

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением Metal forming. Technology and equipment of metal forming

Научная статья
УДК 621.771.09
DOI: 10.14529/met220207

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА СЕГМЕНТОВ ЭКСПАНДЕРА ПРИ КАЛИБРОВКЕ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Г.С. Баталов¹, batalov-german@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9926-2913>
Л.В. Радионова², radionovalv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>
С.В. Шандер³, sergey.shander@chelpipegroup.com

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Московский политехнический университет, Москва, Россия

³ ПАО «Трубная металлургическая компания», Челябинск, Россия

Аннотация. На металлургических производствах используются дорогостоящие инструменты, которые часто обладают сложной геометрией. Работоспособность таких инструментов напрямую влияет на экономические показатели производства. Одним из таких инструментов является сегмент экспандера. Данный инструмент используется в процессе калибровки труб большого диаметра, полученных по схемам JCOE, UOE, RB-формовка. Процесс экспандирования является последним этапом формообразования, заключающийся в поэтапной деформации трубной заготовки с помощью сегментов, которые обладают определенным набором механических и геометрических свойств. На каждом этапе сегменты придают округлую форму трубе, исправляя прямые участки, овальность и другие геометрические неровности заготовки. Основная нагрузка процесса приходится на сегменты экспандера. В данной работе исследуется износ сегментов в процессе экспандирования (калибровки) электросварных труб большого диаметра. Для предсказания износа были построены CAE-модели процесса экспандирования в специализированном программном комплексе MSC-Software, с помощью которых производился анализ возможного износа, его величина, положение и характер. Предложена методика оценки износа сегментов экспандера с помощью 3D-сканирования, оцифровки полученных данных и построения 3D-карты отклонений от эталонной модели. Анализ конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований показал, что CAE-модели с высокой сходимостью предсказывают зоны и особенности распределения износа сегментов экспандера. Показано, что моделирование с высокой степенью достоверности можно использовать для оценки работоспособности инструментов как новых, так и уже эксплуатируемых. На основе экспериментальных данных было получено уравнение для определения износа сегментов экспандера. По полученному уравнению построена номограмма, позволяющая прогнозировать износ сегментов экспандера в зависимости от напряжений, возникающих в инструменте при калибровке, и количества обработанных труб. Оценка и учет износа рабочей поверхности сегментов экспандера позволяет прогнозировать отклонения геометрических параметров труб в процессе экспандирования.

Ключевые слова: сварные трубы, шаговая формовка, метод JCOE, экспандирование труб, лазерное 3D-сканирование труб, моделирование процесса, метод конечных элементов

Для цитирования: Баталов Г.С., Радионова Л.В., Шандер С.В. Исследование износа сегментов экспандера при калибровке труб большого диаметра // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 2. С. 64–73. DOI: 10.14529/met220207

STUDY OF EXPANDER SEGMENT WEAR FOR CALIBRATING LARGE DIAMETER PIPES

G.S. Batalov¹, batalov-german@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9926-2913>
L.V. Radionova², radionovalv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>
S.V. Shander³, sergey.shander@chelpipegroup.com

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³ PJSC "Pipe Metallurgical Company", Chelyabinsk, Russia

Abstract. In metallurgical industries, expensive tools are used, which often have complex geometries. The performance of such tools directly affects the economic performance of the production. One of these tools is the expander segment. This tool is used in the process of calibrating large diameter pipes obtained according to the JCOE, UOE, RB-forming schemes. The calibration process is the last stage of shaping, which consists of the gradual deformation of the pipe billet using segments that have a certain set of mechanical and geometric properties. At each stage, the segments give a rounded shape to the pipe, correcting straight sections, ovality and other geometric irregularities of the billet. The main load of the process falls on the expander segments. In this paper, we study the wear of segments in the process of calibration of large-diameter electric-welded pipes. To predict wear, CAE models of the calibration process were built in a specialized software package MSC-Software, with the help of which an analysis of possible wear, its magnitude, position and nature was carried out. A technique is proposed for assessing the wear of expander segments using 3D scanning, digitizing the data obtained and constructing a 3D map of deviations from the reference model. An analysis of finite element modeling and experimental studies showed that CAE models with high convergence predict zones and features of the wear distribution of expander segments. It is shown that modeling with a high degree of certainty can be used to assess the performance of tools, both new and already in operation. Based on the experimental data, an equation was obtained to determine the wear of the expander segments. According to the obtained equation, a nomogram was constructed, which makes it possible to predict the wear of the expander segments depending on the stresses that arise in the tool during calibration and the number of processed pipes. Evaluation and accounting for the wear of the working surface of the expander segments make it possible to predict deviations in the geometric parameters of pipes in the process of expanding.

Keywords: welded pipes, step forming, JCOE method, pipe calibration, 3D laser scanning, simulation, tool, expander segment

For citation: Batalov G.S., Radionova L.V., Shander S.V. Study of expander segment wear for calibrating large diameter pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2022;22(2): 64–73. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220207

Введение

Сортамент трубной промышленности обширный, при этом к каждой единице продукции применяют жесткие требования как по геометрическим, так и механическим характеристикам. При выборе эффективного способа получения трубной продукции важным критерием является гибкость оборудования и возможность без дополнительных операций получить требуемую продукцию. Немаловажным является «жизненный цикл» работы инструмента, его износостойкость.

В настоящее время существуют три основных промышленных способа для получения цилиндрической трубной заготовки [1]:

- 1) UOE-формовка;
- 2) RB-формовка (формовка в вальцах);
- 3) JCOE-формовка (шаговая формовка).

У каждого способа имеется преимущества и недостатки [2–7].

В данной работе будет исследована трубная заготовка, полученная по схеме JCOE. Метод включает себя 5 основных последовательных этапов формообразования [8]:

- подгибка кромок;
- формовка JCOE;
- сборочно-сварочный процесс;
- сварочный процесс;
- экспандирование.

Подгибка кромок заготовки осуществля-

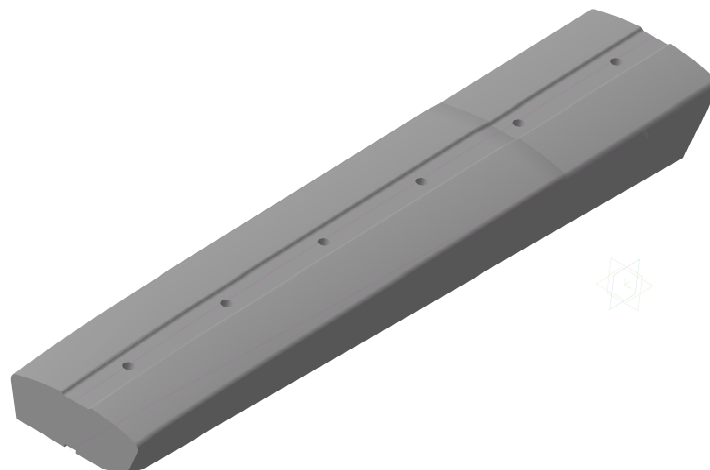


Рис. 1. Внешний вид сегмента экспандера
Fig. 1. Appearance of the expander segment

ется на кромкогибочном прессе с усилием до 40 МН на один блок в зависимости от производимого сортамента. После формовки на кромкогибочном прессе лист с предварительно обработанными и загнутыми кромками устанавливается манипуляторами в положение гибки на прессе шаговой формовки и подвергается процессу поэтапной формовки по всей длине с помощью пуансона, размеры которого выбираются в соответствии с размерами готовой трубы.

На первом этапе лист загибается только с одной стороны, в результате чего получается сечение J-образной формы, затем лист перемещается на другую сторону, и манипуляторы устанавливают заготовку для формовки другой стороны, после которой листовая заготовка получает С-образный профиль и на последней стадии – О-образный профиль сформованной трубы с открытым швом. Труба имеет достаточно круглую форму с плоскопараллельными кромками. Процесс пошаговой формовки труб выделяется особенной гибкостью в отношении диаметра, толщины стенки и трубного проката. Последним этапом формообразования является процесс экспандирования.

Экспандирование призвано обеспечить окончательную круглую форму поперечного сечения трубы и представляет собой пошаговую раздачу сваренной трубы по всей длине (в результате периметр трубы увеличивается, общая длина уменьшается). Техническими условиями для труб предусматривается экспандирование в интервале 0,8–1,2 % (в некоторых случаях до 1,5 %) [1]. Также в процессе минимизируются геометрические дефекты, полученные на этапе шаговой формовки и

сварочного процесса. Для осуществления данного процесса под каждый сортament изготавливают инструмент сложной геометрической формы – сегменты (рис. 1).

Основная нагрузка при калибровке трубных заготовок приходится на сегменты экспандера. От работоспособности сегментов зависят как качественные параметры получаемых труб, так и экономические показатели цеха. Прогнозирование и своевременное принятие решения по замене инструмента, получение достоверной информации по износу и остаточному ресурсу работы в текущей экономической ситуации является весьма актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка методики оценки износа инструмента при экспандировании труб большого диаметра.

Методика исследования

Для проведения исследований был задействован сортament труб типоразмером $\varnothing 530 \times 7-14$ мм. Исследования производились в условиях цеха «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ» на потоке труб в количестве 15 400 штук.

Для оценки геометрических размеров сегментов экспандера использовался промышленный 3D-сканер Shining 3D FreeScan X7 (Китай). Точность сканирования составляет 30 мкм. Принцип действия сканера заключается в определении пространственного положения точек на поверхности сканируемых объектов методом оптической триангуляции и построении на их основе в режиме реального времени трёхмерной модели в виде облака точек и последующем преобразовании его в полигоны [9]. Позиционирование сканера в

пространстве во время проведения измерений осуществляется с помощью специальных меток, нанесенных на объект сканирования и/или на окружающие предметы.

На рис. 2 представлен процесс получения облака точек рассматриваемого сегмента. Путем 3D-сканирования были получены геометрические размеры сегмента и построена CAD-модель до начала производства и после экспандирования 15 400 труб.

Для оценки возможного износа, его характера, зоны действия и сравнения с фактическим результатом был использован метод современного инженерного анализа (CAE –

Computer Aids Engineering), который основан на методе конечных элементов. Расчеты производились в специализированном программном комплексе MSC-Software. Он позволяет производить точный анализ и оценку технологических этапов получения труб большого диаметра [10]. Данные CAE-системы инженерного анализа позволяют не только выполнить качественное моделирование систем различной физической природы, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия [11, 12]. На рис. 3 представлена CAE-модель процесса экспандирования. Для наглядности отображена только ¼ часть модели.

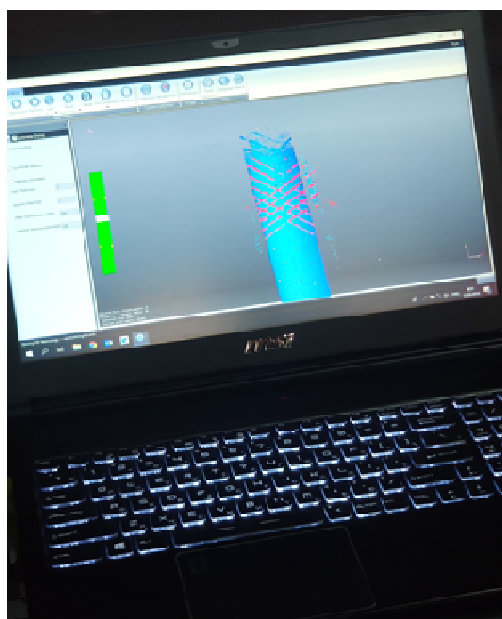
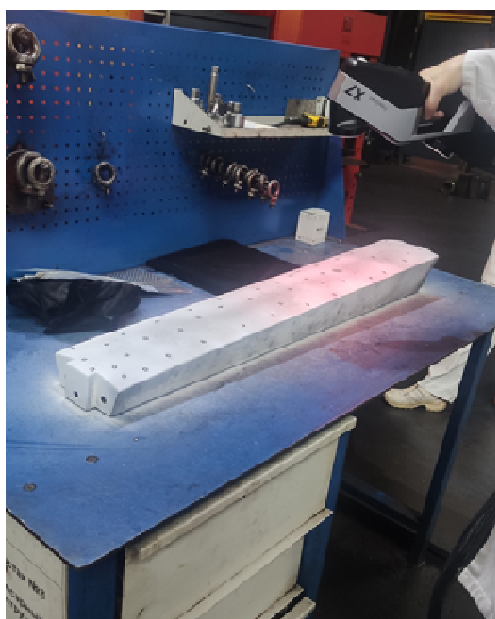


Рис. 2. Процесс сканирования и оцифровка сегмента экспандера
Fig. 2. Scanning process and digitization of the expander segment

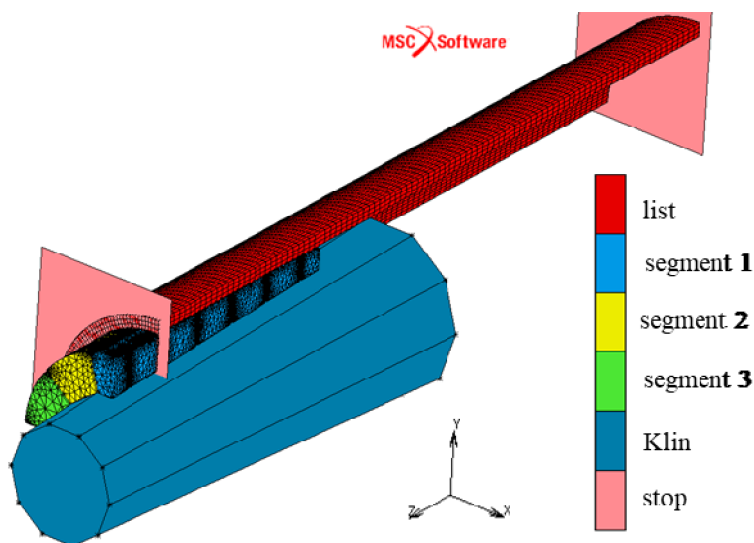


Рис. 3. Общий вид CAE-модели процесса экспандирования в MSC Marc Mentat
Fig. 3. General view of the CAE model of the expansion process in MSC Marc Mentat

Для получения приближенного периметра заготовки, а также наличия прямолинейных участков (влияют на износ сегментов) производились расчеты предыдущих этапов формообразования (подгибка кромок, шаговая формовка) [13]. Расчеты производились по фактическим режимам, которые использовались при производстве исследуемых сортов металлов. Наружный диаметр труб взят исходя из коэффициента экспандирования, равного 1 % толщины стенок с учетом плюсового допуска. Величина перемещения трубы равна размеру рабочей зоны сегмента.

Результаты исследования

Путем моделирования в программном комплексе MSC-Software были рассчитаны и проанализированы напряжения, возникающие при экспандировании труб. Согласно испытаниям на разрыв, допустимые значения напряжений для сегментов составляют 1100 МПа ($\sigma_{0,2} = 1100$ МПа).

В начальный момент процесса экспандирования основная нагрузка приходится только на боковые кромки сегмента. Это подтверждается моделированием, результаты которого приведены на рис. 4. На рис. 5 представле-

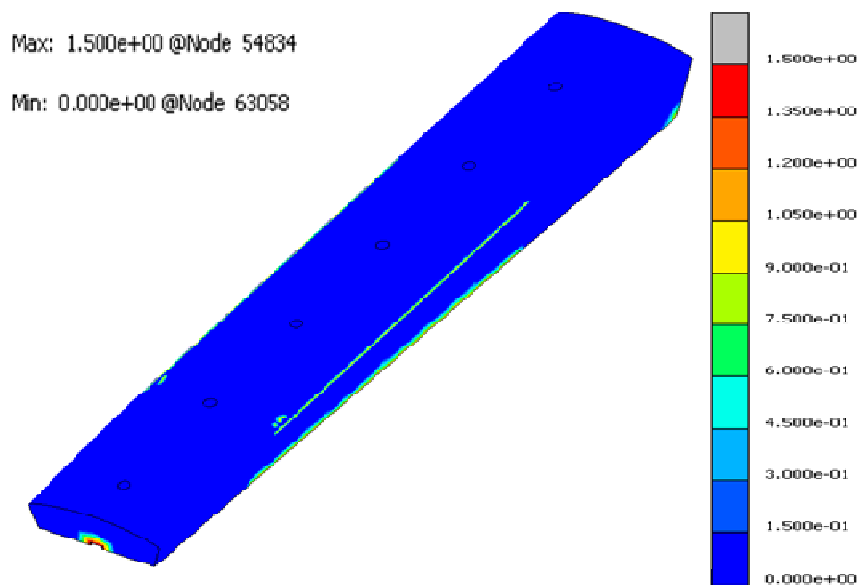


Рис. 4. Площадь контакта в начальный момент процесса экспандирования
Fig. 4. Contact area at the initial moment of the expansion process

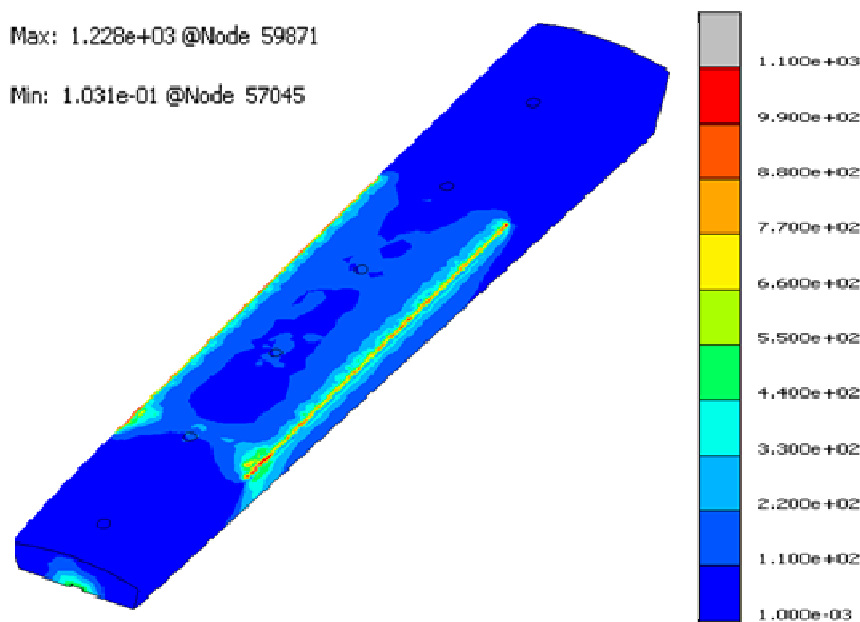


Рис. 5. Распределение полей напряжений по Мизесу в начальный момент экспандирования
Fig. 5. The distribution of stress fields according to von Mises at the initial moment of expansion

но распределение полей напряжений в начале процесса, после чего нагрузка перераспределяется по телу сегмента.

Конечно-элементное моделирование показало, что в процессе калибровки труб на поверхности сегментов экспандера наблюдаются значения напряжений близкие к пределу текучести и составляют 900–1000 МПа. В начальный момент экспандирования имеют место значения нагрузки, превышающие предел текучести и составляющие до 1228 МПа. Следовательно, можно предположить, что именно эти участки будут подвергаться большему износу. Полученные значения напряжений будут использованы при составлении уравнения для оценки износа.

На рис. 6 представлен расчет в момент максимальной нагрузки с распределением полей напряжений на рассматриваемых сегментах.

Для проверки предположений, сделанных по результатам моделирования, и сравнения полученных результатов с реальной картиной износа инструмента в процессе экспандирования было проведено исследование, в ходе которого строилась 3D-модель сегмента экспандера до и после его эксплуатации.

Для определения износа согласно выбранной схеме исследования было проведено 3D-сканирование, по результатам которого

было выполнено наложение и сравнение результатов сканирования фактической геометрии сегментов экспандера $\varnothing 530 \times 7,0-14,0$ с эталонной 3D-моделью, отсканированной до эксплуатации.

В результате наложения поверхностной сетки отсканированных сегментов на их эталонную 3D-модель были получены 3D-карты отклонений. Пример 3D-карты отклонений представлен на рис. 7. Холодные оттенки на 3D-карте отклонений указывают на то, что в данном месте поверхностная сетка эксплуатируемого в цехе инструмента находится за эталонной 3D-моделью (геометрический размер эксплуатируемого сегмента в этом месте меньше эталонного), соответственно, теплые оттенки говорят об обратном. Зеленый цвет говорит о том, что отклонения геометрических размеров эксплуатируемого в цехе инструмента от эталонной модели находятся в заданном допуске (0; +0,2) мм.

Результат сканирования согласуется с результатами конечно-элементного моделирования. Наиболее изношенными оказались боковые кромки сегмента, которые воспринимают на себя нагрузку в начальный момент процесса экспандирования труб.

Для получения зависимости износа (Δh) инструмента от параметров экспандирования был организован полный факторный экспе-

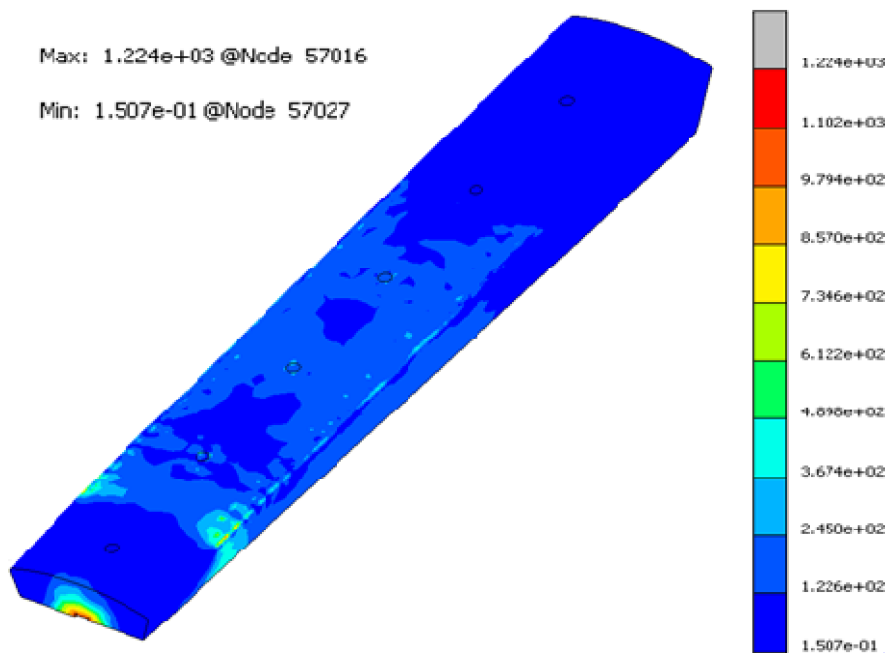


Рис. 6. Результат расчета в момент максимальной нагрузки с распределением полей напряжений по Мизесу
Fig. 6. The result of the calculation at the moment of maximum load with the distribution of stress fields according to von Mises

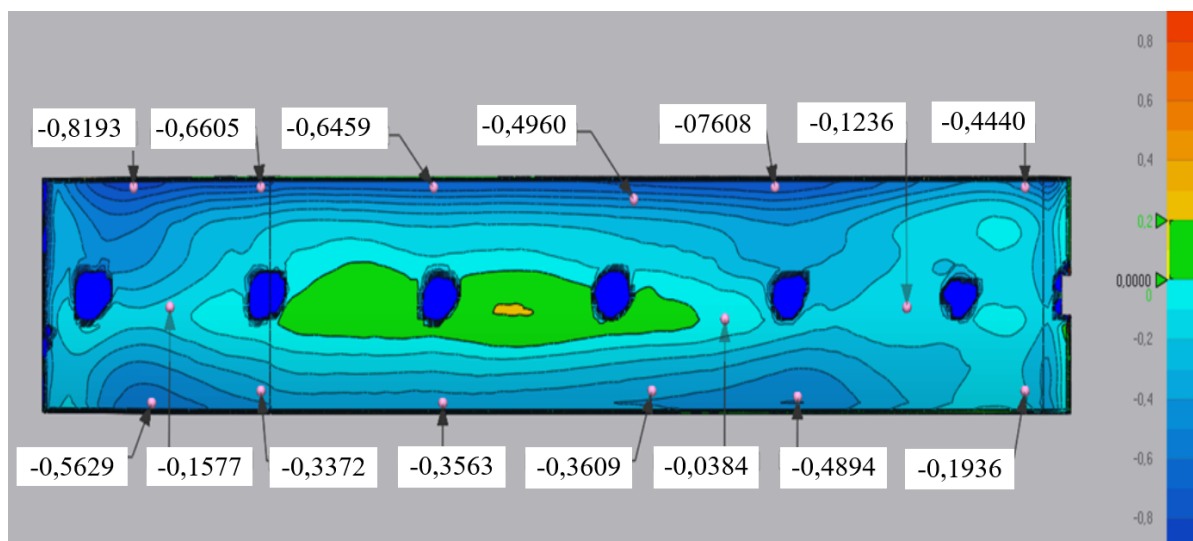


Рис. 7. Пример 3D-карты отклонений сегмента экспандера
Fig. 7. An example of a 3D deviation map of the expander segment

Показатель износа Δh сегмента экспандера
Wear index Δh of the expander segment

Количество циклов экспандирования n , труб	Напряжения на поверхности сегмента	
	$\sigma_{\text{экв}} = 1000$ МПа	$\sigma_{\text{экв}} = 1060$ МПа
3850	0,1933	0,3288
7700	0,5169	0,6246

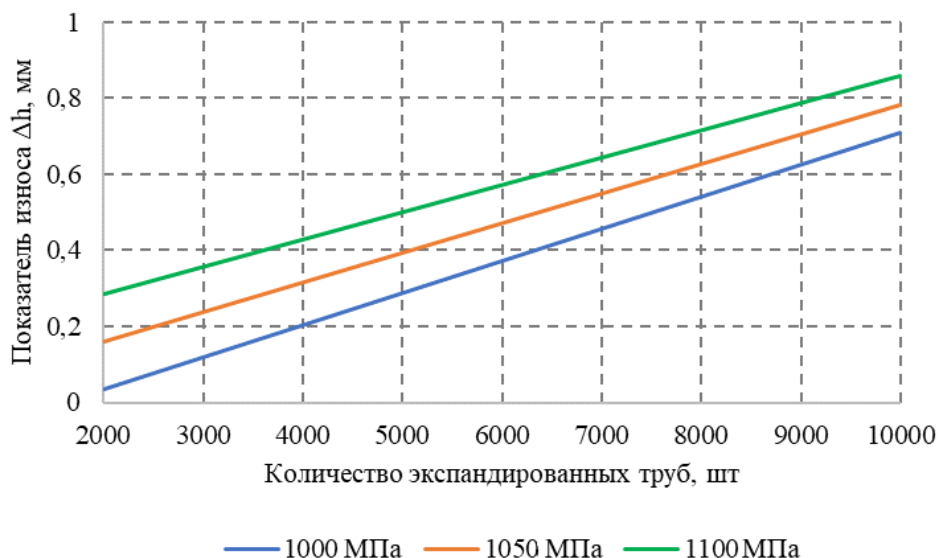


Рис. 8. Номограмма для определения показателя износа Δh сегментов экспандера
Fig. 8. Nomogram for determining the wear index Δh of the expander segments

римент (ПФЭ) [14, 15]. Ввиду ограниченности производственным процессом был допущен ряд упрощений, а именно выбрано 2 фактора и схема исследования ПФЭ 2^2 . Первый фактор σ_i учитывает диаметр, толщину стенки и определяется конечно-элементным моделированием. Значения напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ на рабочей поверхности сегмента экспандера для

исследуемых типоразмеров составляют 1000 и 1060 МПа. Вторым фактором является количество циклов экспандирования n_i . Значения составляют 3850 и 7700 труб. Количество экспериментов – 4 (см. таблицу). Показатели износа Δh определялись путем 3D-сканирования сегмента экспандера после калибровки труб.

По результатам расчета с использованием пакета MathCAD были получены уравнение и аппроксимирующие коэффициенты для определения износа сегментов экспандера в процессе калибровки труб большого диаметра:

$$\Delta h(\sigma, n) = -2,8519 + 2,72 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_i + 2,04 \cdot 10^{-4} \cdot n_i - 1,2 \cdot 10^{-7} \sigma_i \cdot n_i.$$

Номограмма для определения показателя износа Δh сегментов экспандера в зависимости от количества экспандированных труб и напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, возникающих на поверхности сегмента, представлена на рис. 8.

Износ сегментов экспандера приводит к необходимости перешлифовки их рабочей поверхности, что в конечном итоге влияет на геометрические параметры трубных заготовок. Так, например, износ в 0,1933 мм на рассматриваемом сегменте приводит к уменьшению радиуса шлифовки сегмента на 8 мм и составляет 246 мм по сравнению с радиусом до износа 254 мм. Следовательно, в местах контакта сегмента с внутренней поверхностью трубы будет наблюдаться пусть и небольшое, но отклонение от цилиндричности.

Заключение

1. Предложена методика оценки износа сегментов экспандера с помощью 3D-сканирования, оцифровки полученных данных и построения 3D-карты отклонений от эталонной модели.

2. Анализ конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований показал, что САЕ-модели с высокой схожимостью предсказывают зоны и особенности распределения износа сегментов экспандера. Показано, что моделирование с высокой степенью достоверности можно использовать для оценки работоспособности инструментов как новых, так и уже эксплуатируемых.

3. На основе экспериментальных данных было получено уравнение для определения износа сегментов экспандера. По полученному уравнению построена номограмма, позволяющая прогнозировать износ сегментов экспандера в зависимости от напряжений, возникающих в инструменте при калибровке, и количества обработанных труб.

4. Оценка и учет износа рабочей поверхности сегментов экспандера позволяет прогнозировать отклонения геометрических параметров труб в процессе экспандирования.

Список литературы

1. Технология и оборудование трубного производства: учеб. для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 608 с.
2. Дерикс В., Гензер Б. Новые технологии экономичного и гибкого производства труб большого диаметра // Труды XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Трубы 2005». Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2005. Ч. 1. С. 105–108.
3. Самусев С.В., Люскин А.В., Большт В.В. Анализ способов формовки заготовки для производства труб большого диаметра // Сталь. 2009. № 12. С. 46–49.
4. Ильичев В.Г., Залавин Я.Е. Экспериментальное определение сил трения в очаге деформации при вальцевой формовке труб большого диаметра // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15, № 3. С. 127–132.
5. Залавин Я.Е. Расчет параметров вальцевой формовки с целью минимизации неравномерности деформации заготовки в поперечном сечении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 4. С. 23–29. DOI: 10.14529/met200403
6. Баталов Г.С., Лунев А.А., Радионова Л.В. Разработка новых способов производства двухшовных труб большого диаметра // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2019. Т. 19, № 4. С. 37–48. DOI: 10.14529/met190405
7. Development of new methods for the production of large-diameter double-seam pipes / G.S. Batalov, L.V. Radionova, V.D. Lezin, A.A. Lunev // Solid State Phenomena. 2021. Vol. 316. P. 538–548.
8. Разработка технологических режимов участка формовки трубной заготовки в линии ТЭСА 1420 ОАО «Челябинский трубный завод» / С.В. Самусев, А.И. Романцов, К.Л. Жигунов и др. // Производства проката. 2011. № 10. С. 20–28.
9. Анализ технологий трехмерного моделирования и создания 3D объектов для различных интеллектуальных систем / Д.А. Чувилов, Н.А. Казакова, О.О. Варламов, А.М. Хадиев // Автоматизация и управление в технических системах. 2014. № 2. С. 84–97. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-2-9

10. Исследование сходимости результатов моделирования в различных программных комплексах при производстве тройников штампосварных / К.С. Торгонин, Г.С. Баталов, В.В. Широков, Л.В. Радионова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т. 21, № 2. С. 58–69. DOI: 10.14529/met210206

11. Галкин В.В., Чебурков А.С., Пачурин Г.В. Оценка напряженно-деформированного состояния металла трубных заготовок, изготовленных пошаговой формовкой, методом математического моделирования // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 1–9.

12. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Осадчий В.Я. Математическая модель формовки листовой заготовки при производстве сварных труб большого диаметра // Пластическая деформация металлов: сб. науч. тр.: в 2 т. Днепропетровск, 2014. Т. 1. С. 118–122.

13. Palumbo G., Tricarico L. Effect of forming and calibration operations on the final shape of large diameter welded tubes // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 164–165. P. 1089–1098.

14. Дубинский Ф.С., Соседкова М.А. Математическое планирование эксперимента в прокатке: конспект лекций. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 25 с.

15. Волкова П.А., Шипунов А.Б. Статистическая обработка данных в учебно-исследовательских работах. М.: Экспресс, 2008. 60 с.

References

1. Osadchiy V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovaniye trubnogo proizvodstva* [Technology and equipment for pipe production]. Moscow: Internet Inzhiniring Publ.; 2001. 608 p. (In Russ.)

2. Deriks V., Genzer B. [New technologies for economical and flexible production of large diameter pipes]. In: *Proceedings of the XIII International scientific-practical conf. "Tube & Pipes 2005"*. Part 1. Chelyabinsk: JSC "RosNITP"; 2005. P. 105–108. (In Russ.)

3. Samusev S.V., Lyuskin A.V., Boldt V.V. Analysis of blank molding methods for the production of large diameter pipes. *Steel*. 2009;(12):46–49. (In Russ.)

4. Il'ichev V.G., Zalavin Ya.E. Experimental Determination of the Friction Forces in the Deformation Zone at Roller Forming of Large-Diameter Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2015;15(3):127–132. (In Russ.)

5. Zalavin Ya.E. Calculation of the Parameters of the Roll Forming with the Purpose of Minimizing the Uniformity of Deformation in the Cross Section. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2020;20(4):23–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200403

6. Batalov G.S., Lunev A.A., Radionova L.V. Development of New Methods of Manufacturing of Large-Diameter Double-Seam Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2019;19(4):37–48. (In Russ.) DOI: 10.14529/met190405

7. Batalov G.S., Radionova L.V., Lezin V.D., Lunev A.A. Development of new methods for the production of large-diameter double-seam pipes. *Solid State Phenomena*. 2021;316:538–548.

8. Samusev S.V., Romantsov A.I., Zhigunov K.L., Boldt V.V., Sigida M.S. Development of technological regimes for the section for forming pipe blanks in the TESA 1420 line of JSC Chelyabinsk Pipe Plant. *Rolled products production*. 2011;(10):20–28. (In Russ.)

9. Chuvikov D.A., Kazakova N.A., Varlamov O.O., Khadiev A.M. Analysis of technologies of three-dimensional modeling and creation of 3D objects for various intelligent systems. *Automation and control in technical systems*. 2014;(2):84–97. (In Russ.) DOI: 10.12731/2306-1561-2014-2-9

10. Torgonin K.S., Batalov G.S., Shirokov V.V., Radionova L.V. Study of the Simulation Results Convergence in Various Software Complexes in the Production of Stamp Welded Tee. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2021;21(2):58–69. (In Russ.) DOI: 10.14529/met210206

11. Galkin V.V., Cheburkov A.S., Pachurin G.V. Evaluation of the stress-strain state of the metal of pipe blanks made by step-by-step molding using the method of mathematical modeling. *Modern Problems of Science and Education*. 2013;(2):1–9. (In Russ.)

12. Kolikov A.P., Zvonaresh D.Yu., Osadchiy V.Ya. [Mathematical model of forming sheet blanks in the production of welded pipes of large diameter]. In: *Plastic deformation of metals: a collection of scientific papers: in 2 vol. Vol. 1*. Dnepropetrovsk; 2014. P. 118–122. (In Russ.)

13. Palumbo G., Tricarico L. Effect of forming and calibration operations on the final shape of large diameter welded tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;164–165:1089–1098.

14. Dubinskiy F.S., Sosedkova M.A. *Matematicheskoye planirovaniye eksperimenta v prokatke* [Mathematical design of an experiment in rolling]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2007. 25 p. (In Russ.)

15. Volkova P.A., Shipunov A.B. *Statisticheskaya obrabotka dannykh v uchebno-issledovatel'skikh rabotakh* [Statistical data processing in educational and research work]. Moscow: Ekopress; 2008. 60 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Баталов Герман Сергеевич, аспирант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; batalov-german@mail.ru.

Радионова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии, Московский политехнический университет, Москва, Россия; radionovalv@rambler.ru.

Шандер Сергей Викторович, руководитель центра сварочных технологий, Трубная металлургическая компания, Челябинск, Россия; sergey.shander@chelpipegroup.com.

Information about the authors

German S. Batalov, Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; batalov-german@mail.ru.

Lyudmila V. Radionova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Metallurgy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; radionovalv@rambler.ru.

Sergey V. Shander, Head of the Center for Welding Technologies, Pipe Metallurgical Company, Chelyabinsk, Russia; sergey.shander@chelpipegroup.com.

Статья поступила в редакцию 17.02.2022

The article was submitted 17.02.2022