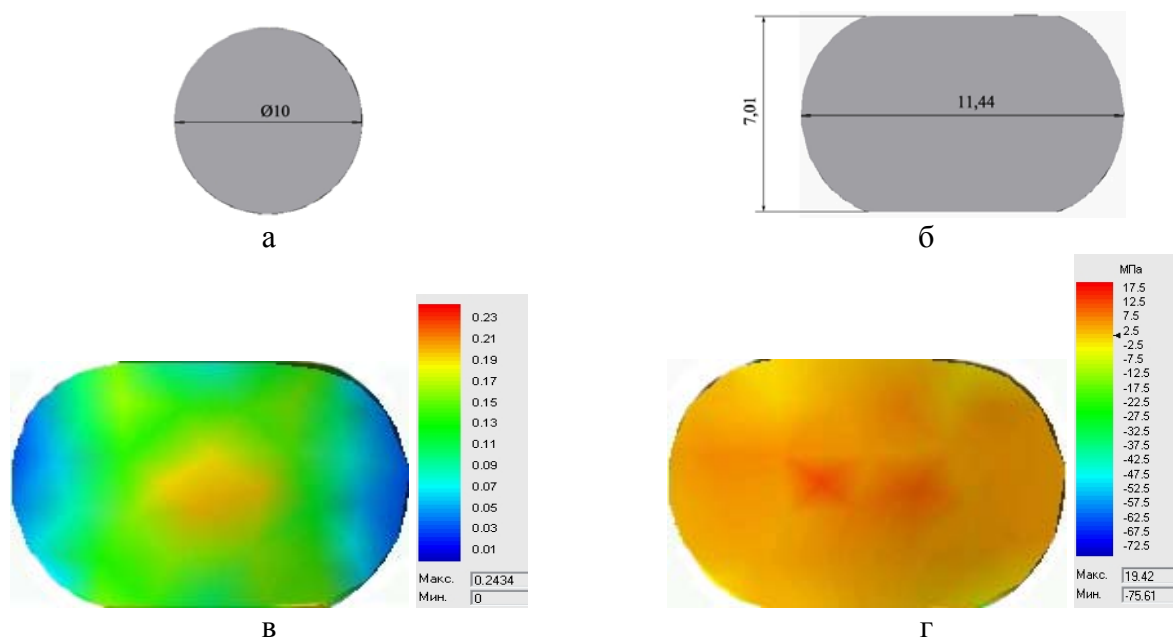


Рис. 3. Исходные (а) и результирующие (б) геометрические характеристики заготовки, а также расчетные распределения деформаций (в) и напряжений (г), полученные на основе метода конечных элементов применительно к условиям реализации процесса горячего плющения на мелкосортном стане 250-2 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Таблица 1

Расчетные значения результирующих геометрических характеристик поперечного сечения ленточных заготовок, полученные на основе метода конечных элементов применительно к условиям реализации процесса горячего плющения (см. рис. 1, 3)

№	d_0 , (мм)	h_1 , (мм)	B_1 , (мм)	F_0 , (мм ²)	F_1 , (мм ²)	$\lambda = F_0 / F_1$
1	10	9,0	10,2	78,5	75,9	1,034
2	10	8,0	10,7	78,5	73,5	1,068
3	10	7,0	11,4	78,5	71,1	1,104

Аналогичные расчеты были проведены и применительно к процессу горячей прокатки ленточных заготовок с использованием разгонных калибров (см. рис. 2). При этом в качестве моделируемой технологической схемы рассматривали процесс горячей прокатки исходной плоской заготовки одного и того же поперечного сечения $h_0 \times B_0 = 17,5 \times 45$ (мм), первоначально в разгонных калибрах с различным радиусом выпуклости R_{pk} (табл. 2, рис. 4) и с последующей прокаткой лент одной и той же конечной толщины в цилиндрических рабочих валках (см. рис. 2, рис. 5).

Таблица 2

Геометрические характеристики поперечных сечений заготовок, используемые при конечно-элементном математическом моделировании процесса горячей прокатки в рабочих валках с разгонными калибрами

№ п/п	Обозначения на рис. 4	R_{pk} , мм	B_0 , мм	Обозначения на рис. 5	h_1 , мм	B_1 , мм
1	а	0,0	54,2	а	7,5	57,1
2	б	337	53,7	б	7,5	58,5
3	в	203	53,5	в	7,5	59,7
4	г	102	53,1	г	7,5	61,3

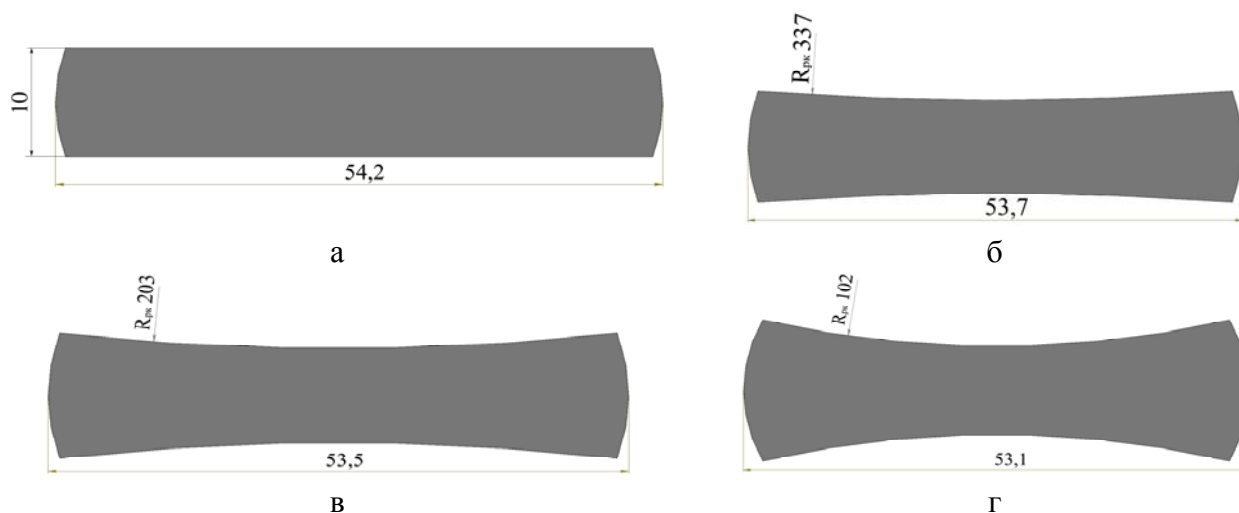


Рис. 4. Расчетные значения геометрических характеристик поперечных сечений горячекатаных заготовок после прокатки в цилиндрических (а) и в рабочих валках с разгонными калибрами различного радиуса выпуклости $R_{вк}$ (б, в, г) (см. табл. 2)

Анализ полученных результатов (см. рис. 3, табл. 1) показал, что с повышением уровня относительного обжатия наряду с увеличением основных компонент напряженно-деформированного состояния и конечной ширины, имеет место увеличение показателя вытяжки в осевом направлении λ . Отмеченное свидетельствует о наличии пластического течения металла не только в поперечном, а и в продольном направлениях. С увеличением относительного обжатия интенсивность продольного пластического течения возрастает, что должно быть учтено при расчете результирующих геометрических характеристик и расчете энергосиловых параметров собственно самого процесса горячего плющения.

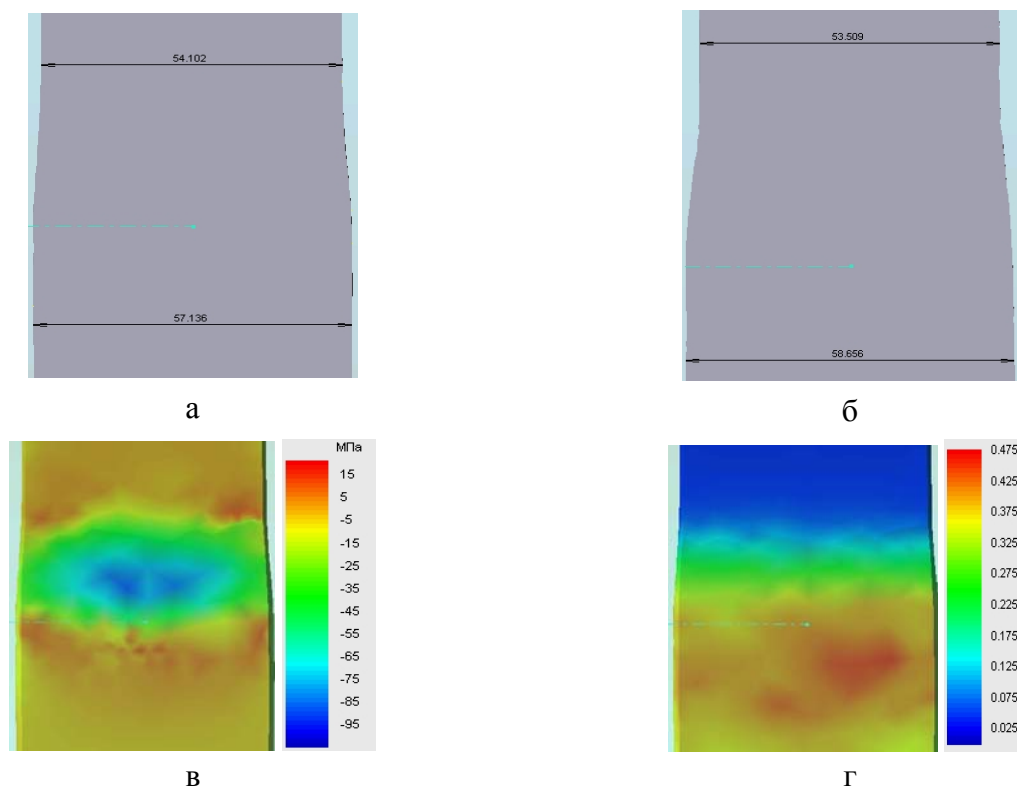


Рис. 5. Расчетные, полученные на основе конечно-элементного подхода, значения геометрических характеристик ленточных заготовок, полученных после горячей прокатки без использования (а) и с использованием разгонных калибров (б) (см. табл. 2, рис. 4), а также, имеющие место в этом случае распределения деформаций (в) и напряжений (г)

Использование технологий процесса горячей прокатки ленточных заготовок в разгонных калибрах позволяет при прочих равных условиях регулировать их конечную толщину B_1 в достаточно широком диапазоне (см. рис. 5, табл. 2). В частности, если при прокатке по традиционной схеме, то есть в цилиндрических рабочих валках, конечная величина уширения составила 12,1 (мм), то при прокатке с использованием разгонных калибров она может достигнуть 16,3 (мм), то есть увеличиться на 32,5 %. Отмеченное подтверждает эффективность рассмотренной технологической схемы с точки зрения дополнительной степени свободы по целенаправленному регулированию конечных геометрических характеристик горячекатаных ленточных заготовок, при этом в качестве математического обеспечения данного регулирования могут быть использованы полученные в рамках данной работы программные средства, основанные на реализации конечно-элементного подхода (см. рис. 5).

ВЫВОДЫ

С использованием конечно-элементного программного комплекса QForm-3D разработаны математические модели напряженно-деформированного состояния металла при горячем плющении и прокатке ленточных заготовок в разгонных калибрах, реализуемых на сортовых прокатных станах с целью расширения сортамента готовой металлопродукции. Установлено, что реализация данных технических решений позволяет при прочих равных условиях целенаправленно изменять величину уширения получаемых заготовок в диапазоне до 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокатные станы : справочник. В 3 т. Т. 2. Средне-мелкосортные и специальные станы / В. Г. Антилип, С. В. Тимофеев, Д. К. Нестеров [и др.]. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1992. – 429 с.
2. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
3. Капанов В. И. Пути развития производства плющенной ленты / В. И. Капанов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1(20). – С. 205–208.
4. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка. В 6 т. Т. 1. Основы теории калибровки : справочник / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под. ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 506 с.
5. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей сортовой прокатке угловых профилей / А. В. Сатонин, В. В. Смолякова, П. М. Стежкин // Известия вузов. Черная металлургия. – Москва : МИСИС, 2010. – № 11. – С. 16–21.
6. Zienkiewicz O. C. Flow formulation for numerical solution of metal forming processes. In Numerical analyses of forming processes / J. F. T. Pittman, O. C. Zienkiewicz, R. D. Wood, J. M. Alexander. – 1984. – P. 41–44.
7. Леванов А. Н. Контактное трение в процессах ОМД / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин [и др.]. – Москва, 1976. – 188 с.
8. Biba N. 3D Finite Element Simulation of Material Flow / N. Biba, S. Stiebunov // Metallurgia. – 2002. – V. 69, No. 2. – P. FT8–FT10.

Капанов В. И. – д-р техн. наук, проф. ПГТУ;

Иванов А. А. – ассистент кафедры АММ ДГМА;

Коренко М. Г. – аспирант ПГТУ;

Картавенко А. С. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua