

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО УСИЛИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКЕ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ РАСКАТОВ ШЕВРОННЫМ НОЖОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В данной статье описан алгоритм одномерного математического моделирования процесса поперечной резки толстолистного металлопроката шевронным ножом со скруглением. Исходя из приведенного алгоритма, разработана модель, на её базе получены распределения силы резки в зависимости от перемещения ножа, из которых представляется возможным определить максимальное значение данной величины. Также проведен сравнительный анализ полученных распределений с аналогичными, полученными методом конечно-элементного моделирования.

**Ключевые слова:** шевронный нож, усилие, распределение, лист, резка, математическая модель.

В условиях современного рынка металлопродукции постоянно растёт спрос на толстолистовой металлопрокат, также повышаются требования к качеству готового листа, что требует как развития технологии его производства в целом, так и отдельно взятых операций.

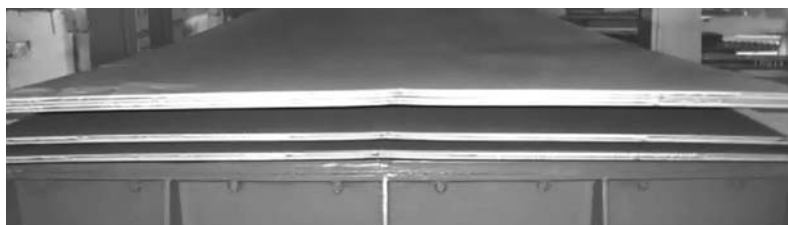
Независимо от выбранной технологической схемы, с целью получения листов заданной длины, в процесс производства, как правило, включают операцию поперечной резки. Для её реализации широко используют ножницы с шевронным ножом, преимущество которого, по сравнению с гильотинным, заключается в лучшей стабилизации листа при резке, а также равномерном распределении нагрузки на узлы ножниц за счёт проведения разделительной операции одновременно с обеих сторон разрезаемого листа.

Классическая форма режущей кромки шевронного ножа для поперечной резки толстолистовых раскатов состоит из двух

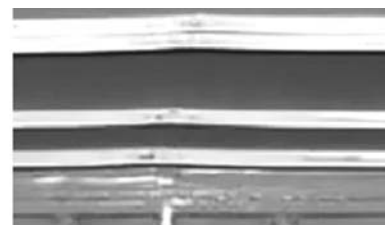
прямолинейных плоскостей, симметрично расположенных под наклоном к горизонтальной плоскости [1]. Наклон прямолинейных плоскостей режущей кромки приводит к наличию остаточной деформации части листа, находящейся под шевронным ножом, что существенно портит его товарный вид (рисунок 1, а, б).

Существует несколько технических решений [2-4], направленных на снижение данного дефекта.

Сотрудниками НКМЗ [2] предлагается снизить величину остаточной деформации листа путём выполнения двух ступенчатых снижений в центральной части режущей кромки относительно её вертикальной оси симметрии (рисунок 2, а), однако, в виду отсутствия конкретных рекомендаций относительно геометрических параметров данных конструктивных элементов, не представляется возможным оценить эффективность описанного технического решения.



а



б

Рисунок 1 – Вид торцевой поверхности листов, порезанных шевронным ножом:

а – общий вид; б – в области смыкания режущих кромок шевронного ножа

В работе [3] предполагается выполнение горизонтальной площадки, в вершине схождения режущих кромок (рисунок 2, б), длина которой зависит от свойств разрезаемого материала, угла наклона прямолинейных плоскостей и толщины ножедержателя.

В работе [4], рассмотрена перспективная конструкция шевронного ножа, особенность которой заключается в наличии скругления в вершине схождения наклонных прямолинейных плоскостей режущей кромки (рисунок 2, в), выполненного с целью уменьшения деформации листа в процессе резки и, как следствие, снижения её остаточной величины, что повышает качество готовой продукции.

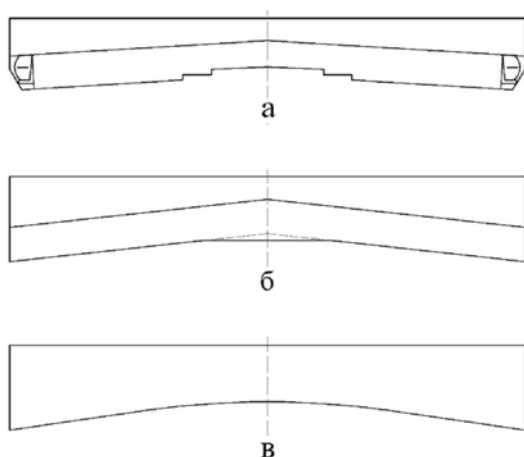


Рисунок 2 – Известные конструкции шевронных ножей со сложной формой режущей кромки

Известно, что применение ножей последних двух конструкций сопровождается существенным увеличением усилия на завершающих стадиях резки [4]. В то же время теоретическая оценка данной величины, в этих случаях, возможна только путём математического моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ), что требует значительных временных и трудовых затрат, а также высокой вычислительной мощности ЭВМ, поэтому целесообразно разработать одномерную математическую модель процесса поперечной резки, для ножей сложной формы.

Целью данной работы являлась разработка одномерной математической модели процесса поперечной резки листового металлопроката, позволяющей определять максимальное значение силы резки в случае применения шевронного ножа сложной формы.

Для достижения указанной цели было использовано численное рекуррентное решение конечно-разностной формы статического равновесия по определению энергосиловых параметров в рамках каждого отдельно выделенного элементарного объема очага резки. Используемые расчётные схемы представлены на рисунке 3.

Так как на начальных этапах определение условий, при которых сила резки достигает своего максимального значения представляется затруднительным, было решено принять в рассмотрение  $m$  положений ножа в направлении его перемещения при резке с дискретным шагом, величина которого, при известном полном ходе ножа до разделения заготовки  $S$  (рисунок 3, а), определяется следующим образом:

$$ds = \frac{S}{m}. \quad (1)$$

Также выполняли разбиение площади сечения листа по оси  $x$  (рисунок 3, б) на конечное множество  $k$  элементарных объёмов, при этом координаты  $j$ -того элементарного объёма  $x_{1j}, x_{2j}$ , учитывая, что  $x_{1j=1}=0$  определяются как:

$$\begin{aligned} x_{1j} &= x_{2j-1}, \\ x_{2j} &= x_{1j} + dx, \\ dx &= \frac{L}{2k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L$  - ширина разрезаемого листа.

Далее определяли высотные координаты  $y_{1j}, y_{2j}$  (рисунок 3, б) ножа непосредственно перед началом резки, соответствующие рассматриваемым выделенным элементарным объёмам, при этом стоит учитывать наличие скругления, таким образом, для прямолинейных участков режущей кромки имеем следующие выражения:

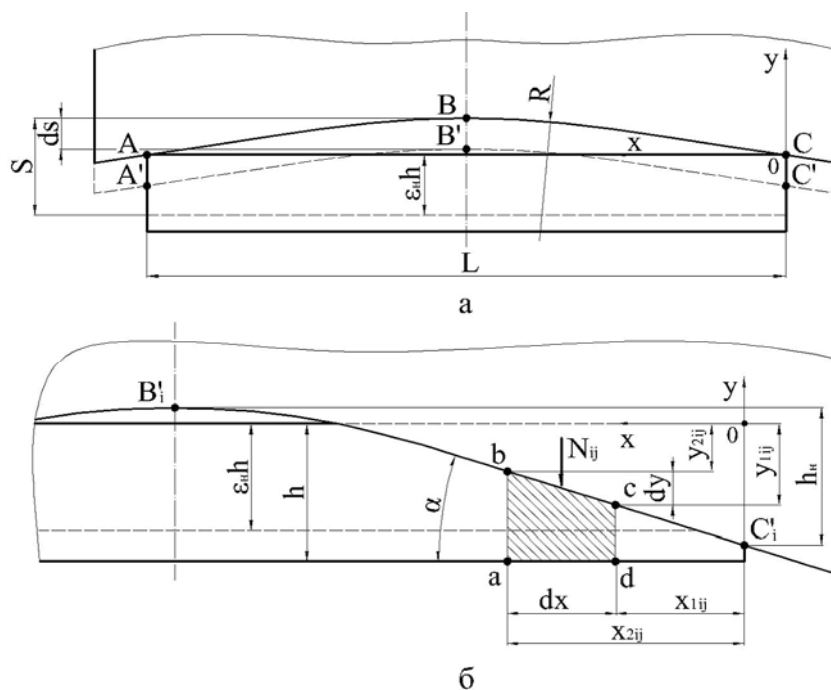


Рисунок 3 – Расчётные схемы по определению геометрических и энергосиловых параметров процесса поперечной резки шевронным ножом со скруглением

$$\begin{aligned} y_{1i=0j=1} &= 0, \\ y_{2i=0j} &= y_{1i=0j} + dy, \\ dy &= dx \cdot \operatorname{tg} \alpha, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\alpha$  - угол наклона режущей кромки на прямолинейном участке.

Для участка со скруглением:

$$\begin{aligned} y_{1i=0j} &= y_{2i} = 0j - 1 \\ y_{2i=0j} &= h_n - \left( R - \sqrt{R^2 - \left( \frac{L}{2} - x_{2j} \right)^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $h_n$  - высота рабочей поверхности режущей кромки;

$R$  – радиус скругления.

Пересчёт координат в при  $i$ -том положении ножа осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} y_{1ij} &= y_{1i=0j} - i \cdot ds, \\ y_{2ij} &= y_{2i=0j} - i \cdot ds, \\ x_{1ij} &= \operatorname{const}, \\ x_{2ij} &= \operatorname{const}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения величины силы резки  $N_i$  при  $i$ -ом положении ножа использовали выражение следующего вида:

$$N_i = \sum_{j=1}^n 2\tau_{ij} \cdot F_{ij}, \quad (6)$$

где  $\tau_{ij}$  - сопротивление срезу в рамках каждого  $j$ -го выделенного элементарного объёма  $abcd$  площадью  $F_{ij}$  при  $i$ -ом положении ножа;

$n$  - количество участков листа, составляющих срезаемую площадь при  $i$ -ом положении ножа ( $n \leq k$ );

$h$  - толщина листа;

Площадь  $j$ -того выделенного объёма для  $i$ -того положения ножа при известных соответствующих координатах  $y_{1ij,2ij}$ :

$$F_{ij} = \frac{(h - |y_{1ij}|) + (h - |y_{2ij}|)}{2} \cdot dx. \quad (7)$$

Величина истинного сопротивления срезу в рамках каждого выделенного элементарного объёма определялась из следующего выражения:

$$\tau_{ij} = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_n} \cdot K_{\varepsilon_n} (x_{ij})^{\alpha_\tau}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_n$  - относительная глубина внедрения до скола;

$\sigma_b$  - предел прочности разрезаемого материала;

$x_{ij}$  - отношение величины относительно внедрения до скола для  $j$ -го элементарного объема  $abcd$  (рисунок 3, б) при  $i$ -ом положении ножа к величине относительной глубины надреза до скола  $\varepsilon_n$ ;

$K_{\varepsilon_n}$  - коэффициент энтропии, учитывающий неравномерность распределения удельного сопротивления срезам по длине "режущего клина" в зависимости от угла наклона ножа [5];

$\alpha_\tau$  - степенной показатель, характеризующий форму рассматриваемого распределения сопротивления срезам [6].

Величина относительного надреза до скола  $\varepsilon_n$  определялась из следующей зависимости:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{1 - e^{-A \left( \frac{h}{h_{max}} \right)^B}}{1 - e^{-A}} \times \left( 1 - \varepsilon_{min} \left( \cos \frac{\alpha}{2} \right)^2 \right), \quad (9)$$

где  $A, B$  - эмпирические коэффициенты, значения которых зависят от свойств разрезаемого материала;

$h_{max}$  - толщина заготовки, при которой значения относительного внедрения до скола  $\varepsilon_n$  асимптотически приближаются к своему минимуму;

$\varepsilon_{min}$  - минимальная относительная глубина надреза до скола, соответствующая толщине листа  $h_{max}$ .

Выражение (9) получено эмпирически после обработки экспериментальных данных по резке сплава на основе свинца ( $\sigma_b=23$ (МПа),  $A=1$ ,  $B=1,4$ ,  $h_{max}=30$ ,  $\varepsilon_{min}=0,8$ ) шевронными ножами с углом наклона прямолинейных плоскостей  $3^\circ$  и  $6^\circ$ .

На рисунке 4 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости величины относительной глубины надреза

до скола  $\varepsilon_n$  от толщины разрезаемого материала, полученные для случая резки шевронным ножом с углом наклона режущей кромки  $6^\circ$  пластин различной толщины из материала, указанного выше.

Исходя из выражений (1-9), разработана одномерная математическая модель по определению энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом со скруглением. Программная реализация осуществлялась в среде системы автоматизации математических расчетов Matlab.

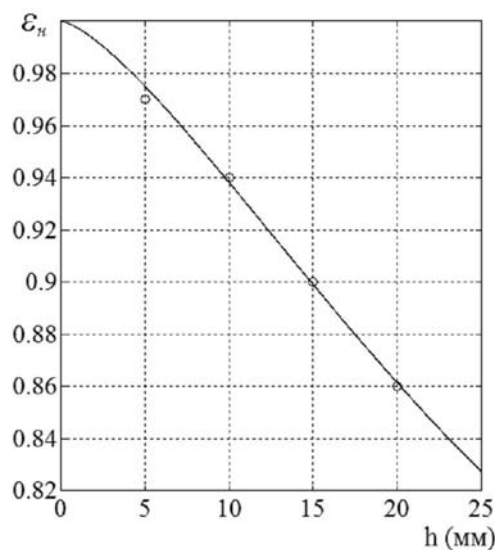


Рисунок 4 - теоретическая и экспериментальная зависимости величины относительной глубины надреза до скола  $\varepsilon_n$  от толщины  $h$  разрезаемого материала

В рамках данной работы был проведен сравнительный анализ результатов, приведенных в работе [4], с результатами одномерного математического моделирования, полученными на базе разработанной модели при аналогичных условиях порезки.

На рис. 5, а представлены распределения силы резки  $N$  от перемещения ножа  $S$ , полученные на основе МКЭ и одномерного математического моделирования в среде Matlab для случая резки листового металлопроката сечением 25X1000 (мм) из стали Ст2пс ( $\sigma_b=330$  МПа) шевронным ножом со скруглением радиусом 5000 (мм) в вершине схождения прямолинейных плоскостей, угол наклона которых  $3^\circ$ .

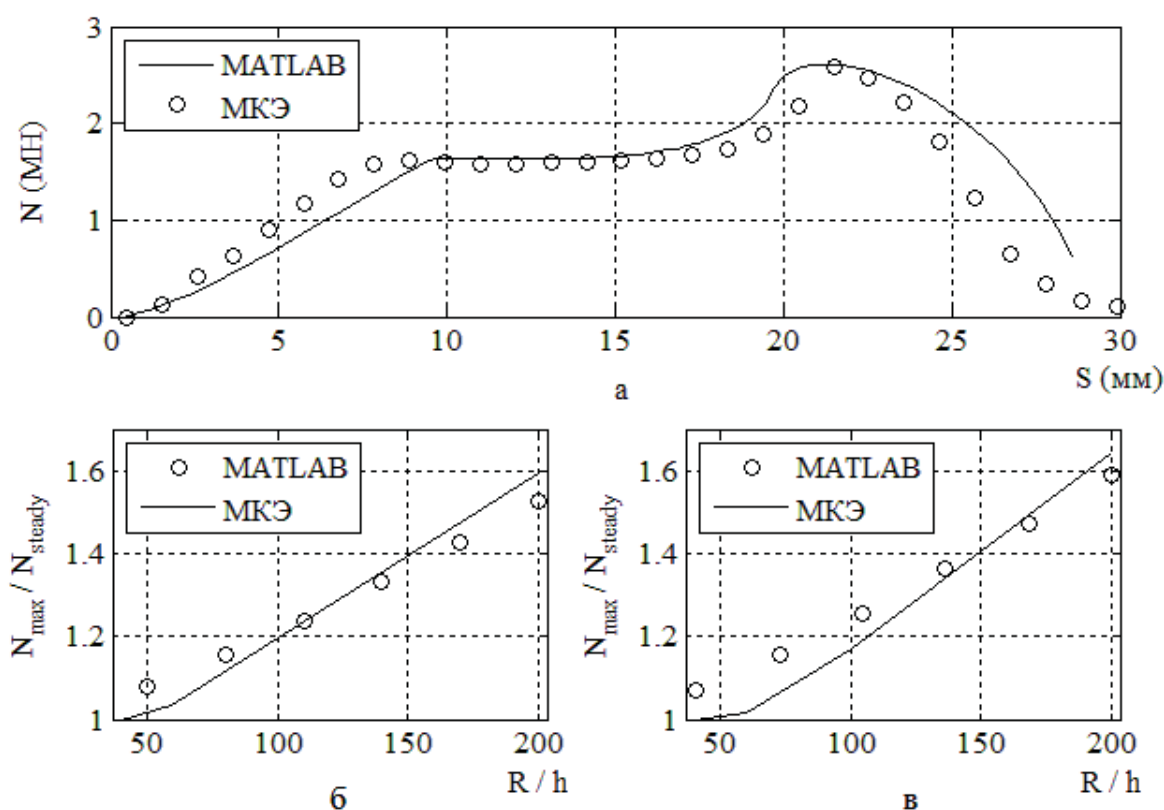


Рисунок 5– Результаты моделирования процесса поперечной резки толстолистового металлопроката шевронным ножом со скруглением, полученные на основе МКЭ и одномерного математического моделирования в среде Matlab

Также для обоих методов расчёта приведены зависимости коэффициента увеличения силы резки  $N_{max}/N_{steady}$  от отношения  $R/h$  для листов сечением 15X1000 (мм) (рис. 5, б) и 25X1000 (мм) (рис. 5, в). Величина среднего относительного отклонения для данных распределений составляет <10%, следовательно, полученная в рамках данной работы математическая модель может быть использована в качестве альтернативы МКЭ при определении энергосиловых параметров процесса поперечной резки листового металлопроката шевронным ножом сложной формы.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- полученная в рамках данной работы одномерная математическая модель процесса поперечной резки листового металлопроката позволяет определять максимальную величину силы резки, на базе её распределения в зависимости от переме-

щения ножа и может использоваться как альтернатива МКЭ для случая применения шевронного ножа со скруглением;

- возможна адаптация разработанной математической модели к процессам поперечной режущей резки шевронными ножами различных конструкций, для которых применение известных методик расчёта энергосиловых параметров является затруднительным;

- необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, направленные на уточнение и развитие приведенных в данной работе выражений по определению значений истинного сопротивления резке и максимального внедрения до скола.

Результаты данной работы могут быть интересны при разработке и оценке возможности применения шевронных ножей новых конструкций.

## Библіографічний список

1. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков. – М.: Металлургия, 1985. – 375 с.
2. Пат. 69331 Україна, МПК В23D35/00, В23D25/00, В23D15/00. Комплект ножів ножиців для різання листового матеріалу / Суков Г. С., Алдохін Д. В., Калашніков А. А. та ін.; Заявник ПАО "Новокраматорський машинобудівний завод". – и201112194; заявлено 18.10.2011, опубл. 25.04.2012, Бюл №8.
3. Пат. 2212986 Российская федерация, МПК В23D35/00. Нож шевронный для резки листового материала / Ю.С. Котелевец, В.А. Арашкевич, Ю.Д. Иванов и др.; Заявитель ОАО "Северсталь". – № 2001120645/02; заявл. 23.07.2001; опубл. 27.09.2003.
4. Боровик П.В. К вопросу качества резки шевронными ножами // Обработка материалов тиском.: Зб. наук. пр. №1(34). – Краматорськ, 2013. – С. 245-250.
5. Жуков И. Б. Исследование и оптимизация электромеханических систем управления комплексом резки листового проката : дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: 05.09.03 / Жуков Илья Борисович. – Санкт-Петербург, 2005. – 276 с.
6. Боровик П. В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах: дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: 05.03.05 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225с.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. Уляницьким В. Н.**

Статья поступила в редакцию 31.10.13

**Селезньов М. Є.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

#### **ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО ЗУСИЛЛЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ РІЗАННІ ТОВСТОЛИСТОВИХ РОЗКАТІВ ШЕВРОННИМ НОЖЕМ СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

У даній статті описаний алгоритм одномірного математичного моделювання процесу поперечного різання товстолистового металопрокату шевронним ножем із скругленням. Виходячи з приведенного алгоритму, розроблена модель, на її базі отримані розподіли сили різання залежно від переміщення ножа, з яких представляється можливим визначити максимальне значення цієї величини. Також проведений порівняльний аналіз отриманих розподілів з аналогічними, отриманими методом кінцево-елементного моделювання.

**Ключові слова:** шевронний ніж, зусилля, розподіл, лист, різання, математична модель.

**Seleznev M. E.** (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

#### **DETERMINATION OF THE MAXIMUM EFFORT AT TRANSVERSAL CUTTING OF THICK ROLLED SHEET WITH A KNIFE CHEVRON COMPLEX FORM**

In this article was described an algorithm of one-dimensional mathematical modeling of the transversal cutting of thick rolled sheet with a knife chevron rounded. Based on the algorithm above, it was developed a model. Based on it was obtained the force distribution depending on the movement cutting of the knife, from which it is possible to determine the maximum value of this quantity. Also has been performed a comparative analysis of these distributions with those obtained by the finite-element modeling.

**Key words:** chevron knife, the force, distribution, sheet, cutting, the mathematical model.