

к.т.н. Боровик П. В.

(ДГМА, г. Краматорск, Украина, borovikpv@mail.ru)

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ КРУГЛОГО ПРОФИЛЯ НА НОЖНИЦАХ

Разработаны трехмерные математические модели процесса разделения на ножницах круглого профиля ножами трех различных конфигураций и позволяют анализировать напряженно-деформированное состояние металла и энергосиловые параметры. Результаты моделирования, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Модели позволяют расширить представление о процессе разделения на ножницах и повысить точность расчета силы резки.

Ключевые слова: математическая модель, ножницы, круглый профиль, нож, резка.

В современных условиях развития металлургического машиностроения решение задач расширения технологических возможностей уже эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования представляется возможным за счет повышения точности производимых конструкторских расчетов и увеличения степени научной обоснованности при принятии проектных и технологических решений.

В существующие технологические схемы производства сортового металлопроката входят операции поперечного разделения на ножницах [1-2], при этом постоянно растут требования к качеству готового металлопроката и требуется расширение технологических возможностей ножниц, а это способствует повышению интереса в данной области [3].

Главным технологическим параметром, определяющим конструкцию ножниц, производительность и надежность их эксплуатации, а также сортамент разрезаемых профилей является сила резки.

Известные методы расчета максимальной силы резки представляются наименее трудоемкими и базируются на экспериментальных данных резки параллельными ножами [1-2]. Для более сложных профилей максимальную силу резки предлагают определять, как и для условий резки параллельными ножами заготовок с эквивалентной площадью сечения. В то же время экспериментальные исследования [1,4] в этой области показывают, что даже при разделении заготовок равного квадратного сечения в условиях резки параллельными и фасонными (по диагонали) ножами на-

блюдается различие в максимальной величине силы резки. В работе [1] представлена методика расчета для условий горячей резки квадрата по диагонали, но вопрос разделения на ножницах профилей более сложного сечения остается открытым.

Кроме того, классические методы расчета силы резки [1, 2] параллельными ножами используют эмпирические коэффициенты, учитывающие затупление ножей и влияние бокового зазора, при учете которых величина силы изменяется в широком диапазоне.

Очевидно, что столь существенное увеличение силы должно иметь и другие причины, прежде всего связанные с механическими свойствами разрезаемых сталей и условиями реализации процесса. Таким образом, существует необходимость проведения более широкого спектра научных исследований направленных на развитие и уточнение методов расчета энергосиловых параметров процесса резки сортовых профилей на ножницах, в том числе с использованием современных теоретических подходов и методов, среди которых особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) [5].

Целью данной работы является разработка трехмерных математических моделей процесса разделения круглых профилей, которые будут способствовать расширению представления о процессах, происходящих в металле.

Для достижения указанной цели использовали конечно-элементный программный комплекс ABAQUS.

В результате были разработаны трехмерные математические модели (рис. 1), описывающие процесс разделения круглого профиля параллельными, а также фасонными дуговыми и угловыми ножами. Каждая состоит из двух абсолютно жестких недеформируемых тел — верхний и нижний ножи, а также деформируемого бруса, который моделирует разделяемый профиль круглого сечения. Кроме того, для учета упругой деформации станины в модель введен упругий элемент, а для исключения значительных динамических колебаний — вязкий демпфер.

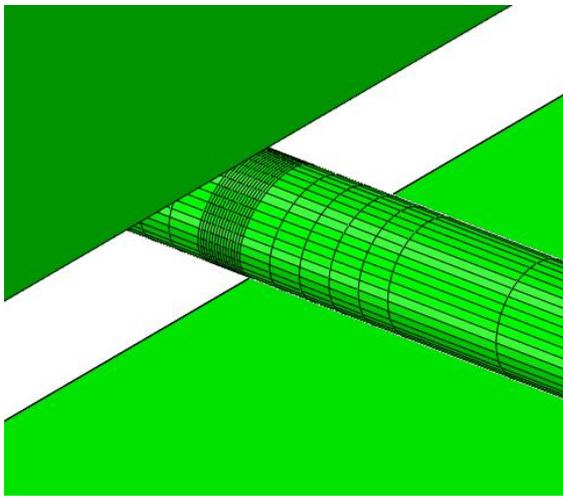


Рисунок 1 — Общий вид модели разделения круглого профиля параллельными ножами

При этом, по аналогии с реальной конструкцией ножниц, движение сообщается нижнему ножу, тогда как верхний нож остается неподвижным.

Инструменты моделировались как дискретные недеформируемые поверхности и представляют собой сетку, состоящую из трехмерных четырехузловых элементов (R3D4). Сетка деформируемого бруса состоит из изопараметрических шестигранных восьмиузловых линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования (C3D8R), имеющих свойства сплошной деформируемой среды. При этом сетка имеет сгущение в очаге резки.

Учитывая, что процесс разделения металла сопровождается большими пластическими деформациями, в ходе математического моделирования использовалась про-

цедура адаптации сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера [6].

В основу модели контактного взаимодействия между заготовкой и инструментами был положен закон трения Амонтона-Кулона, как отношение напряжения трения (касательного) к внешнему контактному давлению между контактирующими телами.

Разрушение материала моделировалось методом исключения элементов из расчета, после исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности [6].

Сопротивление металла деформированию, с учетом скорости деформации, определяли по известной зависимости [7]:

$$\sigma_u = \sigma_{cm} K_v, \quad (1)$$

где σ_{cm} — сопротивление деформации при статических испытаниях; K_v — скоростной коэффициент.

При определении сопротивления деформации при статических испытаниях использовали аппроксимацию, предложенную в работе [8]:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{0,2} (\bar{\varepsilon}_p / 0,002)^{m_0}, \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}_p$ — степень истинной пластической деформации; m_0 — показатель упрочнения, который зависит от соотношения предела прочности к пределу текучести $\sigma_b / \sigma_{0,2}$ и определяется:

— при $\sigma_b / \sigma_{0,2} \leq 1,32$

$$m_0 = \frac{\ln(\sigma_b / \sigma_{0,2}) + 0,058}{3,44} \quad (3)$$

— при $\sigma_b / \sigma_{0,2} > 1,32$

$$m_0 = \frac{\ln(\sigma_b / \sigma_{0,2}) + 0,216}{4,78}. \quad (4)$$

Скоростной коэффициент, определяли из выражения [7]:

$$K_v = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{cm}} \right)^{m_1}, \quad (5)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — текущая скорость деформации; $\dot{\varepsilon}_{cm}$ — скорость деформации при статических испытаниях; m_1 — степенной показателем

МЕТАЛУРГІЯ

тель, определяемый механическими свойствами материала.

Для оценки адекватности разработанных моделей производилось сравнение результатов моделирования с результатами лабораторных экспериментальных исследований, которые проводились в условиях кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск) на лабораторной установке кривошипно-шатунных ножниц с параллельным расположением суппортов (рис. 2), в которые устанавливали ножи соответствующие условиям реализации процесса разделения. В качестве исследуемых образцов использовали круглый профиль $\varnothing 12$ мм, изготовленный из алюминиевого сплава АА6066 со следующими механическими свойствами: $m_1 = 0,02$, $\sigma_{0,2} = 360$ МПа, $\sigma_b = 395$ МПа. При моделировании кривые текучести материала строили, используя алгоритм (1)-(5).

Скорость резки (движения нижнего ножа) в условиях моделирования полностью совпадала с условиями лабораторной реализации процесса, и составила 30 мм/с.

На рисунке 3 можно видеть общий вид круглого профиля полученного в результате резки на ножницах (рис. 3,а) и по результатам моделирования (рис. 3,б), при использовании фасонного углового, параллельного и фасонного дугового ножей. Представленные изображения, геометрия профиля, а также формирование поверхности среза, по результатам моделирования достаточно хорошо соответствуют образцам, которые были получены экспериментально.

Также производилось сравнение энергосиловых параметров рассматриваемых условий реализации процесса. На рисунке 4 представлены расчетные (по результатам моделирования) и экспериментальные зависимости силы в динамике процесса и для условий использования различных конфигураций ножей.

Статистическая обработка показала достаточно высокие значения коэффициента корреляции между расчетными и экспериментальными данными на уровне

0,9265...0,9619 при резке фасонными угловыми, 0,9324...0,9726 параллельными и 0,8559...0,9660 фасонными дуговыми ножами.

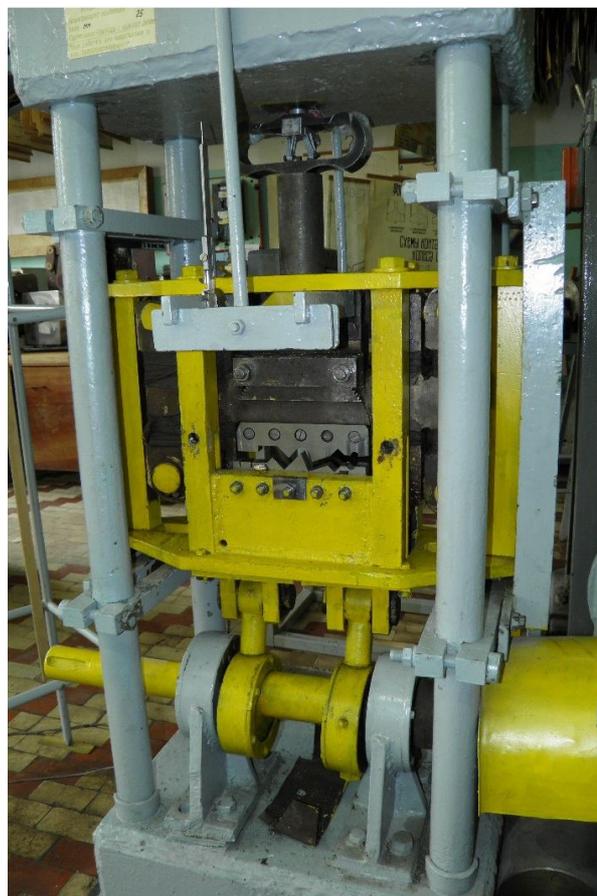


Рисунок 2 — Общий вид лабораторной установки кривошипно-шатунных ножниц с параллельным расположением суппортов

В целом можно констатировать адекватность разработанных математических моделей. Кроме того, информативность данных моделей существенно выше, чем экспериментальных данных.

В качестве главных преимуществ разработанных математических моделей следует выделить следующие возможности:

- проследить картину напряженно-деформированного состояния в динамике процесса;

- оценить степень влияния механических свойств разрезаемых металлов, в частности, предела прочности и предела текучести материала;

- установить влияние скорости резки на энергосиловые параметры процесса,

поскольку разработанные модели учитывают скорость деформации;

позволяет максимально полно учесть факторы на них влияющие.



а



б

Рисунок 3 — Общий вид круглого профиля полученного в результате резки на ножницах (а) и по результатам моделирования (б), соответственно (слева на право) при использовании фасонного углового, параллельного и фасонного дугового ножей

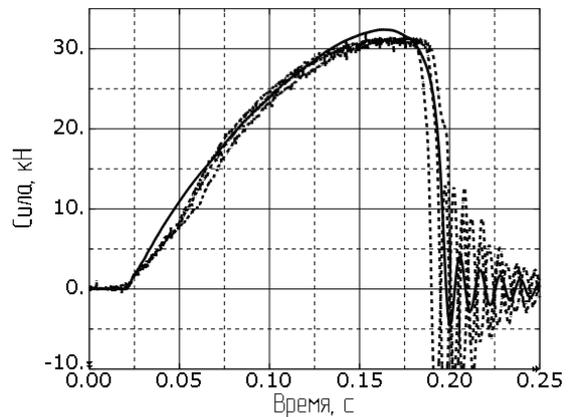
— расширить представление о процессах, протекающих в металле при разделении на ножницах с различной конфигурацией ножей, что будет способствовать развитию методов расчета силы резки, а также основных показателей качества металлопродукта после резки.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

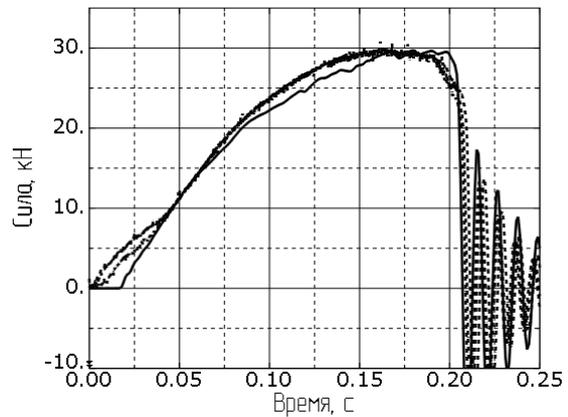
— впервые разработаны трехмерные математические модели процесса разделения круглого профиля на ножницах, позволяющая исследовать процессы, происходящие в металле;

— результаты, полученные в ходе моделирования, по отношению к экспериментальным данным имеют достаточно высокие значения коэффициента корреляции;

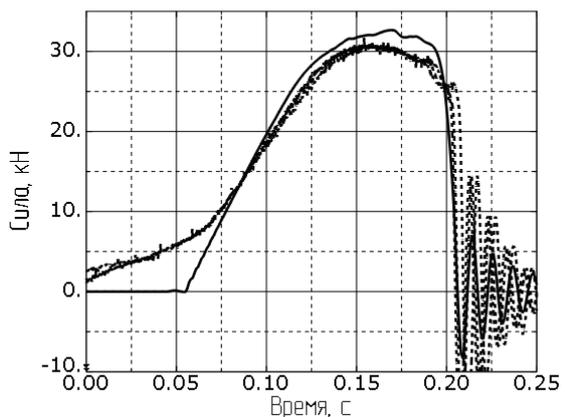
— данные модели позволяют повысить точность теоретических решений и будет способствовать расширению представления о процессе резки, а также повышению степени достоверности рассчитываемых энергосиловых параметров процесса и основных показателей качества, поскольку



а



б



в

Рисунок 4 — Расчетные (—) и экспериментальные (- - -) зависимости силы в ходе резки при использовании фасонного углового (а), параллельного (б) и фасонного дугового (в) ножей

Результаты работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях разделительных операций фасонных профилей на ножницах. В перспективе это позволит по результатам моделирования разрабатывать рекомендации направленные на совершенствование существующих и разработку новых проектно-конструкторских и технологических решений.

Библиографический список

1. Иванченко Ф. К. *Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів: навч. посіб.* / Ф. К. Иванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяєв. — К.: Вища шк., 1995. — 455 с.
2. Лукашин Н. Д. *Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов* / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 456 с.
3. Трусковский В. И. *Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб* / В. И. Трусковский, В. Г. Шеркунов // *Металлург.* — 2012. — № 11. — С. 63–66.
4. *Исследование энергосиловых параметров процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок* / А. В. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета.* — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — Вып. 35. — С. 131–137.
5. Liu G. R. *The Finite Element Method: A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. — 2003. — 348 с.
6. Боровик П. В. *Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением: монография* / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — 299 с.
7. Ушаков М. В. *Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов* / М. В. Ушаков, С. Ю. Ильяхин, И. А. Воробев // *Известия ТулГУ. Технические науки.* — Тула : ТулГУ, 2010. — Вып. 4. Ч. 2 — С. 89–93.
8. *Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник* / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов и др. — Екатеринбург : УрО РАН, 1996. — 408 с.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Ульяницким В. Н., д.т.н., проф. ВНУ им. В. Даля Харламовым Ю А.

Статья поступила в редакцию 28.02.14.

к.т.н. Боровік П. В. (ДДМА, м. Краматорськ, Україна, borovikpv@mail.ru)

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ КРУГЛОГО ПРОФІЛЮ НА НОЖИЦЯХ

Розроблено тривимірні математичні моделі процесу розділення на ножницях круглого профілю ножами трьох різних конфігурацій, що дозволяють аналізувати напружено-деформований стан металу і енергосилові параметри. Результати моделювання, добре узгоджуються з експериментальними даними. Моделі дозволяють розширити уявлення про процес розділення на ножницях і підвищити точність розрахунку сили різання.

Ключові слова: математична модель, ножци, круглий профіль, ніж, різка.

Borovyk P.V. Candidate of engineering sciences (DSMA, Kramatorsk, Ukraine, borovikpv@mail.ru)

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF ROUND PROFILE SEPARATION PROCESS WITH SHEARS

Three-dimensional simulation of round profile separation process with shears of three various configurations of blades are worked out. This allows to analyze stress-strain state of metal and energy-power parameters. The results of the simulation match with experiment data. The models help to enlarge the knowledge about the separation process with shears and to increase accuracy of a separation force calculation.

Key words: mathematical model, shears, round profile, blade, separation.