



УДК 621.774.35

Поступила 10.02.2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ОПРАВКИ РАСКАТНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ПРОКАТНОГО СТАНА С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

DETERMINATION OF THE OPTIMAL SPEED OF THE MANDREL IN THE CONTINUOUS REELING MILL USING NUMERICAL SIMULATION

Ю. Л. БОБАРИКИН, Я. И. РАДЬКИН, Гомельский государственный технический университет
им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

Yu. L. BOBARIKIN, Ya. I. RADKIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj,
Gomel city, Belarus, 48, Oktyabrya ave. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

Создана адекватная численная модель процесса раскатки гильз на трехвалковом непрерывном стане и произведен ряд численных экспериментов процесса раскатки труб. На основании анализа напряженно-деформированного состояния очага деформации черновой трубы были определены оптимальные скоростные режимы оправки, обеспечивающие снижение износа прокатных валков и оправок, который непосредственно влияет на качество черновых труб.

A proper numerical model of expanding process on a three roll continuous reeling mill was created and number of numerical experiments of the process of tubes rolling were performed. Based on the analysis of the stress-strain state of a rough tubes deformation zone, optimal speed rates of the mandrel providing the decrease in mill rolls and deterioration of mandrel which direct influences on the quality of rough tubes were determined.

Ключевые слова. Бесшовные трубы, непрерывная раскатка, численное моделирование, метод конечных элементов.

Keywords. Seamless pipes, continuous expanding process, numerical simulation, finite element method.

Одним из основных способов производства горячедеформированных бесшовных труб является прокатка на трубопрокатных агрегатах (ТПА) с непрерывным станом.

Агрегаты с непрерывным станом в силу их значительной мощности весьма перспективны для производства труб массового назначения. На раскатных станах производят трубы широкого сортамента и практически любого назначения: трубы нефтяного сортамента, обсадные, котельные, трубы из специальных сталей и сплавов, трубы для производства колец подшипников [1].

В связи с увеличением выпуска сортамента труб, повышением требований к качеству бесшовных труб необходимо дальнейшее развитие и совершенствование технологического процесса прокатки горячедеформированных бесшовных труб. Таким образом, весьма актуальным является исследование и совершенствование процесса непрерывной прокатки труб с целью обоснования рациональных калибровок валков, скоростных режимов прокатки, повышения стойкости прокатного инструмента и улучшения качества горячедеформированных бесшовных труб.

Важнейший этап прокатки труб – раскатка гильзы в черновую трубу. Деформация трубы при непрерывной раскатке происходит в последующее в располагаемых калибрах между перемещающейся оправкой и прокатными валками. Стан имеет клеть предварительного обжатия заготовки и группу деформирующих клетей, расположенных за ней (рис. 1).

Значительное влияние на процесс раскатки оказывает правильный выбор скоростных режимов прокатки. При определении оптимального скоростного режима раскатки необходимо учитывать, что при использовании контролируемо-перемещаемых оправок отсутствует зона отставания металла в очаге деформации.

Цель работы – определить оптимальные скоростные режимы контролируемо-перемещаемой оправки для получения профиля трубы 168,3×4,5 мм из стали 20, позволяющие снизить износ прокатного инструмента и повысить качество черновой трубы.

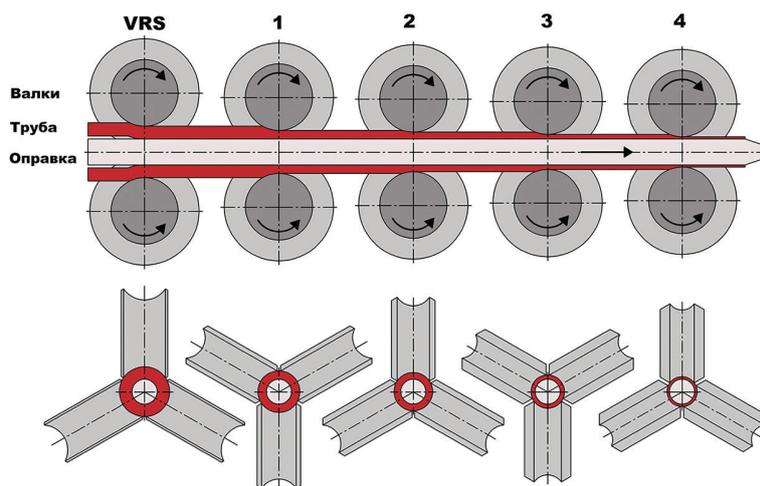


Рис. 1. Схема раскатки гильз на трехвалковом непрерывном стане: 1–4 – номер клетки



Рис. 2. Трехмерная модель раскатки на трехвалковом непрерывном стане

В качестве методики исследования был выбран метод численного моделирования. Данный метод позволяет проводить виртуальные эксперименты процессов обработки материалов давлением, которые дают возможность давать оценку напряженно-деформированного и теплового состояния заготовки в процессе обработки; определять нагрузки, действующие на инструмент, а также прогнозировать дефекты в заготовках и износ инструмента в процессе эксплуатации. Такой метод отличается высокой точностью, так как в его основе лежит комплекс

математических зависимостей реологии упругой и пластической деформации металлов, законов и теорем механики сплошных сред.

Была построена трехмерная модель процесса раскатки гильз на трехвалковом непрерывном стане (рис. 2).

Задача будет решаться в формулировке Лагранжа-Эйлера. Объемная модель заготовки (гильзы) разбивается на 24 776 трехмерных гексаэдрических конечных элементов. Для материала гильзы принимается упругопластическая модель Мизеса, включающая деформационное пластическое упрочнение и эффект Боушингера, для моделирования износа прокатного инструмента использована модель Арчарда [2, 3].

В качестве исходных данных для создания модели использовали параметры из таблицы прокатки для производства трубы 168,3×4,5 мм из стали 20 и настройки стана в условиях реального производства (табл. 1).

Таблица 1. Входные данные для построения численной модели

Размер готовой трубы, мм		168×4,5	
Размер гильзы после прошивного стана, мм		215×13,8	
Размер черновой трубы, мм		184,3×4,38	
Марка стали		20	
Температура прокатываемой трубы, °С		1080	
Скоростные режимы прокатки	Прокатные клетки	VRS, об/мин	497
		1, об/мин	569,3
		2, об/мин	673
		3, об/мин	656,5
	4, об/мин	639	
Контролируемо-перемещаемая оправка, мм/с		2,3	

При моделировании раскатки был принят ряд следующих допущений:

- материал деформируемого тела (заготовки) – изотропный, сплошной, несжимаемый, пластичный;
- валки и оправка – абсолютно жесткие тела;
- температура валков в процессе раскатки – постоянна;
- контактное трение подчиняется закону Амонтона-Кулона, вид трения – полусухой.

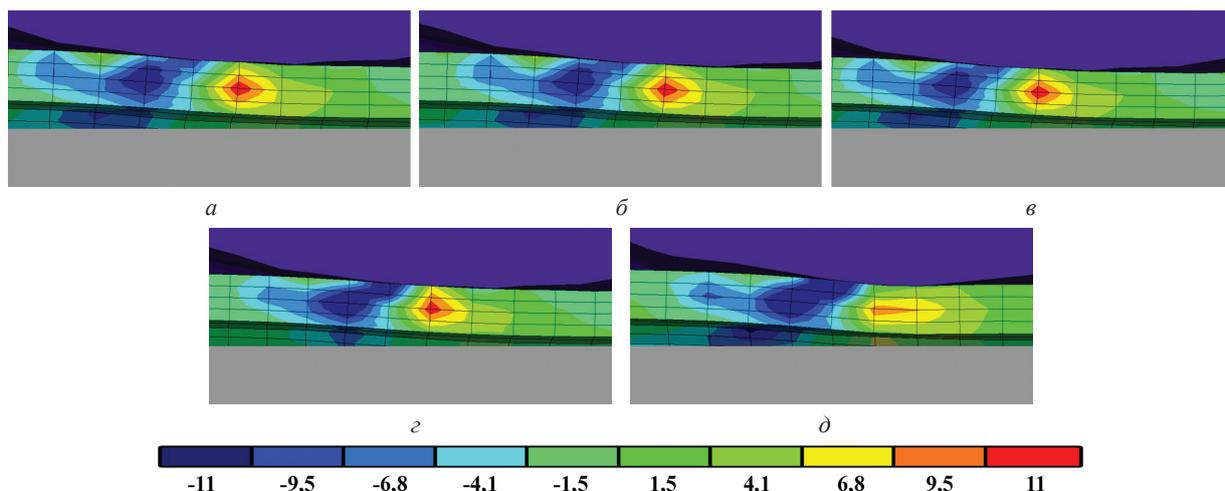


Рис. 3. Напряжения в продольном сечении очага деформации клетки предварительного обжатия VRS, МПа: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

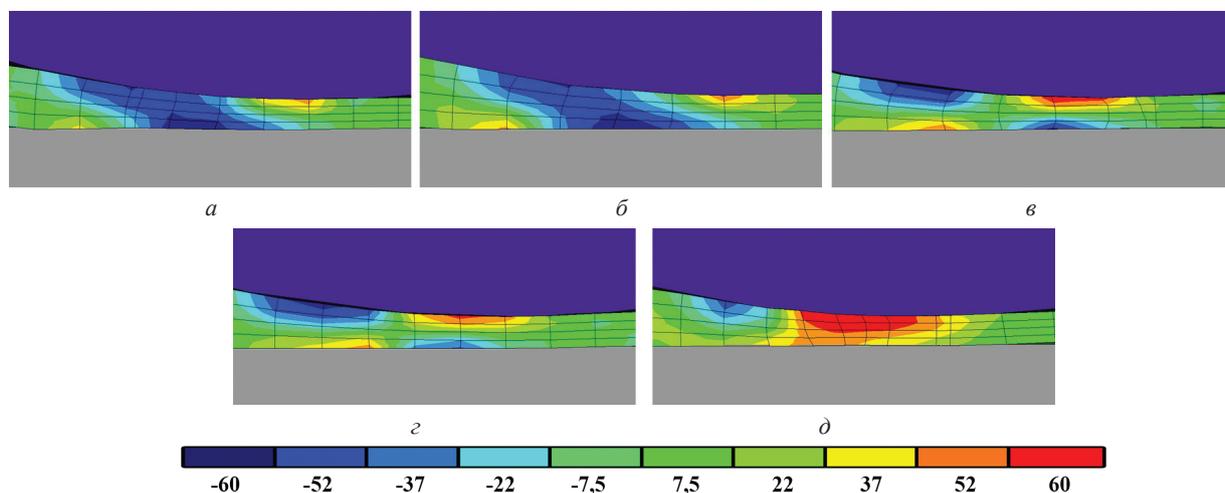


Рис. 4. Напряжения в продольном сечении очага деформации клетки № 1: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

Адекватность модели доказана сравнением величин, полученных в результате численного эксперимента, с данными, полученными на действующем оборудовании (табл. 2) [3].

Таблица 2. Сравнение фактических и расчетных параметров раскатки

Сравниваемые параметры		Фактические значения	Расчетные значения
Диаметр черновой трубы, мм		184,3	184,7
Толщина стенки черновой трубы, мм		4,38	4,3
Скорость гильзы на выходе, м/с		4	3,97
Усилие, действующее на клетки, кН	VRS	97	106
	1	2004	2031
	2	1608	1593
	3	387	402
	4	29	44

Для определения оптимальных настроечных параметров раскатного стана был проведен ряд виртуальных экспериментов с различными скоростными режимами контролируемо-перемещаемой оправки (1,7, 2,0, 2,3, 2,6 и 2,9 мм/с), а также анализ напряженно-деформированного состояния очага деформации трубы в процессе раскатки. Результаты численного моделирования представлены в виде цветокодируемых диаграмм распределения напряжений в продольном (рис. 3–7) и поперечном сечении (рис. 8–12) очага деформации каждой клетки раскатного стана, где синим цветом обозначены очаги со всесторонним растяжением, а красным – очаги со всесторонним сжатием.

Поля распределения напряжений в продольном сечении клетки предварительного обжатия имеют схожий вид, так как отсутствует контакт с перемещаемой оправкой (рис. 3).

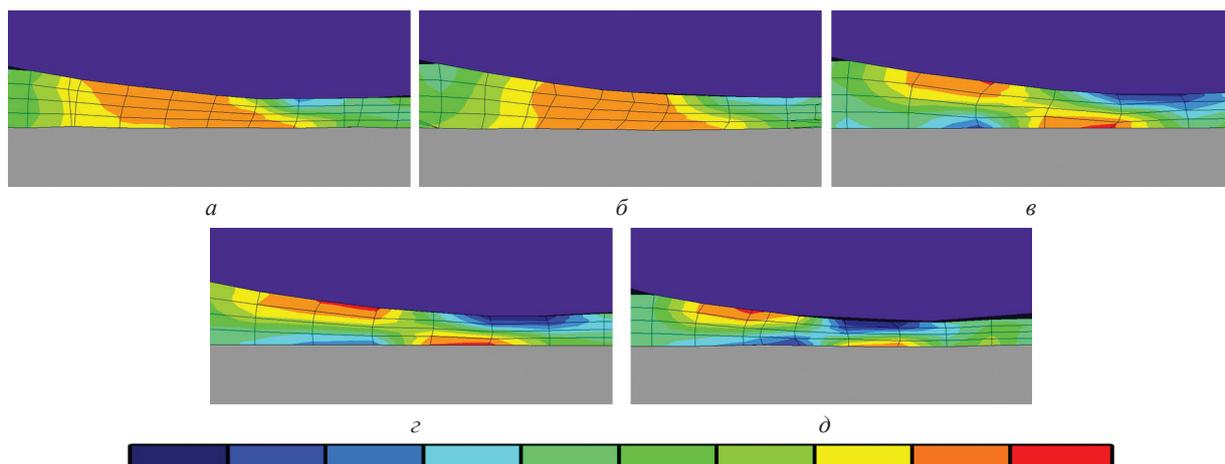


Рис. 5. Напряжения в продольном сечении очага деформации клетки № 2: *a* – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3; *г* – режим 4; *д* – режим 5

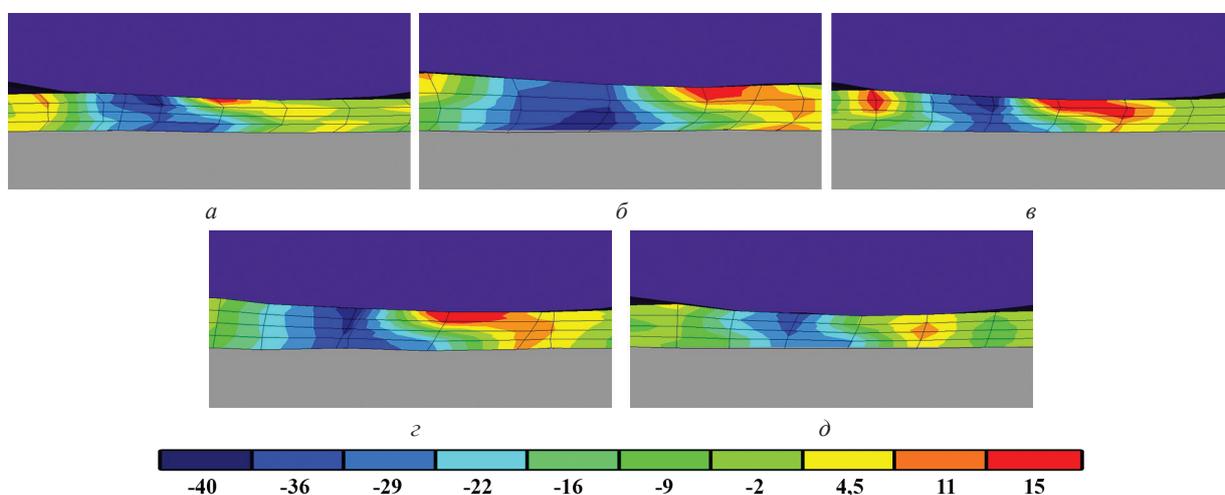


Рис. 6. Напряжения в продольном сечении очага деформации клетки № 3: *a* – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3; *г* – режим 4; *д* – режим 5

В клетки № 1 с увеличением скорости оправки изменяется картина распределения напряжений, при скоростях оправки меньше скорости металла очаг деформации представляет собой зону со всесторонним сжатием (рис. 4, *д*), а при скорости оправки больше скорости металла в очаге деформации возникают напряжения растяжения (см. рис. 4, *а, б*). Наиболее оптимальные скоростные режимы оправки 3 и 4 (рис. 4, *б, в*), так как при данных скоростях наблюдается более равновесное распределение напряжений в очаге деформации.

С увеличением скорости металла после выхода из клетки № 1 изменяются поля распределения напряжений, теперь при скоростных режимах 1 и 2 (рис. 5, *а, б*) в очаге деформации наблюдаются напряжения сжатия, при скоростных режимах 3, 4, 5 (рис. 5, *в, г, д*) на входе металла в очаг деформации со стороны поверхности валка имеют место напряжения сжатия, а со стороны оправки – растяжения. На выходе из очага деформации на контакте с оправкой металл имеет положительные величины напряжений, а с поверхностью валков – отрицательные.

В клетки № 3 (рис. 6) поля распределения напряжений при всех скоростных режимах на входе в очаг деформации характеризуются растяжением. Границы полей имеют форму диагональных линий, наклоненных в сторону движения металла. Далее по ходу движения заготовки напряжения постепенно переходят в зону всестороннего сжатия.

В очаге деформации клетки № 4 распределение напряжений более равномерно при режимах 1 и 2 (рис. 7, *а, б*), а при режимах 3, 4, 5 (рис. 7, *в, г, д*) имеет ярковыраженную зону сжатия.

Равномерное распределение напряжений в поперечном сечении при прокатке горячекатаных труб имеет важное значение, так как это значительно отражается на качестве готовых труб. Так, при знакопеременных напряжениях в радиальном сечении трубы часто встречаются такие дефекты, как граненность, разностенность, искажение геометрии.

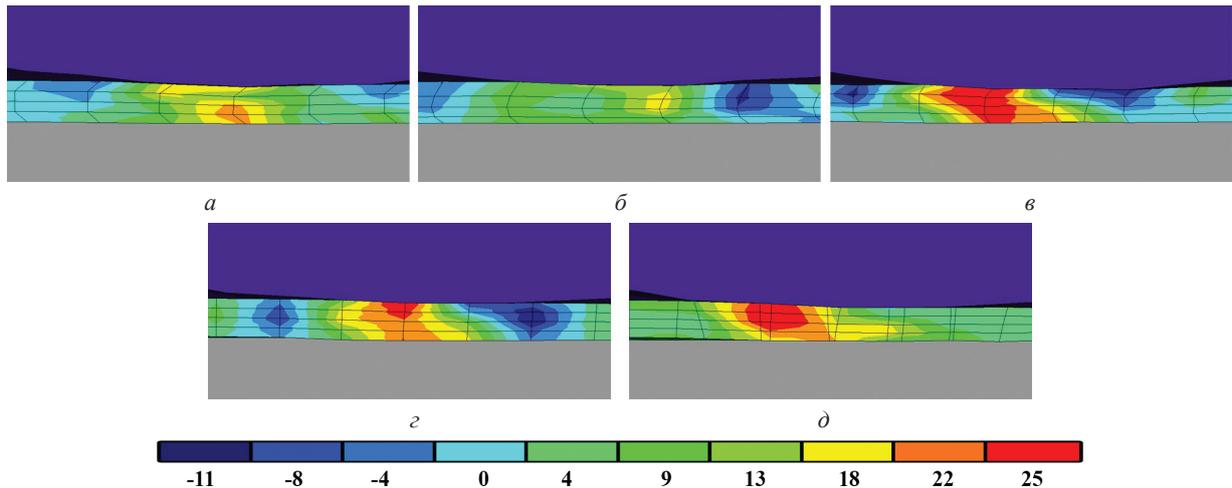


Рис. 7. Напряжения в продольном сечении очага деформации клетки № 4: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

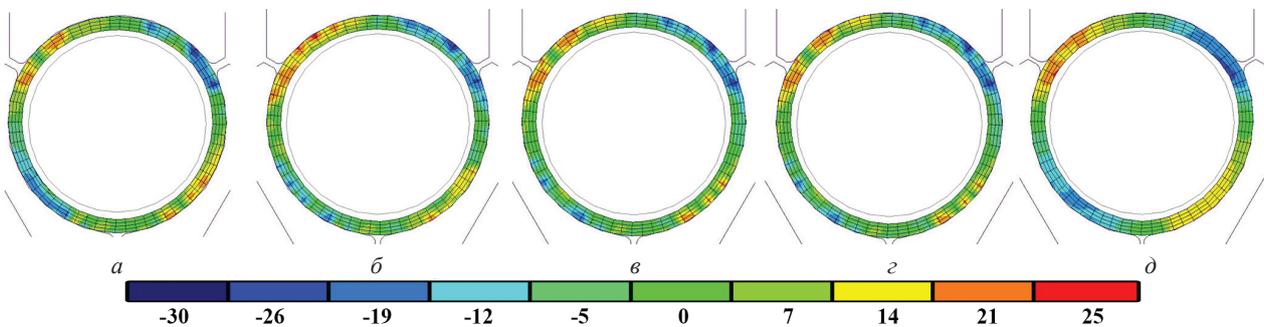


Рис. 8. Напряжения в поперечном сечении очага деформации клетки предварительного обжатия VRS: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

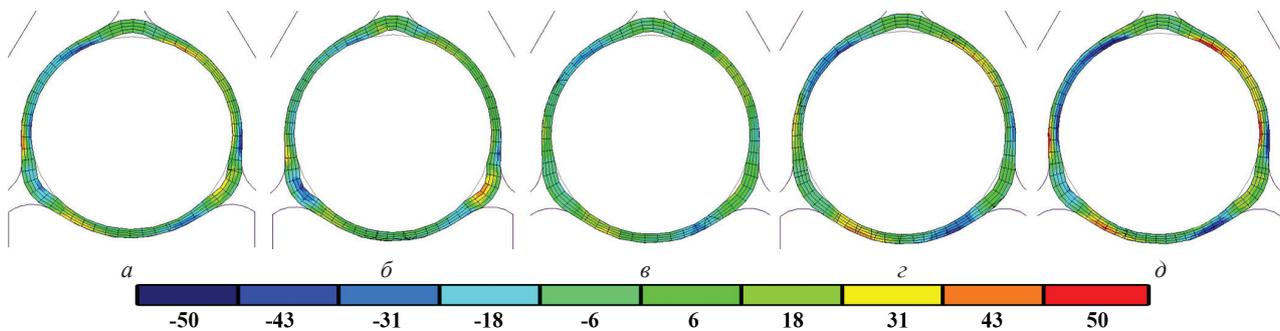


Рис. 9. Напряжения в поперечном сечении очага деформации клетки № 1: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

В клетки предварительного обжатия распределение напряжений при всех скоростных режимах идентично (рис. 8). В основных деформирующих клетях № 1 и 2 (рис. 9, 10) наиболее оптимальным скоростным режимом является режим 3. При такой скорости оправки очаг деформации имеет более равновесную схему распределения напряжений.

При прохождении металла через клетки № 3 и 4 (рис. 11, 12) при всех скоростных режимах поля распределения напряжений имеют зоны растяжения и зоны сжатия, однако величины этих напряжений незначительны и не оказывают большого влияния на качество черновой трубы.

Кроме цветочкодируемых диаграмм распределения напряжений, при помощи численной модели были получены данные по нагрузке валков и оправки в процессе раскатки гильзы в черновую трубу (рис. 13).

В процессе раскатки гильзы в черновую трубу наиболее нагруженными являются клетки № 1 и 2, при прохождении через них металл подвергается наибольшему деформированию, что подтверждается цветочкодируемыми диаграммами распределения напряжений.

При всех скоростных режимах нагрузка на клетки находится в одном диапазоне величин, однако при скоростном режиме 3 нагрузка в клетях № 1 имеет наименьшее значение, что благоприятно скажется на стойкости валков.

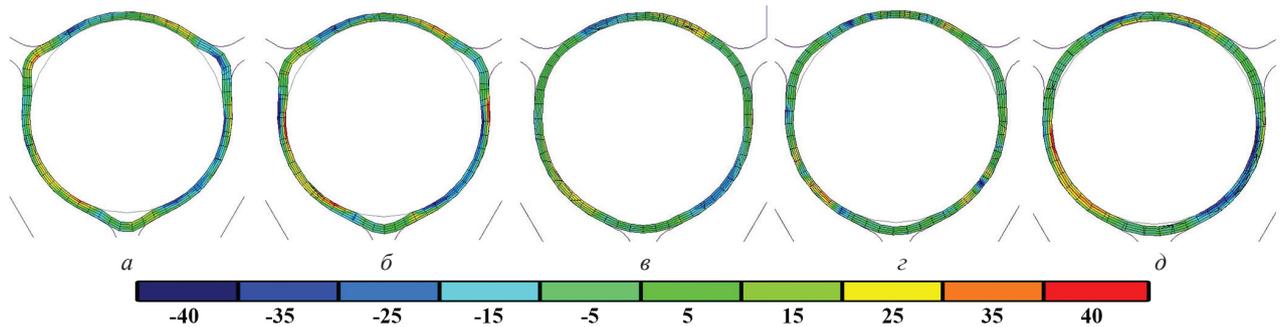


Рис. 10. Напряжения в поперечном сечении очага деформации клетки № 2: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

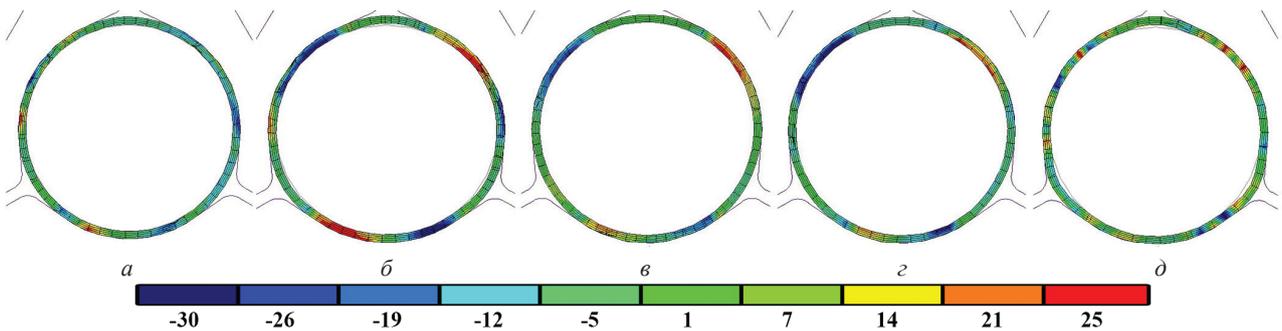


Рис. 11. Напряжения в поперечном сечении очага деформации клетки № 3: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

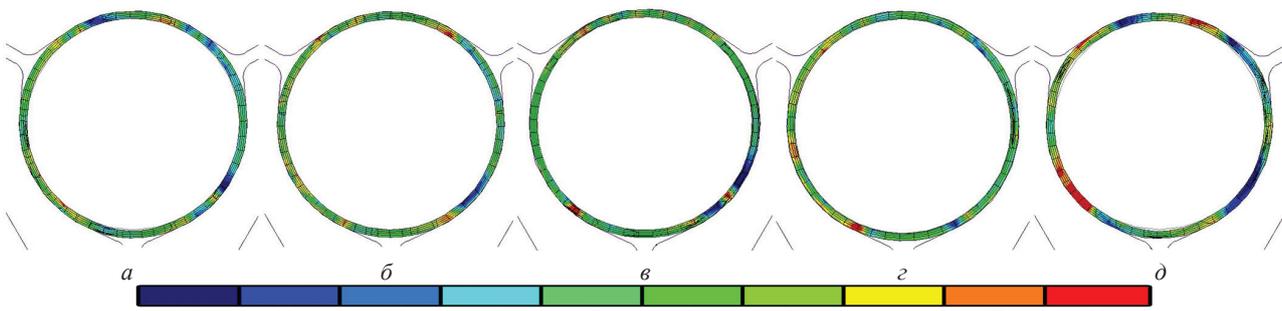


Рис. 12. Напряжения в поперечном сечении очага деформации клетки № 4: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

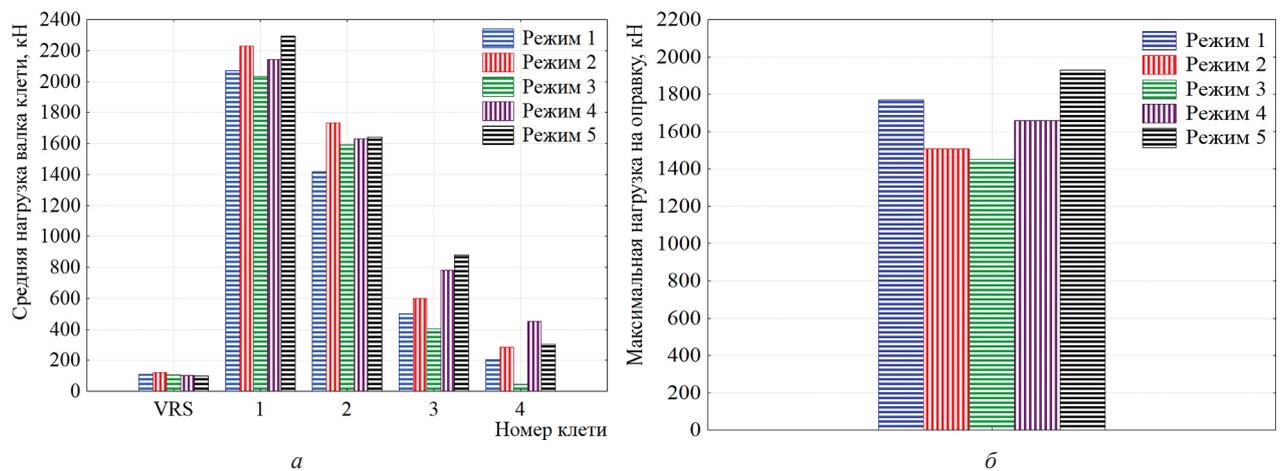


Рис. 13. Средние нагрузки, действующие на прокатный инструмент: а – средняя нагрузка, действующая на валки; б – максимальная нагрузка, действующая на оправку

Анализ нагруженного состояния оправки показал, что наиболее оптимальным скоростным режимом оправки является режим 3. Усилие, действующее на оправку со стороны металла, минимально по сравнению с другими режимами. Это обусловлено более равномерным распределением напряжений по всей поверхности оправки со стороны металла.

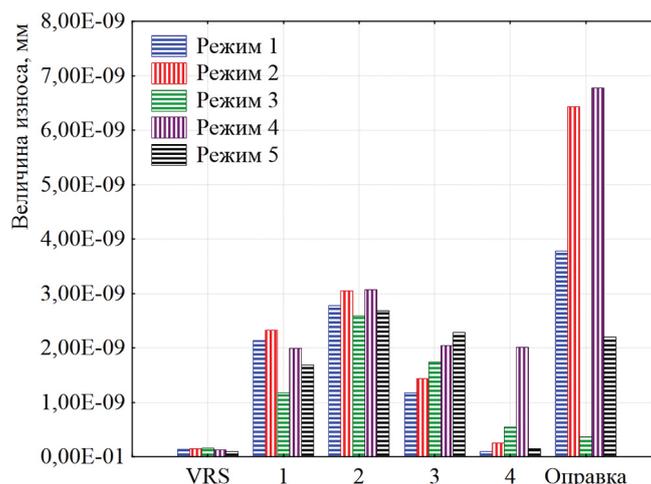


Рис. 14. Износ прокатного инструмента за один цикл прокатки трубы

Численная модель позволяет определять величину износа прокатного инструмента в процессе прокатки. Величину износа получаем в миллиметрах за один проход, т. е. за прокат одной трубной заготовки. Результаты исследования износа показаны на рис. 14.

Наибольшему износу подвержены клетки № 1 и 2, минимальное значение износа было получено при скоростном режиме 3. При режиме 3 величина износа оправки минимальна. Это связано с тем, что при равномерной нагрузке со стороны металла оправка движется по прямолинейной траектории, в то время как при воздействии по осям нагрузок различной величины оправка движется в сторону минимальной нагрузки.

Проведенные исследования позволили выполнить анализ напряженно-деформированного состояния металла в процессе раскатки трубы 168,3×4,5 мм из стали 20, определить влияние скоростного режима оправки на распределение напряжений в очаге деформации, величину износа валков и оправок, на значения нагрузок, действующих на прокатный инструмент.

Определено, что оптимальная скорость движения оправки при раскатке черновой трубы должна быть равна скорости металла на выходе из клетки № 1 раскатного стана. Например, для раскатки трубы 168,3×4,5 мм скорость движения оправки составляет 2,3 мм/с.

Литература

1. Данченко В. Н. Технология трубного производства / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. М.: Интернет инжиниринг, 2002. 638 с.
2. Бобарикин Ю. Л., Радкин Я. И. Адекватная численная модель процесса раскатки гильз на трехвалковом непрерывном стане и выбор метода оценки износа инструмента – Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 3-х кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. 95 с.
3. Боровик П. В. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. Алчевск: ДонДТУ, 2011. 299 с.

References

1. Danchenko V. N., Kolikov A. P., Romantsev B. A., Samusev S. V. *Technologia trubnogo proizvodstva* [Technology of tube making]. Moscow, Internet inzhiniring Publ., 2002. 638 p.
2. Bobarikin Yu. L., Radkin Ya. I. Adekvatnaya chislennaya model' protsessa raskatki gil'z na trehvalkovom nepreryvnom stane i vybor metoda otsenki isnosu instrumenta [Adequate numerical model of the expanding process on three roll continuous reeling mill and selection of methodology of wear and tear]. *Sovremennue metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov* [Modern techniques and technologies of production and processing of materials]. V 3 kn. Kn. 3. *Obrabotka metallov davleniem* [Press forming of metals]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2016. 95 p.
3. Borovik P. V., Usatyak D. A. *Novye podhody k matematicheskomy modelirovaniyu tehnologicheskikh protsessov obrabotki davleniem* [New approaches to mathematical simulation of press forming proceses]. Alchevsk, DonDTU Publ., 2011. 299 p.