

УДК 621.771.073.8:681.3.06

В.С. МЕДВЕДЕВ, А.Н. МАСЛЕНЬ*УкрГНТЦ «Энергосталь», Украина*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ В ФАСОННЫХ КАЛИБРАХ В СРЕДЕ MATHCAD

Реализована в пакете MathCAD математическая модель прокатки в фасонных калибрах фланцевого типа, позволяющая с использованием вариационных принципов механики сплошных сред определять формоизменение металла и энергосиловые параметры прокатки. На примере прокатки в пластовом тавровом калибре показана методика построения поля скоростей, расчета скоростей деформаций, мощности, усилий и моментов прокатки, а также деформаций в направлениях свободного течения металла. Данная математическая модель положена в основу автоматизированного проектирования технологии прокатки с помощью САПР ТП «Сортовая прокатка».

Ключевые слова: прокатка, фасонный профиль, математическая модель, вариационные методы, формоизменение металла, энергосиловые параметры.

Введение

В авиационной промышленности широко используются фасонные профили сложной геометрической формы в небольших партиях поставки. Вместе с тем в современных условиях работы металлургических предприятий актуальным становится вопрос о минимизации затрат на технологическое обеспечение производственного процесса.

Особенно остро стоит вопрос сокращения затрат при освоении производства новых фасонных профилей проката, выпускаемого малотоннажными партиями. В связи со сложностью формы профилей при разработке калибровок валков часто имеют место ошибки в определении течения металла на свободных поверхностях калибров – уширения стенки, приращения или утяжки фланцев и т.д. Требуется корректировки калибровок с переточками валков и дополнительными опытными прокатками, что в конечном итоге приводит к значительному увеличению затрат на освоение.

В связи с этим при подготовке производства особое внимание должно уделяться качеству разрабатываемых калибровок валков, точности расчетов формоизменения металла, энергосиловых и других технологических параметров прокатки.

Для решения подобного рода задач весьма широко используются методы математического моделирования прокатки в фасонных калибрах с применением вариационных принципов механики сплошных сред, которые позволяют достаточно адекватно описывать течение металла в фасонных калибрах и получать достаточно точные решения по параметрам формоизменения металла и энергетике процес-

са. Однако практическая реализация данных задач связана с серьезными математическими трудностями решения весьма громоздких систем дифференциальных и интегральных уравнений. Для получения конечного результата ранее приходилось вводить значительные упрощающие допущения, а также использовать численные методы решения [1 – 3].

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка прикладной программы расчета формоизменения металла и энергосиловых параметров в среде MathCAD на основе математической модели процесса прокатки в фасонных калибрах.

Выбор математического пакета MathCAD обусловлен рядом его преимуществ по сравнению с другими пакетами и языками программирования. Так пакет MathCAD включает в себя большое количество встроенных математических функций, в том числе необходимых для решения вариационных задач механики сплошных сред; имеются широкие возможности визуализации результатов расчетов (построения графиков, диаграмм, поверхностей и т.д.). Пакет обладает доступным интерфейсом (математические выражения записываются в общепринятом виде, процесс создания программы может осуществляться одновременно с ее отладкой). Работа с пакетом не требует специальных знаний в программировании, что позволяет быстро освоить работу на компьютере и реализовать с его помощью математические модели, не вдаваясь в тонкости традиционных языков C, BASIC и др.

Результаты работы

Созданная авторами программа основана на методике определения формоизменения и энергоси-

ловых параметров прокатки в фасонных калибрах с использованием вариационных принципов, предложенной В.С. Медведевым [4], и состоит из поля ввода исходных данных, четырех расчетных областей и поля вывода результатов расчета (рис. 1 – 6). В связи с ограниченным объемом статьи, приведенные на рисунках листинги показаны в усеченном виде.

Для удобства записи исходных данных на рабочем листе помещен эскиз очага деформации. Исходными данными являются размеры исходной заготовки и калибра, радиус валков, скорость прокатки, а также сопротивление металла деформации.

После поля ввода исходных данных располагаются четыре расчетные области в следующем порядке: первая область – это область определения поля скоростей течения металла на каждом участке очага деформации; вторая – скоростей деформации и интенсивности скоростей деформации; третья – энергосиловых параметров процесса (мощности, усилия и момента прокатки); четвертая – формоизменения металла. Данные расчетные области не требуют какой-либо редакции пользователя, поэтому они находятся в свернутом состоянии и заблокированы.

Для удобства пользователя в начале рабочего листа программы размещена информация, знакомящая его с областью применения программы и основными приемами работы. Результаты расчета пользователь имеет возможность сохранить в формате .rtf, что позволит далее работать с сохраненным файлом, как с обычным документом Word.

На приведенных листингах созданной программы авторами показан пример расчета формоизменения металла и энергосиловых параметров процесса прокатки фасонного профиля, который формируется в калибре с одним пластовым тавровым элементом.

Приведенный на рис. 1 очаг деформации в пластовом тавровом калибре разделен на 8 участков, что обусловлено его геометрией. Расчет проводится последовательно, начиная с первого участка, в направлениях беспрепятственного течения металла. При построении поля скоростей на первом участке записываем выражения для определения компонент скоростей V_z и V_x . Составляющую скорости V_y определяем из закона постоянства объема. При построении поля скоростей на остальных участках записываем выражения для определения компонент скоростей V_y и V_x , а составляющую скорости V_z находим из закона постоянства объема.

В поле скоростей введены два варьируемых параметра – коэффициент вытяжки μ и коэффициент k , который характеризует положение поверхности раздела течения металла в поперечном направлении.

Варьируемые параметры рассчитываются из условия минимума полной мощности с помощью встроенных функций пакета MathCAD.

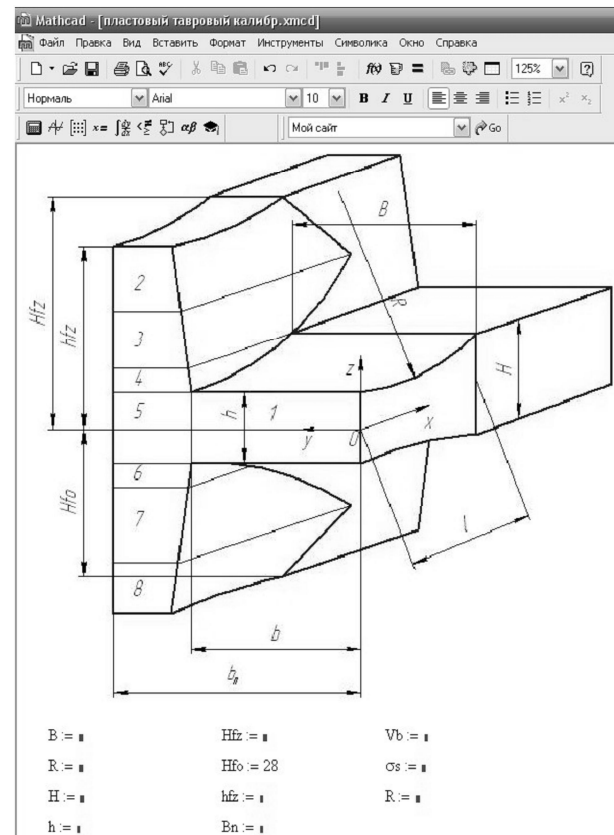


Рис. 1. Начало рабочего листа программы

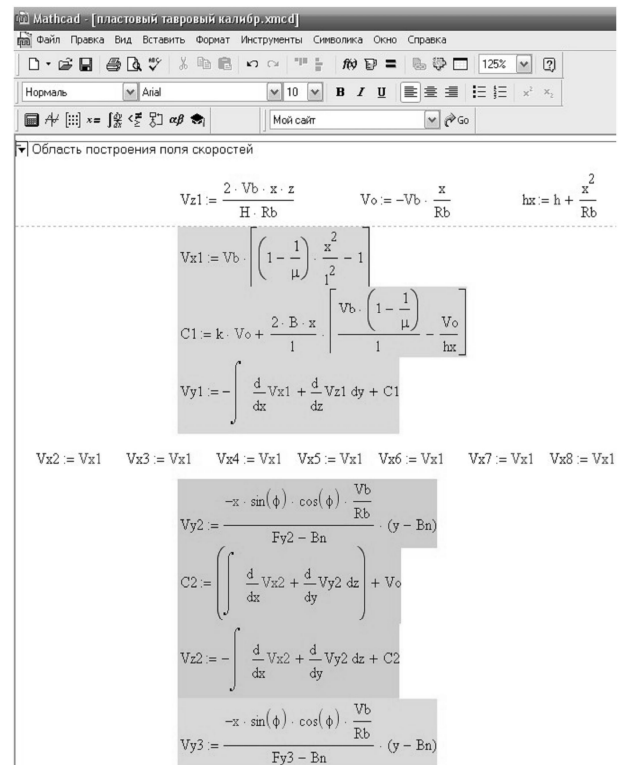


Рис. 2. Область определения поля скоростей

Определение скоростей деформации и интенсивностей скоростей деформации производится по известным зависимостям [4]. Полную мощность прокатки, состоящую из суммы мощностей сопротивления внутренних сил металла, сил трения и сил среза, определяем по основному уравнению энергетического метода [4]. Определили полную мощность прокатки, находим значения момента и усилия прокатки [1]. Далее определяется деформация металла на свободной поверхности открытого фланца и на свободной поверхности стенки (в том случае, когда не существует ограничения ее уширения).

После того, как пользователь заполнил все поля значений исходных величин, ему необходимо на участке рабочего листа программы, расположенного ниже всех областей, ввести символьные обозначения интересующих его расчетных параметров, например, коэффициента вытяжки μ и приращения открытого фланца e (рис. 6), и нажать клавишу Enter. Программа автоматически выполнит расчеты и выдаст результат в численном виде.

С помощью данной программы был выполнен ряд контрольных расчетов. Выполненный анализ расчетных значений с фактическими данными показал, что погрешность вычислений находится в пределах 12%, что позволяет рекомендовать программу для использования при инженерных расчетах.

Mathcad - [пластовый тавровый калибр.xmcd]

Область интенсивности скоростей деформации

$$\begin{aligned} E_{\text{ex1}} &:= \frac{d}{dx} V_{x1} & E_{\text{yy1}} &:= \frac{d}{dy} V_{y1} & E_{\text{zz1}} &:= \frac{d}{dz} V_{z1} \\ E_{\text{xy1}} &:= \frac{d}{dy} V_{x1} + \frac{d}{dx} V_{y1} & E_{\text{yz1}} &:= \frac{d}{dz} V_{y1} + \frac{d}{dy} V_{z1} & E_{\text{zx1}} &:= \frac{d}{dx} V_{z1} + \frac{d}{dz} V_{x1} \\ E_1 &:= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(E_{\text{ex1}} - E_{\text{yy1}})^2 + (E_{\text{yy1}} - E_{\text{zz1}})^2 + (E_{\text{zz1}} - E_{\text{ex1}})^2 + \frac{3}{2} (E_{\text{xy1}}^2 + E_{\text{yz1}}^2 + E_{\text{zx1}}^2)} \\ E_{\text{ex2}} &:= \frac{d}{dx} V_{x2} & E_{\text{yy2}} &:= \frac{d}{dy} V_{y2} & E_{\text{zz2}} &:= \frac{d}{dz} V_{z2} \\ E_{\text{xy2}} &:= \frac{d}{dy} V_{x2} + \frac{d}{dx} V_{y2} & E_{\text{yz2}} &:= \frac{d}{dz} V_{y2} + \frac{d}{dy} V_{z2} & E_{\text{zx2}} &:= \frac{d}{dx} V_{z2} + \frac{d}{dz} V_{x2} \\ E_2 &:= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(E_{\text{ex2}} - E_{\text{yy2}})^2 + (E_{\text{yy2}} - E_{\text{zz2}})^2 + (E_{\text{zz2}} - E_{\text{ex2}})^2 + \frac{3}{2} (E_{\text{xy2}}^2 + E_{\text{yz2}}^2 + E_{\text{zx2}}^2)} \\ E_{\text{ex3}} &:= \frac{d}{dx} V_{x3} & E_{\text{yy3}} &:= \frac{d}{dy} V_{y3} & E_{\text{zz3}} &:= \frac{d}{dz} V_{z3} \\ E_{\text{xy3}} &:= \frac{d}{dy} V_{x3} + \frac{d}{dx} V_{y3} & E_{\text{yz3}} &:= \frac{d}{dz} V_{y3} + \frac{d}{dy} V_{z3} & E_{\text{zx3}} &:= \frac{d}{dx} V_{z3} + \frac{d}{dz} V_{x3} \\ E_3 &:= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(E_{\text{ex3}} - E_{\text{yy3}})^2 + (E_{\text{yy3}} - E_{\text{zz3}})^2 + (E_{\text{zz3}} - E_{\text{ex3}})^2 + \frac{3}{2} (E_{\text{xy3}}^2 + E_{\text{yz3}}^2 + E_{\text{zx3}}^2)} \end{aligned}$$

Рис. 3. Область определения интенсивности скоростей деформации металла

Созданная программа позволяет рассчитывать деформацию металла в фасонных калибрах и энергосиловые параметры за достаточно короткое время и получать достаточно точные результаты.

Mathcad - [пластовый тавровый калибр.xmcd]

Область определения энергетических параметров

$$\begin{aligned} b_1 &:= \frac{H \cdot B}{\epsilon \cdot \mu l} & b_{x1} &:= \frac{B - b_1}{2} \cdot x^2 + b_1 \\ N_1(x) &:= \int_0^1 \int_{-b_{x1}-2}^{b_{x1}+2} \int_{-h_{x-2}}^{h_{x-2}} E_1 dx dy dz \\ N_1(x) &\rightarrow .66666666666666667e-10 \cdot \frac{\sigma_s}{1} \cdot B \cdot \left[V_b^2 \cdot \frac{.12267110926003054282e21}{x^1} \right] \\ N_2(x) &:= \sigma_s \cdot \int_0^{12} \int_a^{b_2} \int_{hD}^{hFz} E_2 dx dy dz \\ N_2(x) &\rightarrow \sigma_s \cdot .94280904158206336587e-10 \cdot 12 \cdot b_2 \cdot hFz \cdot \left[V_b^2 \cdot \frac{.20445184876671757138}{x^1} \right] \\ N_3(x) &:= \sigma_s \cdot \int_0^{13} \int_{b_2}^{b_3} \int_{hE}^{hD} E_3 dx dy dz \\ N_3(x) &\rightarrow \sigma_s \cdot .94280904158206336587e-10 \cdot 13 \cdot b_3 \cdot hD \cdot \left[V_b^2 \cdot \frac{.20445184876671757138}{x^1} \right] \end{aligned}$$

Рис. 4. Область определения энергосиловых параметров процесса

В любой момент пользователь может корректировать значения исходных данных, после чего программа произведет перерасчет соответствующих параметров с учетом произведенных изменений. Программа входит в библиотеку программных модулей САПР ТП «Сортовая прокатка» и используется при автоматизированном проектировании калибровок валков и технологии прокатки сложных фасонных профилей.

Mathcad - [пластовый тавровый калибр.xmcd]

Область определения формоизменения

$$\begin{aligned} z &:= 0.5H + Hf_0 \\ e_{zz8} &:= \int_0^{18} \frac{e_{z8}}{V_{x8}} dx \\ y &:= 0 \\ e_{yy1} &:= \int_0^1 \frac{e_{y1}}{V_{x1}} dx \end{aligned}$$

Рис. 5. Область определения деформации металла

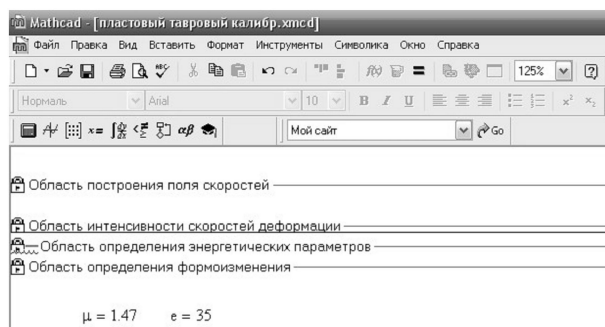


Рис. 6. Вывод результатов расчета

Выводы

Реализована в MathCAD математическая модель прокатки в фасонных калибрах фланцевого типа, позволяющая с помощью вариационных принципов механики сплошных сред определять деформацию металла и энергосиловые параметры с высокой точностью за короткое время.

Математическая модель положена в основу автоматизированного проектирования технологии прокатки с использованием САПР ТП «Сортовая прокатка».

Литература

1. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
2. Илюкович Б.М. Экстремальный принцип деформированного состояния при продольной прокатке / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, М.К. Измайлова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 5. – С. 38-39.
3. Теоретические основы обработки металлов давлением / Б.М. Илюкович, А.П. Огурцов, Н.Е. Нехаев, С.В. Еришов; под ред. Б.М. Илюковича. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – Т.2. – 485 с.
4. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А. Евстратов. – Х.: Вища школа, 1981. – 200 с.

Поступила в редакцию 1.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, помощник генерального директора по научному развитию Д.К. Нестеров, Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь», Харьков.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОКАТКИ В ФАСОННИХ КАЛІБРАХ В СЕРЕДОВИЩІ MATHCAD

В.С. Медведев, О.М. Масленый

Реалізована в пакеті MathCAD математична модель прокатки в фасонних калібрах фланцевого типу, що дозволяє з використанням варіаційних принципів механіки суцільних середовищ визначати формозміну металу і енергосилові параметри прокатки. На прикладі прокатки в пластовому тавровому калібрі показана побудова поля швидкостей, розрахунку швидкостей деформації, потужностей, зусиль та моментів прокатки і деформацій у напрямку вільного плину металу. Дана математична модель покладена в основу автоматизованого проектування технології прокатки за допомогою САПР ТП «Сортова прокатка».

Ключові слова: прокатка, фасонний профіль, математична модель, варіаційні методи, формозміна металу, енергосилові параметри.

MATHEMATICAL SIMULATION OF ROLLING PROCESS IN SECTIONAL GROOVES BY MATHCAD

V.S. Medvedev, A.N. Maslennyi

Mathematical model of rolling process in sectional grooves of flange type was realized in MathCAD. The model enables determining metal forming and energy parameters of rolling with using variational principles of mechanics of continua. By the example of rolling in tabular T-shaped groove the method of constructing velocity field, calculation of deformation rate, capacity, forces and moments of rolling as well as deformations in directions of free flow of metal are shown. We assumed this mathematical model as a basis of computer-aided designing technology of rolling by means of technological process CAD «Flat-and-edge rolling».

Key words: shaped section, mathematical model, variational methods, metal forming, energy parameters.

Медведев Виктор Степанович – канд. техн. наук, зав. отделом прокатного производства, Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь», Харьков, Украина, e-mail: niimet@bk.ru.

Масленый Александр Николаевич – инженер отдела прокатного производства, Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь», Харьков, Украина, e-mail: niimet@bk.ru.