

Грибков Э. П.
Кулик А. Н.
Гурковская С. С.
Зубков В. С.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ ЛИСТОВ НА РОЛИКОВОЙ МАШИНЕ

В современной металлообрабатывающей промышленности существенное место занимает производство труб, обечаек и цистерн, подобного рода изделия используются повсеместно в нефтегазовой отрасли, энергетике, машиностроении и других отраслях. Существует несколько способов производства: прошивка кованой заготовки, прокатка, редуцирование, волочение, вальцовка и др. Все эти методы нашли свое применение в массовом производстве, которое характеризуется применением дорогих станов и технологической оснастки. В мелкосерийном же производстве использование этих методов нецелесообразно, поэтому для производства небольших партий труб и изделий нестандартного типоразмера (цистерны, обечайки) применяют вальцовку путем гибки листового проката в валках или роликах, как более универсальный и недорогой метод производства (рис. 1). В валковых листогибочных машинах гибка листа проводится между тремя или четырьмя вращающимися валками, расположенными в шахматном порядке [1–3].



Рис. 1. Процесс вальцевания металла

С помощью соответствующего размещения валков по отношению друг к другу лист может быть изогнут на любой радиус, но не менее радиуса среднего валка. Наибольшая кривизна изгиба, получаемая листом за один пропуск, ограничивается силой сцепления приводных валков с листом. По этой причине сгибание на малые радиусы выполняют за несколько последовательных пропусков, причем после каждого пропуска увеличивают прогиб листа. Актуальность работы и ее практическое направление определяются необходимостью повышения технико-экономических показателей процесса гибки из листов цилиндрических изделий, осуществляемого на основе повышения степени научной обоснованности принятых технических решений.

Значительный вклад в развитие теории и практики производства профилированного листа внесли В. И. Давыдов, М. П. Максаков, Г. Я. Гун, П. И. Полухин, Г. А. Смирнов-Аляев, К. Н. Богдавленский, А. К. Григорьев, И. С. Тришевский, В. В. Драгобецкий, а также целый ряд ученых и специалистов. Так, например, в своей теории В. И. Давыдов и М. П. Максаков принимают, что поперечные сечения заготовки находятся постоянно в плоскостях перпендикулярных направлению движения, а кромки остаются прямолинейными. Г. Я. Гун, П. И. Полухин и Г. А. Смирнов-Аляев в своей математической модели процесса профилирования основываются на модели участка плавного перехода, для которого поперечные сечения заготовки остаются плоскими и перпендикулярными оси профилирования.

Наиболее точным из методов исследования процессов является метод конечных элементов. Наряду с этим, целый ряд вопросов, связанных с повышением эффективности промышленных условий реализации исследуемого процесса является неизученным или изученным недостаточно

полно. Весьма немаловажным, помимо расчета энергосиловых параметров и проектирования собственно технологии, является дальнейшее совершенствование механического оборудования для профилирования ободьев колес.

Цель работы заключается в развитии численной математической модели для установления влияния факторов на протекание процесса, создании конечно-элементной модели для определения уровня энергосиловых параметров процесса, а также экспериментальном подтверждении адекватности математических моделей гибки листов и возможности их использования для практических расчетов при проектировании нового и совершенствовании существующего оборудования.

В соответствии с современными тенденциями развития научных подходов, теоретические исследования процесса гибки были выполнены с использованием численного математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) металла.

Математическое моделирование текущих по длине очага деформации процесса гибки листов геометрических характеристик было осуществлено на основе численной интерпретации известных инженерных методик [4, 5].

В основу математических моделей НДС гибки были возложены многочисленные рекуррентные решения конечно-разностной формы условий статического равновесия выделенных элементарных объемов очага деформации [6].

Также для оценки напряженно-деформированного состояния металла был использован метод конечных элементов, который в настоящее время является наиболее распространенным методом решения прикладных задач теории ОМД [7, 8]. Необходимо отметить, что объем проведенных в лабораторных условиях исследований процесса профилирования ободьев не соответствует всему диапазону технологических режимов, используемых на практике. Недостаток материальных ресурсов, а также сжатые сроки привели к необходимости постановки и реализации численного эксперимента. С этой целью и была разработана математическая модель, основанная на использовании метода конечных элементов и позволяет корректно учесть весь диапазон граничных условий очага деформации, условий внешнего трения. Такая математическая модель имеет высокую информативность, поскольку ее результаты содержат полную информацию о геометрических характеристиках изделий, формируются, и распределение основных компонент напряженно-деформированного состояния металла по длине и толщине листа.

Математическая модель была реализована в пакете конечно-элементного моделирования Abaqus, который является универсальной программой общего назначения и широко применяется при расчете процессов ОМД [9, 10]

Экспериментальные исследования результирующих геометрических характеристик листов при гибке были проведены на лабораторной экспериментальной 3-х роликовой листогибочной машине 100 x 105 x 250 ДГМА, общий вид которой представлен на рис. 2. Шаг машины 105 мм, диаметр бочки валков 100 мм, длина бочки валка 250 мм.

Гибка заготовки на экспериментальной машине 100 x 105 x 250 (рис. 2) происходит за счет упругопластического изгиба, создаваемого между тремя роликами, посредством смещения среднего ролика вниз. Рабочая клетка машины включает в себя узел станин, стянутые между собой стяжками. Верхние и нижние валковые узлы закреплены на выступах станин и опираются на нажимные винты, совмещенные с системой уравнивания пружинного типа. Рабочим инструментом машины являются вальцы с диаметром бочки 100 мм, и длиной бочки 250 мм, установленные в подушках посредством двух шарикоподшипников радиального типа в каждой. В ходе проведения эксперимента формовке подвергались заготовки сечением 2,5 x 200 мм и длиной 1000 мм. В ходе проведения эксперимента было исследовано влияние перекрытия W среднего ролика на остаточную кривизну $\chi_{ост}$. Перекрытие среднего ролика W составило 2.5 мм, 4 мм, 5 мм и 6 мм. Полученные результаты представлены на рис. 3.



Рис. 2. Общий вид лабораторной экспериментальной машины 100 x 105 x 250

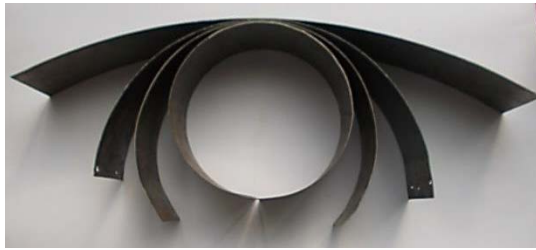


Рис. 3. Общий вид заготовок после формовки на лабораторной экспериментальной машине 100 x 105 x 250 ДГМА

В рамках анализа напряженно-деформированного состояния металла при его гибке на трехвалковых листогибочных машинах был выполнен расчет с использованием метода конечных элементов в системе Abaqus CAE. Выполнялась дискретизация объема (построение конечно-элементной сетки), занимаемого моделью, на элементарные области (конечные элементы). Для моделирования роликов были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Моделирование листа происходило с использованием элементов S4R – четырехузловые, прямоугольные элементы оболочки с контролем разрушения [3].

В качестве примеров результатов численной реализации модели на рис. 4 представлены расчетные распределения основных компонент напряженно-деформированного состояния металла по высоте поперечного сечения листа, подвергаемого изгибу. Данные расчеты были выполнены применительно к изгибу листа толщиной $h = 2.5$ мм из стали 08кп ($\sigma_{T0} = 240$ Н/мм²; $a_1 = 1133.4$ Н/мм²; $a_2 = -1195.2$ Н/мм²; $a_3 = 525.6$ Н/мм²; $E = 21 \cdot 10^4$ Н/мм²). Величина перекрытия W составила 2.5, 4.0, 5.0 и 6.0 мм. Распределения эквивалентных напряжений и деформаций при расчете методом конечных элементов представлены в графической форме в виде объемной деформированной модели на рис. 4.

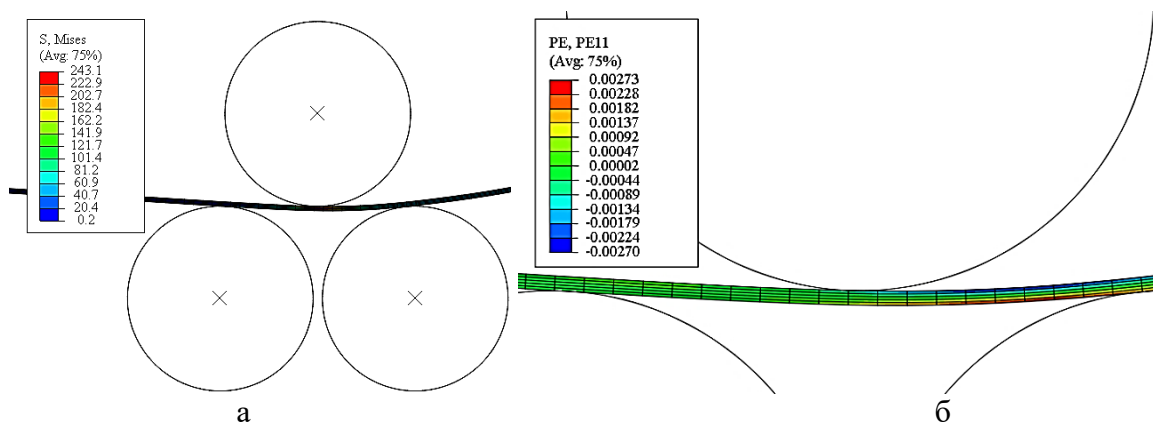


Рис. 4. Расчетные распределения эквивалентных напряжений (а) и деформаций (б) в листе при расчете процесса гибки в пакете конечно-элементного анализа Abaqus CAE

Количественная и качественная оценка степени соответствия результатов экспериментальных исследований и конечно-элементной модели представлена на рис. 5. Обработка результатов как экспериментальных так и теоретических исследований была основана на выборке точек полученной формы образцов с различным шагом, геометрическом решении по определению радиуса изгиба заготовки и статистической обработке полученных результатов. При исследовании результатов конечно-элементной модели использовались координаты узлов сетки, расположенных по средней линии листа. Для визуализации результатов на рис. 5 представлены размеры радиусов листов полученных путем импортирования измеряемых точек в графическую среду AutoCAD посредством использования скрипт-файлов.

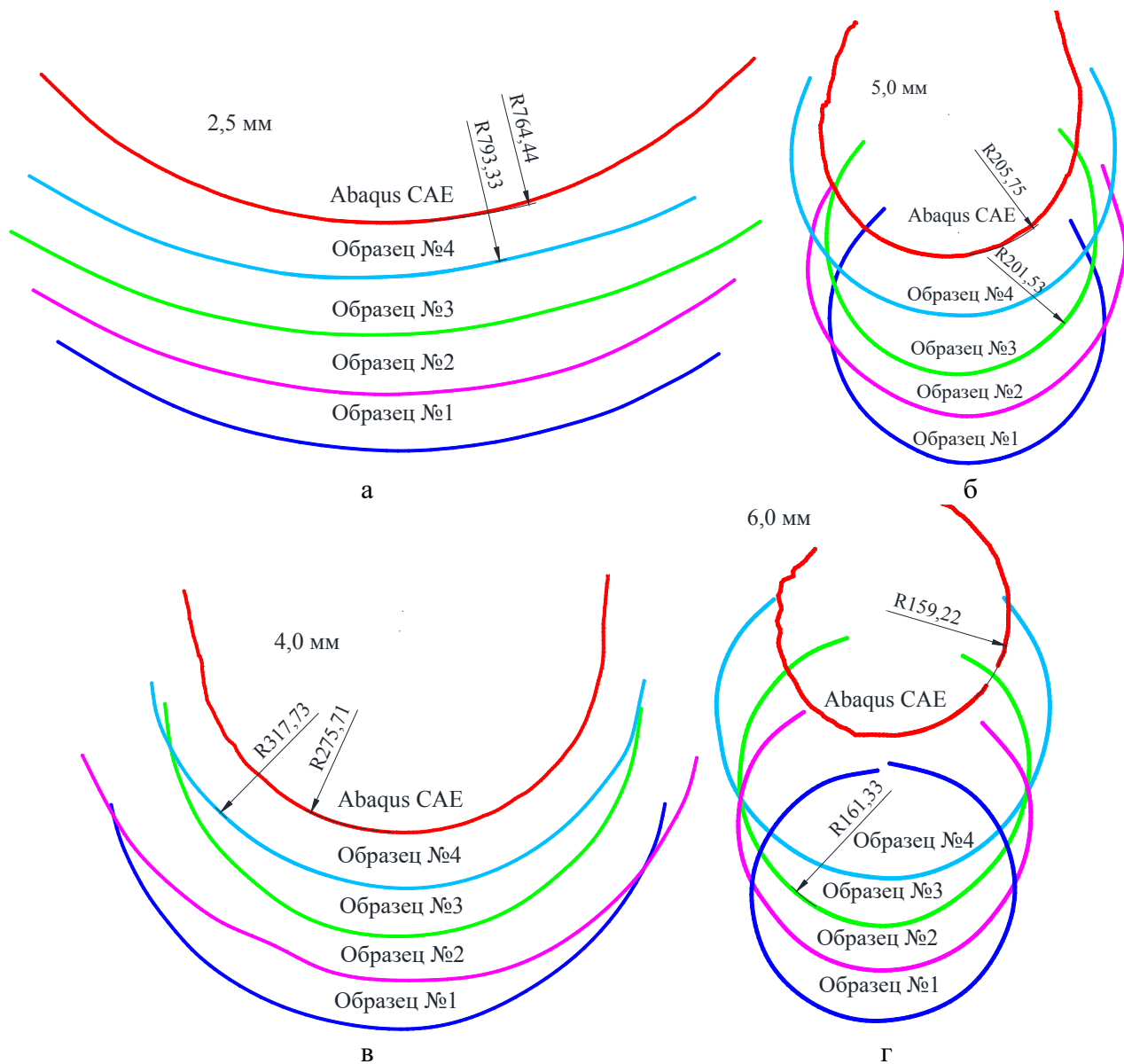


Рис. 5. Эмпирические и теоретические виды заготовки после гибки в зависимости от смещения среднего ролика: а – 2,5 мм; б – 5,0 мм; в – 4,0 мм; г – 6,0 мм

Помимо конечно-элементной в работе была использована численная аналитическая модель на основе рекуррентного решения конечно-разностной формы условий статического равновесия выделенных элементарных объемов очага деформации [6]. Данная модель предпочтительнее при решении задач оптимизационного плана, например, при проектировании нового оборудования или при расчете технологических настроек. Сравнение результатов экспериментальных исследований и результатов используемых моделей представлены на рис. 6.

На основе статистической обработки полученных массивов было установлено, что критерий Фишера при сравнении результатов экспериментов и численной аналитической модели составил – 0,949, а при сравнении экспериментов и конечно-элементной модели – 0,931, что вполне удовлетворительно и подтверждает возможность использования аналитической модели для решения задач оптимизационного плана, а конечно-элементной – для исследования напряженно-деформированного состояния при совершенствовании процессов гибки листового металлопроката на роликовой гибочной машине.

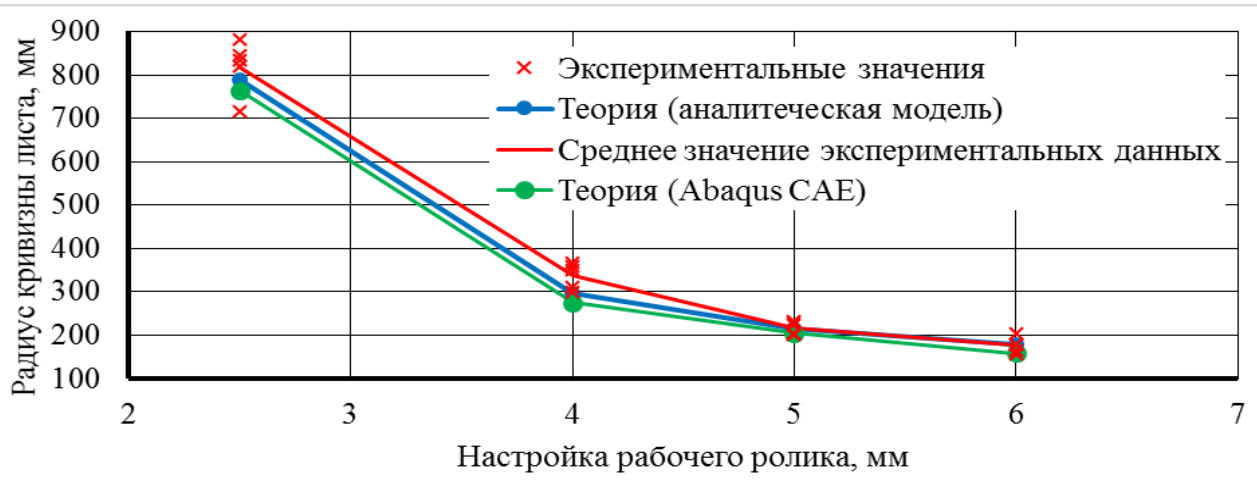


Рис. 6. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса гибки листов

ВЫВОДЫ

В результате экспериментального процесса гибки на лабораторной машине 100 x 105 x 250 получены эмпирические зависимости радиуса остаточной кривизны листа от технологических настроек машины. Эксперименты были проведены для листов из стали марки 08кп, толщиной 2,5 мм и шириной 205 мм. Величина перекрытия составляла от 2,5 до 6,0 мм. При перекрытии 6,0 мм заготовка принимала форму близкой к окружности. Также в работе было выполнено моделирование процесса гибки на основе конечно-элементной и аналитической модели. Оба типа моделей используются на практике для определения качественной картины процесса и получения количественных параметров в режиме реального времени. Обработка результатов как экспериментальных так и теоретических исследований была основана на выборке точек полученной формы образцов с различным шагом, геометрическом решении по определению радиуса изгиба заготовки и статистической обработке полученных результатов. При исследовании результатов конечно-элементной модели использовались координаты узлов сетки, расположенных по средней линии листа. В случае аналитической модели была использована относительная кривизна листа, получаемая непосредственно при расчетах. Сравнение полученных результатов с результатами разработанных конечно-элементной и численной аналитической моделей показали удовлетворительную сходимость результатов, при этом критерий Фишера при сравнении результатов экспериментов и численной аналитической модели составил – 0,949, а при сравнении экспериментов и конечно-элементной модели – 0,931, что подтверждает возможность использования как аналитической, так и конечно-элементной модели при совершенствовании процессов гибки листового металлопроката на роликовой гибочной машине.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошнин Е. Н. Гибка и правка на ротационных машинах. Москва: Машиностроение, 1967. 272 с.
2. Мошнин Е. Н. Гибочные и правильные машины. Москва: МАШГИЗ. 1956. 252 с.
3. Пасечник Н. В. Машиностроительная энциклопедия. В 40 т. Т. 4, 5 Машины и агрегаты металлургического производства / под ред. В. М. Синицкого, Н. В. Пасечника. Москва: Машиностроение, 2000. 912 с.

4. Руководство по гибке высокопрочной толстолистовой стали на валковых листогибочных машинах заводов металлоконструкций: руководство. ЦНИИПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ. Москва, 1978. 61 с.
5. Самойлов В. А., Егоров А. Б. О взаимосвязи силовых факторов и кривизны в процессе деформирования проката растяжением с изгибом. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. № 7. С. 148–149.
6. Сатонин А. В. Численное конечно-разностное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации различных технологических схем обработки давлением. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*: зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА, 2001. С. 559–564.
7. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. Москва: Мир, 1986. 318 с.
8. Голенков В. А., Морев П. Г., Радченко С. Ю. Методы математического моделирования и новые задачи ОМД. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії*: тематич: зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА. 2008. С. 15–19.
9. Манилык Т., Ильин К. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5. Москва: МФТИ, ТЕСИС. 2006. 99 с.
10. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: навчальний посібник. Алчевськ: ДонДТУ. 2012. 170 с.

REFERENCES

1. Moshnin E. N. Bending and straightening on rotary machines. Moscow: Mechanical Engineering. 1967. 272 p. (in Russian).
2. Moshnin E. N. Bending and straightening machines. Moscow: MASHGIZ. 1956. 252 p. (in Russian).
3. Pasechnik N. V. Engineering encyclopedia. In 40 volumes. Vol. 4, 5 Machines and units of metallurgical production / under total. ed. V.M. Sinitskiy, N.V. Pasechnik. Moscow: Mashinostroenie. 2000. 912 p. (in Russian).
4. Guidelines for the bending of high-strength heavy plate steel on roll bending machines of metalwork factories: guide. CSRIPROJECTSTEELCONSTRUCTION. Moscow. 1978. 61 p. (in Russian).
5. Samoilov V.A., Egorov A.B. On the relationship of force factors and curvature in the process of deformation of rolled steel by tension with bending. *Izv. universities. Ferrous metallurgy*. 1989. no. 7. pp. 148–149 (in Russian).
6. Satonin A.V. Numerical finite - difference mathematical modeling of the stress-strain state of the metal during the implementation of various technological schemes of pressure treatment. *Improving the processes and equipment of working by pressure in mechanical engineering and metallurgy*. Kramatorsk: DDMA. 2001. pp. 559–564 (in Russian).
7. Zenkevich O., Morgan K. Finite elements and approximation. Moscow: Mir. 1986. 318 p. (in Russian).
8. Golenkov V. A., Morev P. G., Radchenko S. Yu. Methods of mathematical modeling and new problems of metal forming. *Improving the processes and equipment of working by pressure in mechanical engineering and metallurgy*. Kramatorsk: DDMA. 2008. pp. 15-19. (in Russian).
9. Manilyk T., Ilyin K. Practical application of the ABAQUS software package in engineering problems. Version 6.5. Moscow: MIPT, TESIS. 2006. 99 p. (in Russian).
10. Borovik P. V. Theoretical advancement of metal processing processes in a vice based on the method of scraping elements: a master book. Alchevsk: DonDTU. 2012. 170 p. (in Russian).

Грибков Э. П. – д-р. техн. наук, доц. ДГМА;
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1565-6294>

Кулик А. Н. – канд. техн. наук, доц. ДГМА;
E-mail: amm@dgma.donetsk.ua; <https://orcid.org/0000-0003-3268-6505>

Гурковская С. С. – канд. техн. наук, доц. ДГМА;
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua; <http://orcid.org/0000-0001-6594-6815>

Зубков В. С. – студант ДГМА.
E-mail: amm@dgma.donetsk.ua; <https://orcid.org/0000-0002-9830-6141>

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.