

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА НА ЛИСТОГИБОЧНЫХ МАШИНАХ

Грибков Э. П., Завгородний А. В., Бортник И. А.

Рассмотрены различные технологические схемы гибки листового металлопроката. Проведен анализ формовки листового металла на листогибочных машинах методом конечных элементов. Разработана конечно-элементная модель напряженно-деформированного состояния металла при гибке. В качестве программных средств использовалась программная среда ABAQUS. Представлены распределения эквивалентных напряжений в графической форме в виде объемной модели, а также расчетные распределения силы гибки листового металлопроката. Произведено сравнение полученных данных с существующими численными методиками. В ходе работы проанализированы полученные результаты, которые позволят дать рекомендации по совершенствованию технологий и конструктивных параметров существующего и создания нового оборудования процессов гибки листового металлопроката. Полученные результаты подтверждают необходимость создания адекватных расчетных моделей, строгого учета граничных условий, а также использование метода конечных элементов.

Розглянуто різні технологічні схеми згинання листового металопрокату. Проведено аналіз формування листового металу на листозгинальних машинах методом кінцевих елементів. Розроблено кінцево-елементну модель напружено-деформованого стану металу при згинанні. В якості програмних засобів використовувалася програмна середина ABAQUS. Представлені розподілу еквівалентних напружень в графічній формі у вигляді об'ємної моделі, а також розрахункові розподілу сили згинання листового металопрокату. Проведено порівняння отриманих даних з існуючими чисельними методиками. У ході роботи проаналізовано отримані результати, які дозволять дати рекомендації по вдосконаленню технологій і конструктивних параметрів існуючого і створення нового обладнання процесів згинання листового металопрокату. Отримані результати підтверджують необхідність створення адекватних розрахункових моделей, суворого обліку граничних умов, а також використання методу кінцевих елементів.

Various technological schemes bending sheet metal. Analysis of forming sheet metal bending machine finite element method. Finite element model of the stress-strain state of the metal for bending. As a software, programming environment used ABAQUS. Distributions of equivalent voltage in graphical form as a three-dimensional model, as well as the calculated power distribution bending sheet metal. The comparison of the data with the existing numerical methods. During the analysis of the results, that will make recommendations for evaluating to sovershens-technology and design parameters of the existing and creation of new equipment, processes about bending sheet metal. These results confirm the need to establish an adequate calculation models, a strict boundary conditions, and the use of finite element method.

Грибков Э. П.

канд. техн. наук,
доц. ДГМА
amm@dgma.donetsk.ua

Завгородний А. В.

канд. техн. наук,
ст. преп. ДГМА

Бортник И. А.

студент ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.774.6

Грибков Э. П., Завгородний А. В., Бортник И. А.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА НА ЛИСТОГИБОЧНЫХ МАШИНАХ

Одно из главных требований нормального функционирования промышленности – это развитый рынок металлопроката. При этом одним из основных видов готовой металлопродукции черной и цветной металлургии является листовой металлопрокат. Производство различного рода труб, цистерн и обечаек из стали и цветных металлов занимает одну из важнейших ролей в современной металлообрабатывающей промышленности. Это связано с тем, что такого рода изделия широко применяются в нефтегазовой отрасли, а также машиностроении и энергетике. При массовом производстве используют прошивку ковальной заготовки, прокатку, волочение и др. Что касается мелкосерийного производства, то здесь нецелесообразно использовать все эти методы, в связи с чем для производства изделий нестандартного типоразмера применяют вальцовку, как наиболее универсальный и недорогой метод производства [1; 2].

Вальцовка представляет собой технологическую операцию деформирования листового металлопроката на специальных листогибочных (вальцовочных) машинах. В качестве рабочего инструмента применяются валки (вальцы), вращающиеся в разных направлениях, между которыми перемещается металл. Одним из направлений вальцовки является вальцовка листового металлопроката на необходимый радиус. Процесс представляет собой гибку листового металла во время его вращения около валка. Такой тип вальцовки используется для гибки черных, оцинкованных, нержавеющей металлов с разной толщиной материала. При этом следует учитывать, что с увеличением толщины листа металла радиус изделия после выполнения вальцовки уменьшается.

Для гибки листового металла по радиусу применяются [3] симметричные и асимметричные трехвалковые и четырехвалковые листогибочные машины. Схемы расположения роликов в симметричных и асимметричных трехвалковых, а также четырехвалковых машинах представлены на рис. 1. Как показывает опыт эксплуатации, наибольшее распространение в Украине и странах СНГ, как наиболее простое и экономичное решение, получили симметричные трехвалковые листогибочные машины (см. рис. 1, а – г). При использовании данного типа машин актуальной является проблема определения оптимальной настройки рабочих валков листогибочных машин, то есть определение величины перекрытия валков [4].

Целью данной работы является уточнение математической модели для определения напряженно-деформированного состояния металла листа, подвергаемого формовке на трехвалковых листогибочных машинах.

В рамках анализа напряженно-деформированного состояния металла при его гибке на трехвалковых симметричных листогибочных машинах был выполнен расчет с использованием метода конечных элементов в системе Abaqus [5].

Рассматриваемая применительно к анализу процесса гибки листов на трехвалковых симметричных листогибочных машинах расчетная схема, которая представляла собой три рабочих 1-3 валка и деформируемый лист 4, представлена на рис. 2, а.

С учетом изложенного выше производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки), занимаемого моделью, на элементарные области (конечные элементы) (см. рис 2, б). Для моделирования роликов были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Моделирование листа происходило с использованием элементов S4R – четырех узловые, прямоугольные элементы оболочки с контролем разрушения [5].

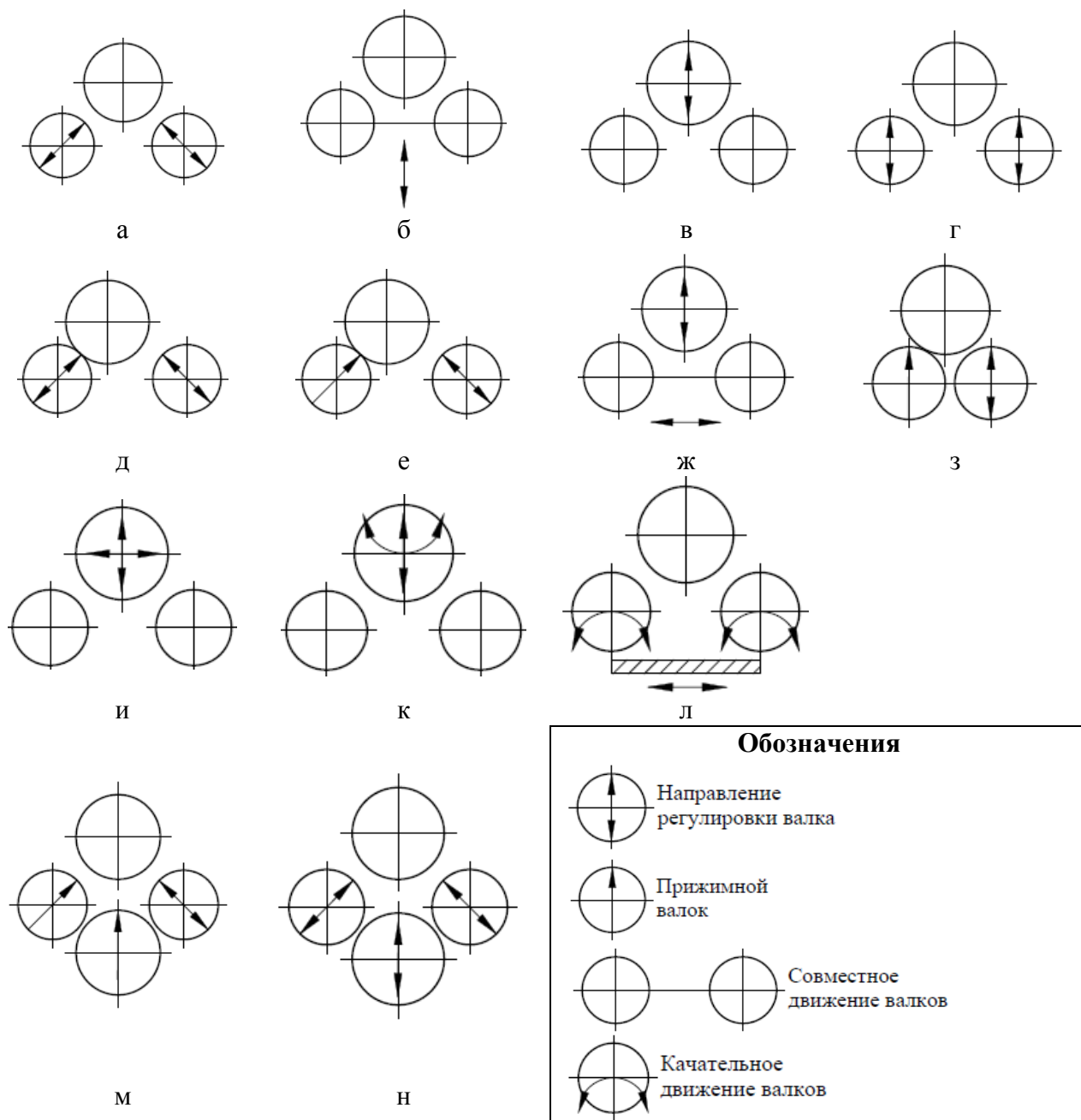


Рис. 1. Классификация схем расположения валков в листогибочных машинах [3]: а – г – трехвалковые симметричные; д – л – трехвалковые асимметричные; м – н – четырехвалковые

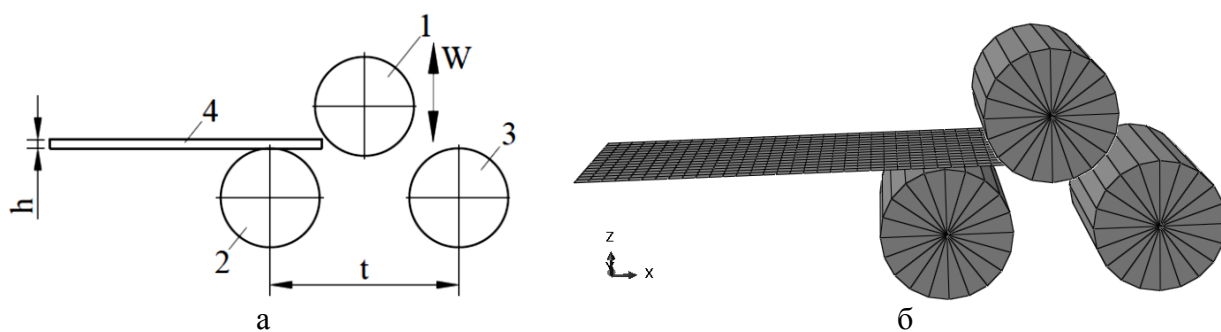


Рис. 2. Расчётная (а) и конечно-элементная в глобальной системе координат (б) модель процесса гибки листов на листогибочных машинах (1–3 – рабочие ролики; 4 – лист)

В соответствии с расчетной схемой (см. рис. 2, а) шаг машины t был принят 160 мм, диаметр рабочих роликов 1, 2, 3 $D = 100$ мм. Непосредственно моделирование процесса гибки было выполнено для листа толщиной $h = 2.5$ мм.

Исходная конечно-элементная модель имеет следующие граничные условия: нижние валки машины 2 и 3 (см. рис. 2, а) имеют одну вращательную степень свободы, валок 3 имеет две степени свободы, возможность вращения вокруг своей оси, а также перемещения по оси «3» глобальной системы координат.

В расчете использовалась модель классической пластичности металла, в качестве материала листа была принята сталь 08кп (кривую упрочнения см. рис. 3) [6].

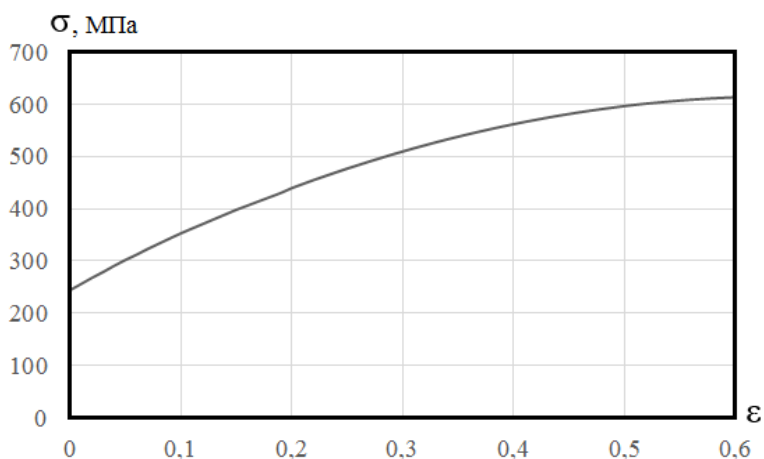


Рис. 3. Кривая упрочнения материала листа, используемая при расчете процесса правки [6]

Контакт между листом и валками машины задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» путем задания коэффициента трения $\mu = 0.4$.

Процесс моделирования формовки листового металлопроката на листогибочных машинах осуществлялся в два этапа:

1. Применение граничных условий, описанных выше.

2. Задание контрольной точке верхнего валка 1 (см. рис. 2) перемещения по оси «Z» глобальной системы координат, чем создавалась настройка модели на прогиб листа. После этого, все 3 рабочих ролика приводились во вращение с угловой скоростью 1 рад/сек, что, с учетом их диаметра, соответствует примерной скорости движения листа вдоль оси «1» глобальной системы координат 0.05 м/с. Время шага было принято 6.4 сек.

Для оценки полученных результатов выходными в данном случае параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках роликов в глобальной системе координат $RF1, RF2, RF3$, а также перемещения, деформации и напряжения в узлах конечных элементов листа.

В качестве примеров результатов численной реализации численной математической модели [4] и соответствующих ей программных средств 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 (см. рис. 2, а) составила 16 мм. Распределения эквивалентных напряжений и силы гибки при расчете методом конечных элементов представлены в графической форме в виде объемной деформированной модели (см. рис. 4, б) и рис. 5, соответственно.

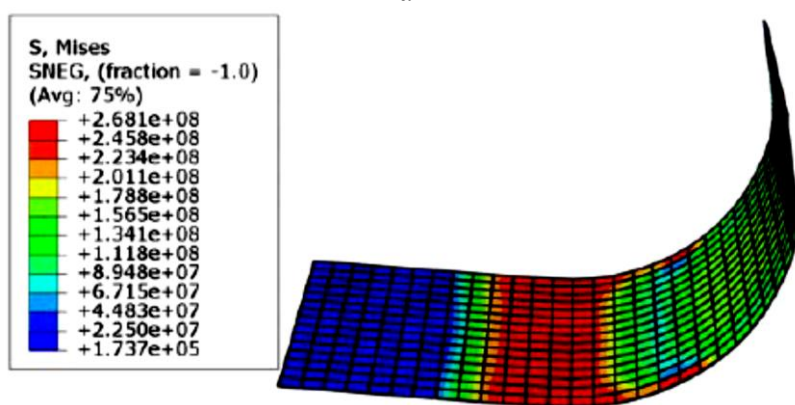
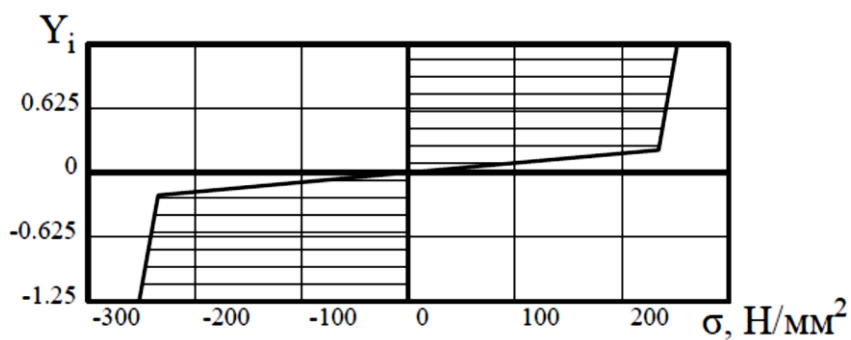


Рис. 4. Расчетные распределения напряжений в листе при расчете процесса гибки численным методом (а), в пакете конечно-элементного анализа Abaqus (б)

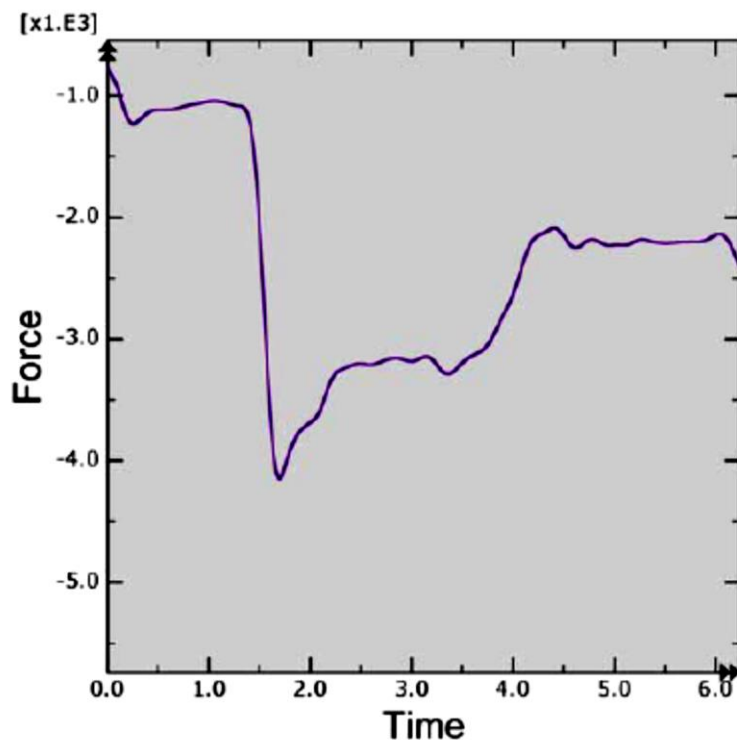


Рис. 5. Расчетные распределения силы, действующей на средний рабочий валок, применительно к гибке листа на трехвалковых листогибочных машинах

Из анализа представленных распределений является очевидным, что в самом общем случае распределения напряжений σ при упругопластическом нагружении (рис. 4, а) носят довольно сложный характер, определяемый влиянием целого ряда факторов. Проследить распределения напряжений по длине изгибаемого листа (см. рис. 4, б) позволяет расчет полученной схемы в пакете конечно-элементного анализа Abaqus [5]. Полученные данные подтверждают правомерность реализации численного подхода [4], позволяющего учесть реальный характер распределения во времени как геометрических параметров, так и механических свойств материалов листа, подвергаемого изгибу в валках листогибочных машин.

Результаты численной реализации свидетельствуют о достаточно сложном характере напряженного состояния, что подтверждает необходимость создания адекватных расчетных моделей, строгого учета граничных условий, а также использование метода конечных элементов.

ВЫВОДЫ

В целом, представленные теоретические решения по методам расчета напряженно-деформированного состояния металла при формовке листов на листогибочных машинах, а также трехмерный анализ напряженно-деформированного состояния металла при формовке листов на листогибочных машинах методом конечных элементов, составили основу математического обеспечения комплекса программных средств, обеспечивающих решение различных задач, связанных с автоматизированным расчетом и проектированием, а также с разработкой рекомендаций по совершенствованию технологий и оборудования процессов формовки листов на трехвалковых симметричных листогибочных машинах во всем диапазоне их возможных условий реализации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошнин Е. Н. *Гибочные и правильные машины* / Е. Н. Мошнин. – М. : МАШГИЗ, 1956. – 252 с.
2. Ginzburg V. B. *Flat Rolling Fundamentals* / V. B. Ginzburg, R. Ballas. – CRC Press, Marcel Dekker, 2000. – 1536 p. – ISBN 0-8247-8894-X.
3. *Руководство по гибке высокопрочной толстолистовой стали на валковых листогибочных машинах заводов металлоконструкций: руководство* / ЦНИИПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ. – М., 1978. – 61 с.
4. Сатонин А. В. *Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния обечаек при их формовке на листогибочных машинах* / А. В. Сатонин, А. В. Завгородний, А. Н. Филиппских // *Материаловедение: реальность и исследования*. – Луганск, 2011. – С. 266–272.
5. Манилык Т. *Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5* / Т. Манилык, К. Ильин. – М. : МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.
6. Кроха В. А. *Кривые упрочнения металлов при холодной деформации* / В. А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1968. – 131 с.

Статья поступила в редакцию 26.10.2015 г.