

АДЕКВАТНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ГИЛЬЗ НА ТРЁХВАЛКОВОМ НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ И ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА

УО «Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого»
г. Гомель, Беларусь

Впервые была создана численная модель процесса раскатки гильз на трёхвалковом непрерывном стане, которая позволяет определить напряжения, деформации и температуру на валках, в оправке и в обрабатываемом металле. Определена возможность численного моделирования износа валков и оправок. Для решения этих задач был использован метод конечных элементов.

Адекватность модели доказана сравнением расчётных и фактических значений силовых и геометрических параметров прокатки, отклонения составили не более 3 %.

For the first time a numerical model of the shell elongating process on a three roll continuous mill, which allows to determine stresses, deformations and temperature on the rolls, in a mandrel and in processed metal, was developed. The possibility of numerical simulation of the wear of rolls and mandrels is determined. The finite element method was used to solve these problems.

The adequacy of the model is proved by comparison of calculated and actual values of power and geometrical parameters of rolling, the deviations are less than 3%.

Введение

В современном трубопрокатном производстве существуют нерешенные проблемы, связанные с низкой стойкостью инструмента и с нестабильными качественными показателями получаемой продукции. Проблемы вызваны повышенными механическими и термическими нагрузками в очаге деформации. Для решения этих проблем используются следующие подходы или методологии решения:

1) Экспериментальная отработка разных вариантов режимов прокатки с целью опытного определения оптимальных параметров, повышающих стойкость инструмента и качество продукции. Такой подход можно назвать эмпирическим.

2) Аналитическое определение оптимальных режимов прокатки с помощью теоретических, эмпирических зависимостей, способствующих повышению стойкости инструмента и качества продукции. Такой подход можно назвать аналитическим.

3) Построение адекватных численных моделей процесса прокатки с помощью компьютерных вычислений на основе математических зависимостей реологии упругой и пластической деформации металлов. Определение режимов раскатки с помощью численной модели, обеспечивающих рост стойкости инструмента и качества продукции. Такой подход можно назвать численным моделированием.

Первый подход характеризуется наивысшей степенью адекватности, так как реализуется непосредственно на действующем технологическом оборудовании. Однако, по объему затрат на проведение исследований это самый дорогостоящий и длительный метод исследований. Если учесть, что трубопрокатный агрегат в цеху часто один, то подобные производственные исследования существенно снижают объем производства всего цеха или часто не выполнимы.

Второй подход имеет существенное преимущество, заключающееся в самых малых затратах на его выполнение. Однако теоретические зависимости всегда идеализированы, так как получены на основе математических допущений. Эмпирические формулы всегда привязаны к условиям опытов, при которых они получены. В этой связи можно принять этот подход как самый простой, но имеющий самую низкую адекватность.

Третий подход появился в современном металлургическом производстве относительно недавно с развитием компьютерной техники и программных продуктов, позволяющих строить адекватные виртуальные процессы металлообработки, в том числе процессов прокатки труб. При их использовании отпадает необходимость в высоких затратах на натуральный эксперимент, так как выполняется виртуальный эксперимент. Точность численных расчетов значительно превышает точность аналитического подхода. Дополнительно появляется возможность определения механических и термических нагрузок по всему объему очага деформации, что позволяет расчетным путем прогнозировать интенсивность реального износа инструмента и геометрии получаемых гильз.

Одним из важнейших этапов получения стальных бесшовных труб в трубопрокатном производстве является получение черновой трубы раскаткой гильзы на раскатном стане.

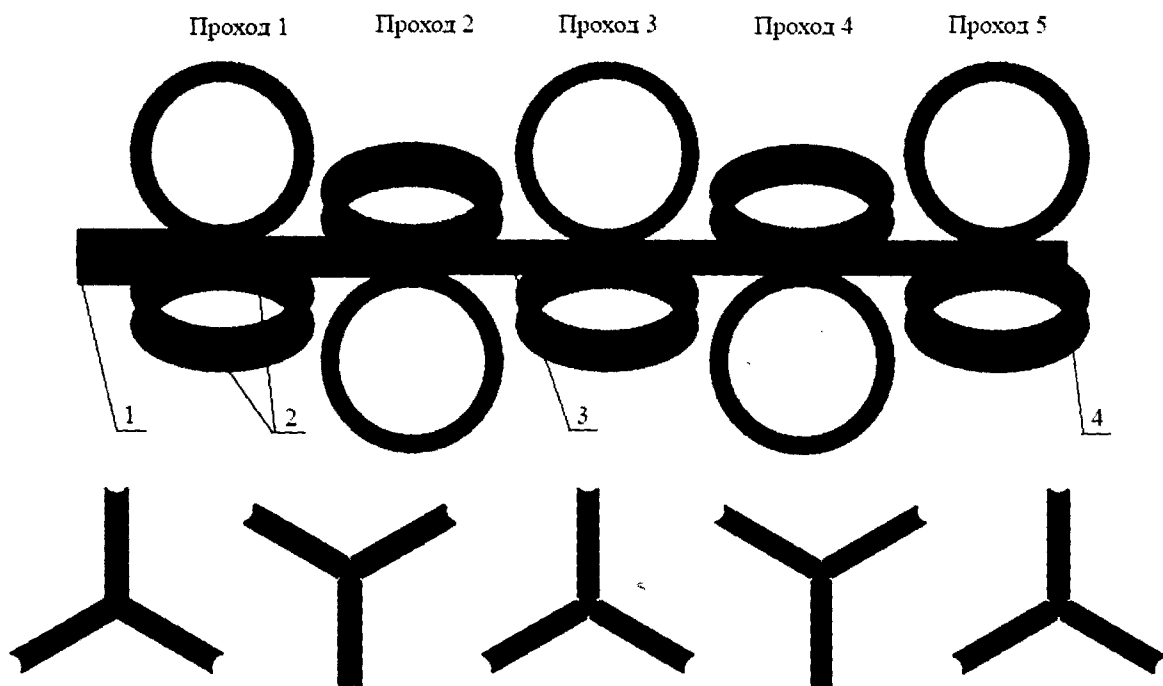


Рис. 1. Принципиальная схема трехвалковой раскатки:

1 — заготовка (гильза); 2 — прокатные валки; 3 — оправка; 4 — раскатанная труба

Раскатка осуществляется деформацией стенки трубы между оправкой и прокатными валками в нескольких прокатных клетях, обеспечивающее равномерное обжатие стенки трубы. Диаметр оправки определяет внутренний диаметр трубы, а последовательно расположенные круглые калибры, уменьшающиеся в размерах по ходу прокатки, обеспечивают получение необходимого наружного диаметра (рис. 1):

В настоящее время процессы деформации труб в трехвалковых станах недостаточно изучены и требуют разработки и научного обоснования.

Для того, что бы получать трубу стабильного качества необходимо иметь возможность оперативного изменения настроечных параметров раскатного стана.

Так как экспериментальное определение оптимальных параметров процесса при действующем производстве в промышленных условиях связано с большими затратами, наиболее оптимальным для решения этой задачи будет применение метода численного моделирования. В известных источниках отсутствуют сведения о наличии численной модели процесса раскатки гильз на трёхвалковом непрерывном раскатном стане.

Цель данной работы — разработать адекватную численную модель процесса раскатки черновых труб на трёхвалковом непрерывном раскатном стане, которая позволяет определять значения напряжений, деформаций и температурных параметров в очаге деформации, силовые параметры, действующие на инструмент, а так же прогнозировать износ прокатного инструмента.

Основная часть

Разработка адекватной численной модели процесса раскатки гильз на трёхвалковом непрерывном раскатном стане выполнялась в следующей последовательности: разработка геометрической модели процесса; построение конечно-элементной сетки; выбор формулировки для решения задачи; задание граничных и начальных условий; расчет параметров раскатки и их сравнение с параметрами, взятыми с реального процесса.

Полученная трехмерная геометрическая модель процесса раскатки представлена на рис. 2:

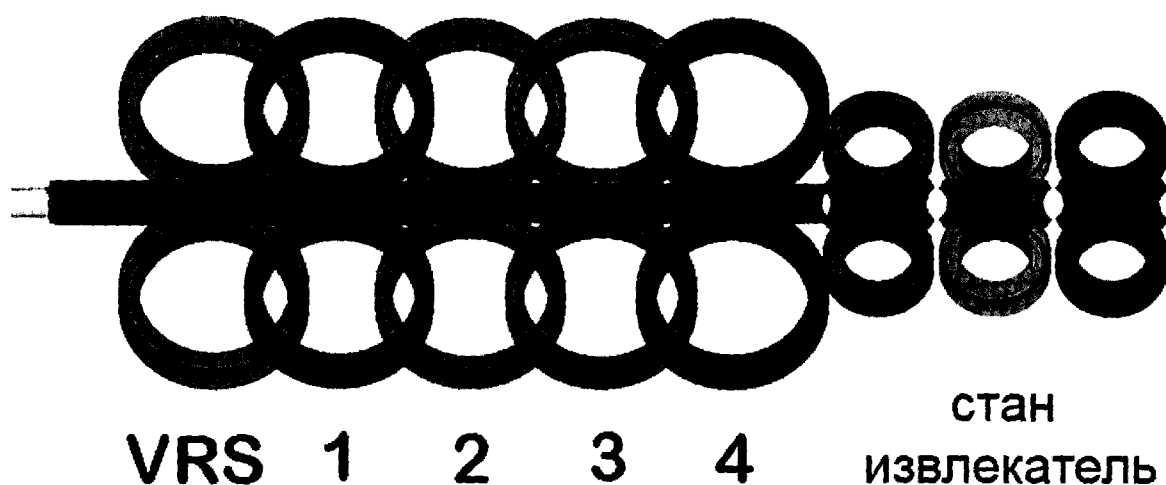


Рис. 2. Трёхмерная модель процесса раскатки

Для построения конечно-элементной сетки геометрическая модель заготовки разбивается на конечные элементы (КЭ). Для данной задачи выбран тип элементов — гексаэдр. В каждом из узлов КЭ имеется по три степени свободы u , v , w , представляющие собой линейные перемещения вдоль осей X_1 , Y_1 , Z_1 (рис. 3).

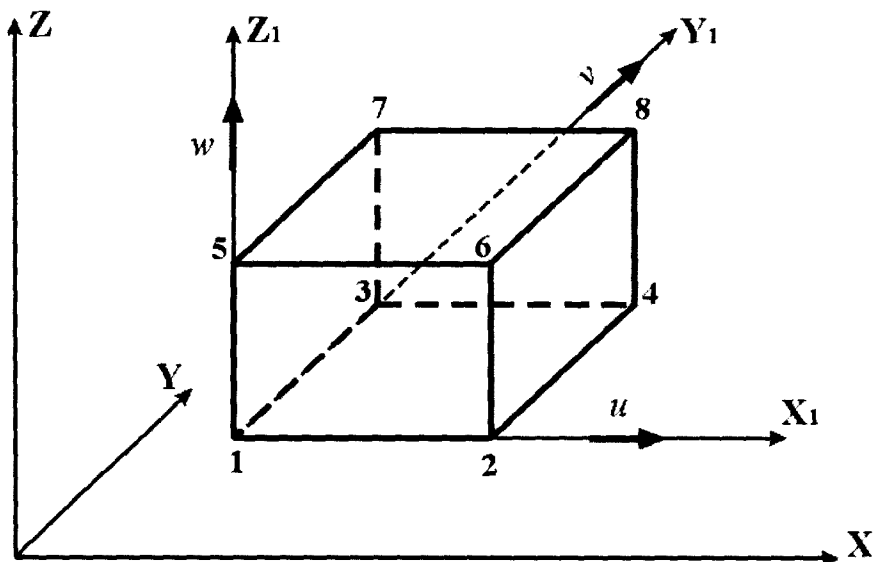


Рис. 3. Тип расчетного конечного элемента

Задача численного расчета сводится к определению температурного и напряжённо-деформированного состояния заготовки при комбинированном воздействии на неё сил со стороны валков и оправки.

Для решения задачи численного моделирования выбрана формулировка Лагранжа-Эйлера, которая позволяет обеспечить требуемую точность и корректность результатов при моделировании процессов связанных с большими величинами деформаций [1].

Для материала черновой трубы принимается упругопластическая модель Мизеса, включающая деформационное пластическое упрочнение и эффект Боушингера [2]:

$$\sigma_{\varepsilon}(\varepsilon_p, \varepsilon_p, T) = [A + B(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - T_{отн}], \quad (1)$$

где σ_{ε} — напряжения текучести, МПа;

ε_p — пластическая деформация;

$\dot{\varepsilon}_p$ — интенсивность пластических деформаций;

$T_{отн}$ — относительная температура, отнесенная к температуре плавления $T_{пл}$.

При горячей прокатке металла одно из контактирующих тел находится в состоянии пластического течения. Существенное влияние на трение имеет температура. Так как раскатка труб осуществляется при температурах порядка 1100 °С, то это приводит к образованию оксидных плёнок на поверхности заготовки, которые совместно с водой, паром и другими загрязнителями служат разделительной средой между поверхностями контакта. Следовательно принимается вид трения — полусухой.

Принимается, что контактное трение подчиняется закону Амонтона-Куллона, а коэффициент трения по всей поверхности принимается постоянным.

Моделирование процессов износа является достаточно сложной задачей с точки зрения описания и реализации, так как при её решении необходимо учитывать влияние большого количества различных факторов.

Для моделирования износа прокатного инструмента была применена модель износа Арчарда [3]:

$$W = \int \frac{K}{H} \cdot P \cdot |V_{rel}| dt, \quad (2)$$

где W — износ;
 H — твёрдость, НВ;
 K — коэффициент износа;
 P — контактное давление, МПа;
 V_{rel} — относительная скорость, м/с;
 t — время, с.

После построения численной модели процесса раскатки выполнялось исследование этого процесса. Перечень геометрических параметров заготовок и скоростных режимов раскатки представлен в табл. 1–3:

Табл. 1

Перечень исследуемых труб

Размер готовой трубы		Диаметр заготовки, мм	Марк стали
Диаметр, мм	Толщина стенки, мм		
70	6,3	140	20Г2
168,3	4,5	200	20
168	6,3	200	ТТ309

Табл. 2

Таблица прокатки производства исследуемых труб

Размер трубы	Прошивной стан		Раскатной стан			Стан извлекатель		Редукционный стан	
	D , мм	S , мм	D , мм	S , мм	$D_{опр}$, мм	D , мм	S , мм	D , мм	S , мм
70×6,3	150	11,3	125,6	5,81	113,9	118	5,92	70,7	6,33
168,3×4,5	215	13,8	184,3	4,38	175,4	175	4,48	170	4,55
168×6,3	215	13,8	183,2	6,2	170,6	175	6,3	169,7	6,33

Табл. 3

Скоростные режимы прокатки исследуемых труб

Размер трубы	Скорость оправки, мм/с	Скорость вращения клетей, об/мин				
		VRS	1	3	3	4
70×6,3	1,56	700,92	588,13	636	589,98	630,32
168,3×4,5	1,38	497	569,38	673	656,5	639
168×6,3	1,62	643	556	645	626,22	651

Для того чтобы численная модель полностью отражала реальный процесс прокатки труб необходимо определить расхождения между значениями полученными в ходе виртуальных экспериментов и значениями, снятых с действующего процесса раскатки.

Сопоставляя расчётные и экспериментальные данные возможно определить и учесть все нюансы процесса, и добиться полной адекватности модели, которая будет полностью описывать весь процесс.

Сравнивались такие параметры как: средняя нагрузка, действующая на валки каждой клети (рис. 4), а так же геометрические параметры черновой трубы на выходе из последней клети раскатного стана (табл. 4).

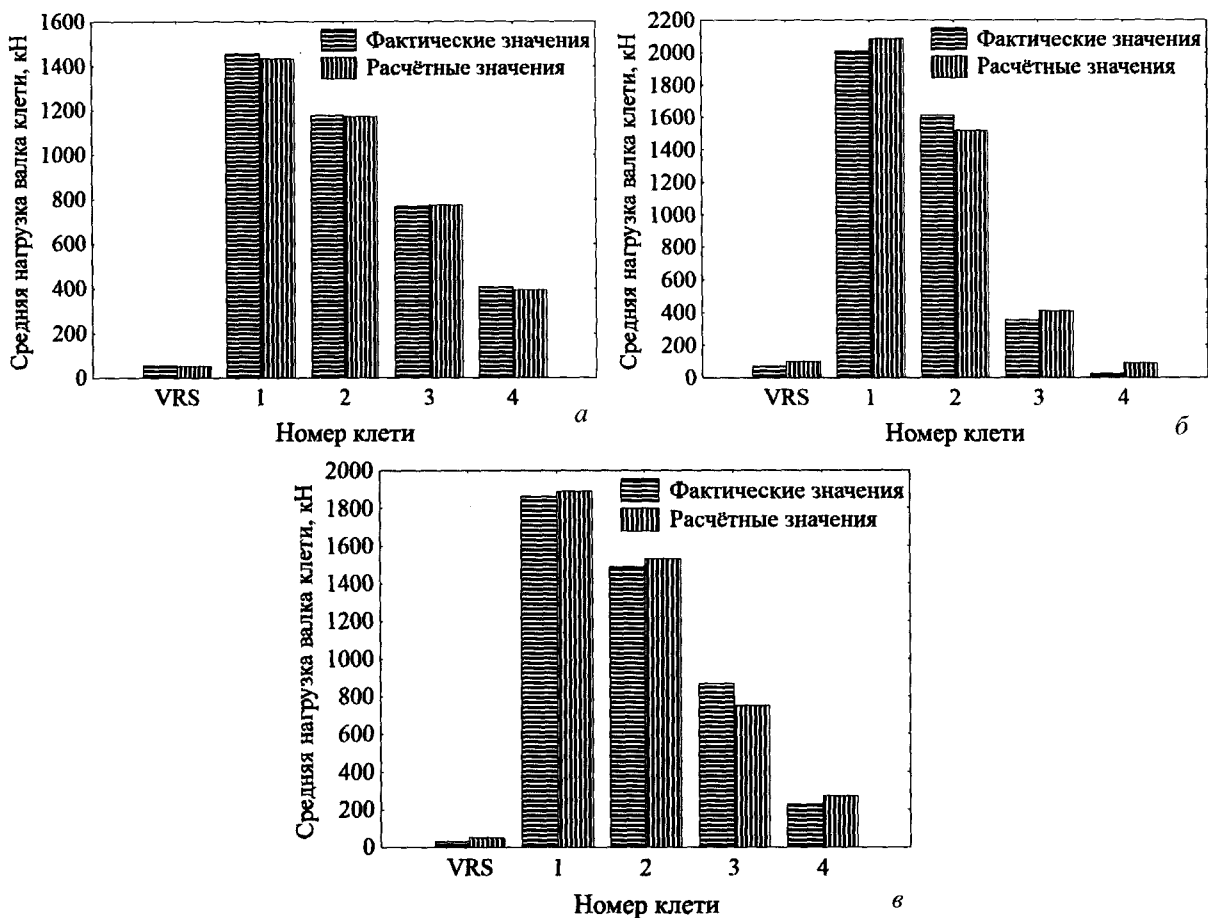


Рис. 4. Сравнение нагрузок на клетки:
 а — при прокатке трубы 70×6,3; б — при прокатке трубы 168,3×4,5;
 в — при прокатке трубы 168×6,3

Табл. 4

Сравнение фактических и расчётных значений параметров раскатки на трёхвалковом раскатном стане

Размер трубы	Сравниваемые параметры	Фактические значения	Расчётные значения
70×6,3	Диаметр черновой трубы, мм	125,6	125,2
	Толщина стенки черновой трубы, мм	5,81	5,7
	Скорость гильзы, м/с	1,648	1,6
168,3×4,5	Диаметр черновой трубы, мм	184,3	184,7
	Толщина стенки черновой трубы, мм	4,38	4,3
	Скорость гильзы, м/с	1,171	1,2
168×6,3	Диаметр черновой трубы, мм	183,2	183,7
	Толщина стенки черновой трубы, мм	6,2	6,2
	Скорость гильзы, м/с	1,539	1,5

Расхождение сравниваемых величин не превышает 3%, что указывает на корректность разработанной численной модели процесса раскатки горячедеформированных бесшовных труб. Также сходимость результатов для разных типоразмеров труб указывает на универсальность разработанной модели.

Таким образом, адекватность численной модели доказана сравнением расчётных и фактических значений силовых и геометрических параметров прокатки.

Численная модель процесса раскатки позволяет определять значения напряжений, деформаций, контактных давлений, тепловых параметров процесса. Позволяет визуализировать распределения напряжений в очагах деформации и межклетьевом зазоре (рис. 5).

Данные полученные в ходе моделирования позволяют проводить глубокий анализ напряжённо-деформированного состояния заготовки в процессе раскатки, и позволяют определять влияние различных режимов прокатки, геометрии инструмента на процессы происходящие в прокатываемом металле. На рис. 6 отображены поля напряжений в очагах деформации в процессе формирования черновой трубы. Как видно максимальные напряжения сконцентрированы по дну калибра.

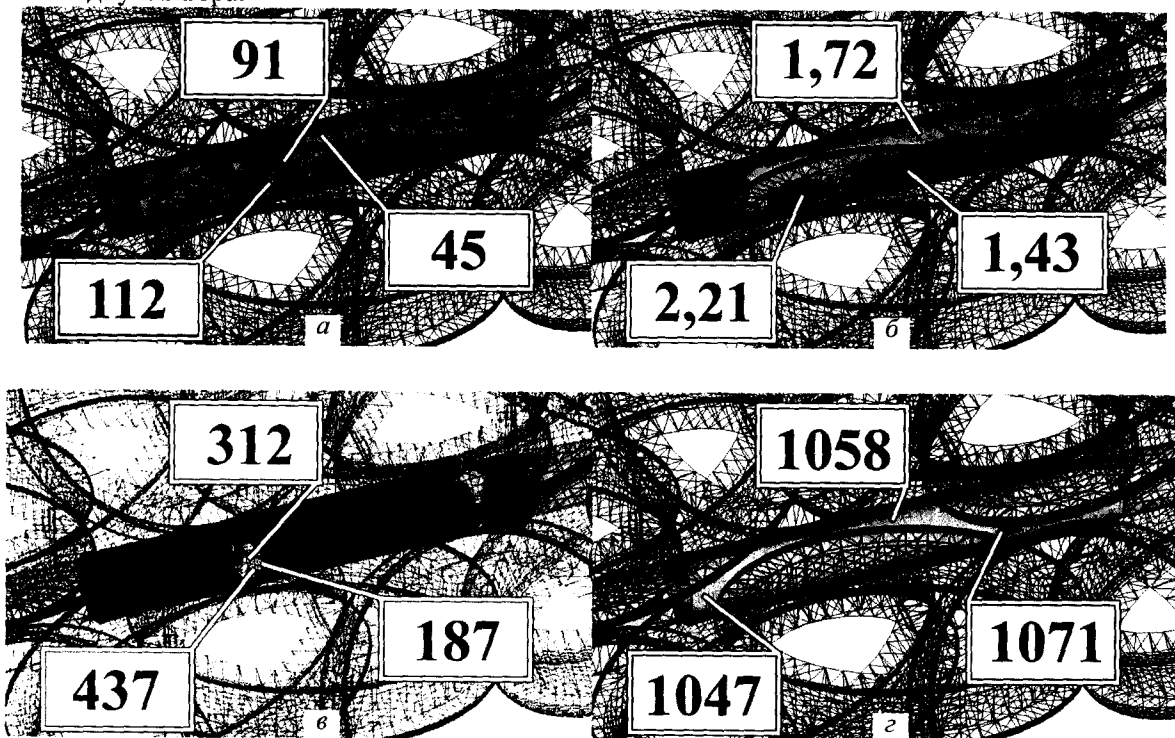


Рис. 5. Результаты численного моделирования:

а — поля распределения эффективных напряжений, МПа; *б* — поля распределения эффективных деформаций 2; *в* — поля распределения контактных давлений; *г* — поля распределения температур °С

Из трёх исследуемых процессов (табл. 1), на практике наибольшему износу инструмента подвержен инструмент при производстве трубы 168,3×4,5 мм из стали 20. Максимальный износ располагается по дну калибра и симметрично расходится под углом в направлениях от центра вала (рис. 7,а).

Распределение износа поверхности прокатных валков, полученное в результате численного моделирования (рис. 7,б), соответствует распределению износа на реальном инструменте (рис. 7,в), что является фактом, указывающим на корректность работы численной модели и функции износа (2).

На оправке износ проявляется в виде продольных проточек по всей поверхности (рис. 7,г). Расчетный износ оправки отражен в цветокодированой поле распределения интенсивности износа (рис. 7,д). Очевидно, что расчетный износ оправки совпадает с реальным износом.

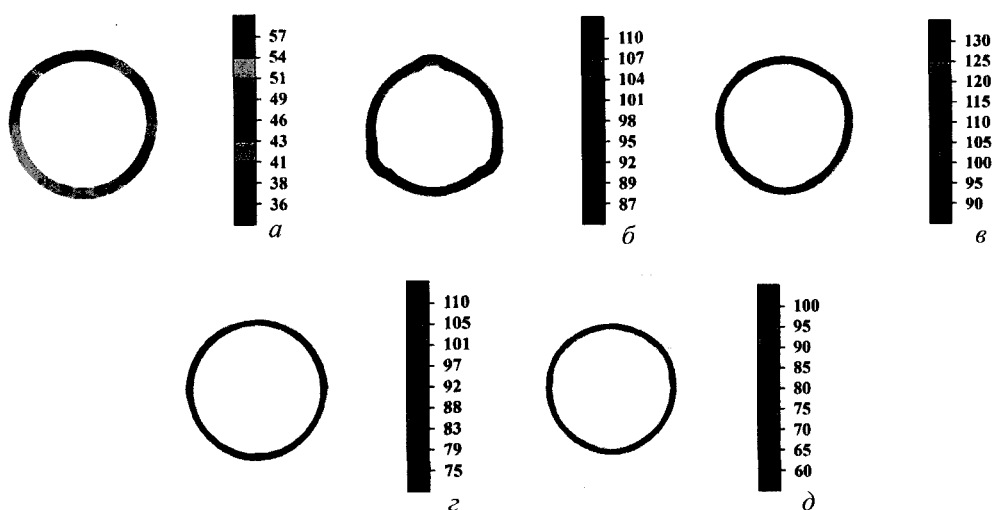


Рис. 6. Этапы формирования заготовки в клетях раскатного стана, поля распределения напряжений в очаге деформации каждой клетки, МПа:
а — клеть VRS; *б* — клеть 1; *в* — клеть 2; *г* — клеть 3; *д* — клеть 4

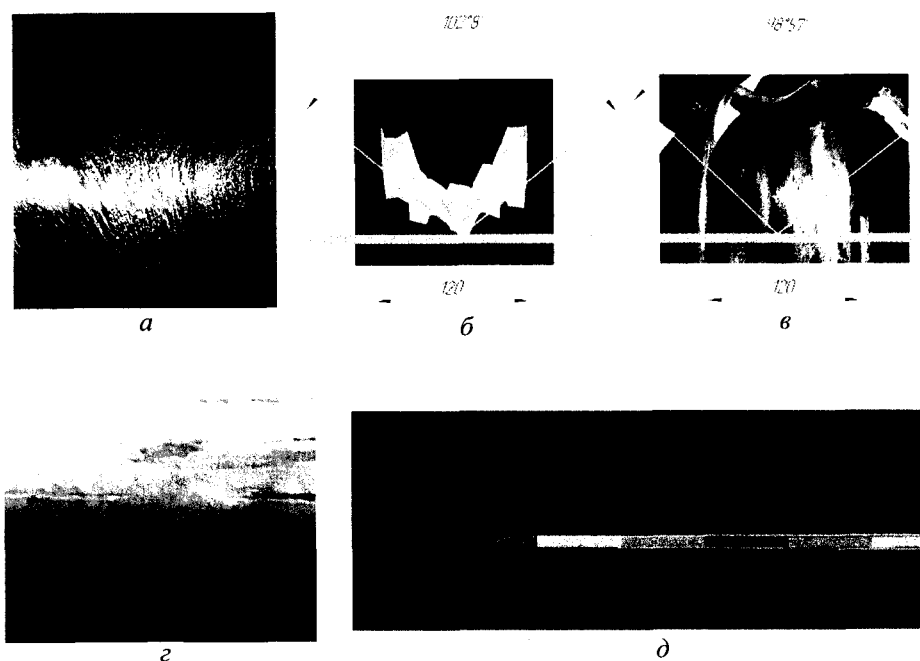


Рис. 7. Моделирование износа прокатных валков:
а — износи прокатного валка; *б* — результат моделирования износа прокатного валка;
в — распределение износа прокатного валка; *г* — износ оправки;
д — результат моделирования износа оправки

Выводы

Таким образом, разработана адекватная численная модель процесса раскатки черновых труб на трёхвалковом непрерывном раскатном стане.

Численная модель позволяет производить глубокий анализ напряжённо-деформированного состояния металла в процессе раскатки и получать адекватные сведения о распределении и значениях деформации, напряжений, температур и энергосиловых параметров действующих на заготовки и инструмент.

Выбран метод оценки износа раскатного инструмента, позволяющий с помощью численной модели прогнозировать и определять качественные и количественные характеристики износа прокатного инструмента.

Численная модель раскатки черновых труб и метод оценки износа раскатного инструмента, позволяют сократить время и затраты при проектировании и оптимизации процесса раскатки.

Список использованных источников

1. Боровик П.В. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением: Монография /П.В. Боровик, Д.А. Усатюк. — Алчевск : ДонДТУ, 2011. — 299 с.

2. Кукуджанов В.Н. Компьютерное моделирование деформирования, повреждаемости и разрушения неупругих материалов и конструкций: Учебное пособие. — М.: МФТИ, 2008. — 215 с.

3. Contact and rubbing of flat surfaces /Archard J.F. // J. Appl. Phys., 1953, vol. 24, no. 8, pp. 981–988.

Статья поступила в редакцию 28.04.2016 г.