

**Боровик П.В.**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗКИ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ РАСКАТОВ В ГОРЯЧЕМ СОСТОЯНИИ НА ДИСКОВЫХ НОЖНИЦАХ**

**Borovik P.V.**

### **MATHEMATICAL SIMULATION OF THE HOT THICK PLATE CUTTING PROCESS USING THE ROTARY SHEARS**

*Представлены результаты математического моделирования процесса горячей резки толстолистовых раскатов дисковыми ножами на базе метода конечных элементов. Получены расчетные зависимости кинематических и силовых параметров процесса на примере двух марок стали. Установлено влияние силы внешнего сопротивления на величину и распределение силовых параметров процесса. Выявлены особенности протекания процесса важные для проектирования. Рекомендованы параметры, требующие учета при определении расчетных нагрузок процесса горячей резки толстолистовых раскатов дисковыми ножами для проектирования ножниц.*

**Ключевые слова:** *дисковые ножницы, толстолистовой раскат, горячая резка, момент резки.*

#### **Введение**

В современных условиях очень важным практическим аспектом является обеспечение надежной безаварийной работы, как уже эксплуатируемого, так и вновь проектируемого металлургического оборудования. Решение данной задачи требует определения спектра рабочих нагрузок, что на этапе проведения экспериментальных исследований непосредственно в промышленных условиях является весьма трудоемким в реализации и ограниченным по объему получаемой информации. Таким образом, необходимы решения, позволяющие дать дальнейшее развитие теоретическим основам исследуемого процесса.

В технологических линиях прокатного производства одной из неотъемлемых технологических составляющих являются операции по разделению металлопроката на ножницах различных конструкций [1-3]. Так, при производстве горячекатанного толстого листа для обрезки боковых кромок раскатов используют дисковые ножницы.

Традиционно процесс обрезки боковых кромок осуществляется в холодном состоянии, а максимальная толщина при этом составляет 25-30 мм в зависимости от марки стали. В условиях ПАО «Алчевский металлургический комбинат» технологические возможности данного оборудования были расширены за счет реализации процесса в горячем состоянии [4]. Это позволило на существующей конструкции ножниц резать листы толщиной 36-40 мм при температуре 700°C.

В настоящее время существует необходимость расширения сортамента разрезаемых листов до 50 мм, что, учитывая моральную и физическую изношенность ножниц, целесообразно реализовывать путем разработки новой конструкции дисковых ножниц горячей резки.

Существующие методы расчета процесса резки дисковыми ножами [1-4] не позволяют учесть всех конструктивных и технологических особенностей процесса горячей резки. Поэтому, учитывая развитие подходов теоретических исследований и рост возможностей современной вычислительной техники, целесообразным является применение математического моделирования данного процесса на базе метода конечных элементов (МКЭ) [5], что позволит расширить представление о протекании процесса и получить исходные данные для проектирования.

### **Цель**

Целью данной работы является теоретический анализ на базе метода конечных элементов процесса резки дисковыми ножами толстолистовых раскатов в горячем состоянии.

### **Математическая модель**

Для достижения указанной цели в среде программного комплекса ABAQUS была разработана 3D модель, описывающая процесс резки листовых раскатов дисковыми ножами в горячем состоянии. Учитывая, что процесс горячей резки сопровождается большими пластическими деформациями, то в ходе математического моделирования использовалась процедура адаптации сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера [6].

Модель (рис. 1) представляет собой одну вторую симметричную часть рассматриваемого процесса и состоит из одиннадцати абсолютно жестких недеформируемых тел, два из которых описывают диски ножей, четыре подающий и еще пять принимающий ролик-ганги, а также деформируемого бруса, моделирующего разрезаемый лист.

Деформируемый брус представляет собой сетку из изопараметрических шестигранных восьмиузловых линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования, имеющих свойства сплошной деформируемой среды. Структура сетки неравномерная, сгущающаяся в области реза (рис. 2).

Трение между контактными поверхностями моделирует закон трения Кулона. При этом коэффициент трения является величиной постоянной, характеризующей связь между контактными давлением и эквивалентным касательным напряжением. Величина коэффициента трения определяли в соответствии с методикой, представленной в работе [7].

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

При моделировании толщина разрезаемого листа составила 50 мм, ширина листа – 1200 мм, ширина отрезаемой кромки – 50 мм, диаметры дисков ножей – 1000 мм, толщина ножей – 100 мм, диаметр роликов – 100 мм.

Учитывая толщину разрезаемого листа, с целью улучшения условий захвата продающий ролик смещен вниз относительно верхней точки нижнего ножа на 3,5 мм, а принимающий ролик установлен вровень с нижним ножом.

Учитывая мировой опыт проектирования и эксплуатации ножниц, в рассматриваемой модели ось центров дисков ножей наклонена на  $9^\circ$  по направлению движения листа в процессе резки. Кроме того верхний диск повернут относительно вертикали на  $30'$  так, чтобы по мере движения листа расстояние между дисками увеличивалось. И, наконец, относительно горизонтальной оси вдоль движения листа верхний диск наклонен на  $2,5^\circ$  (рис. 1), что способствует снижению усилия и уменьшению величины прикромочного утонения (утяжки).

Окружная скорость роликов роликотгангов и дисков ножей составляла 0,4 м/с. Листу, в начальный момент времени, также была задана скорость движения 0,4 м/с.

В ходе моделирования исследовали процесс резки на примере двух марок стали 20 и 65Г при температуре разрезаемого металла  $700^\circ\text{C}$ . На рис. 3 представлены результаты моделирования процесса резки стали 65Г.

Учитывая результаты проводившихся ранее исследований [4] для определения предельных нагрузок процесс моделирования был разделен на два этапа:

- в течение 1 с моделируемого процесса лист перемещался в условиях свободного движения до наступления установившегося состояния процесса;

- затем (по истечении 1 с) на торцевую поверхность листа воздействовали нагрузкой, противоположной по направлению и линейно возрастающей во времени, до полного выталкивания листа из ножей, что в реальных условиях может соответствовать «бурению» листа или кромки в процессе резки.

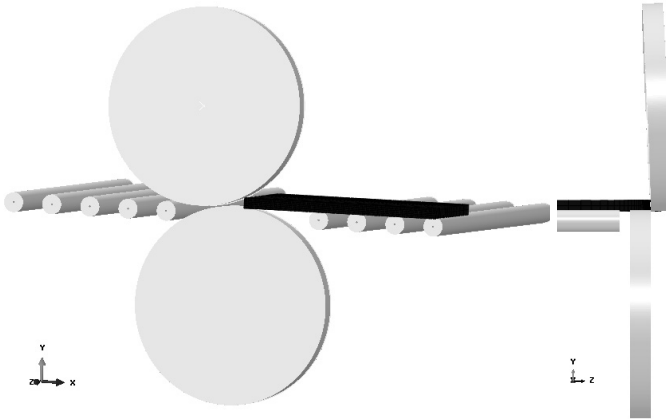


Рис. 1. Общий вид модели процесса горячей резки толстолистовых раскатов дисковыми ножами

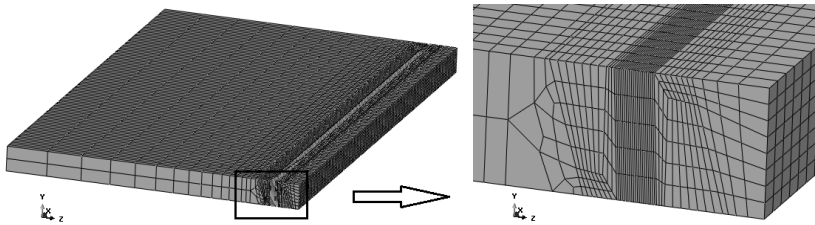


Рис. 2. Исходная структура сетки

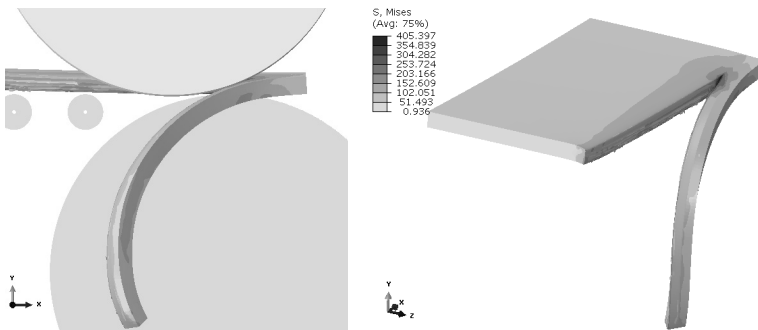


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние листа по результатам моделирования на примере стали 65Г

### Результаты исследований

В результате моделирования получены зависимости кинематических и силовых параметров, которые представлены на рис. 4 – 6.

Как можно видеть из представленных зависимостей, сила внешнего сопротивления (рис. 4, а) в начальный момент времени на этапе захвата листа ножами имеет ярко выраженный отрицательный всплеск, что объясняется встречей движущегося раската с ножами и падением скорости его движения (рис. 4, б). В дальнейшем внешнее воздействие на систему прекращается, и скорость стабилизируется на величине несколько меньшей ( $\approx 5\dots 7\%$ ), чем окружная скорость ножей. После того, как начинается рост силы внешнего сопротивления, имеем снижение скорости до полной остановки. При этом следует отметить, что при резке листа из стали 20 для его остановки необходимо усилие в  $\approx 1,5$  раза выше, чем для стали 65Г, что можно объяснить более высоким коэффициентом трения.

Зависимости, представленные на рис. 5 и 6, показывают, что рост силы внешнего сопротивления практически не влияет на радиальное усилие, но приводит к росту крутящих моментов на ножах, при этом более интенсивно увеличивается момент на верхнем ноже. Также следует отметить, что при условии свободного движения листа в ножах имеет место перераспределения момента резки в сторону нижнего ножа, а верхний остается недогруженным.

Однако при увеличении силы внешнего сопротивления соотношение между моментами постепенно выравнивается и в критической ситуации момент верхнего ножа всего на 5-10% меньше момента на нижнем ноже, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В целом, следует отметить, что при температуре  $700^{\circ}\text{C}$  предел прочности стали 20 в  $\approx 1,35$  раза ниже, чем стали 65Г, однако максимальный крутящий момент парой дисков меньше только в  $\approx 1,1$  раза. Данный факт указывает на то, что при расчете максимального крутящего момента необходимо брать материал не только с наибольшим значением предела прочности, но и с высоким коэффициентом трения.

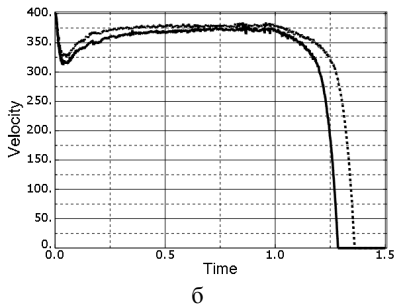
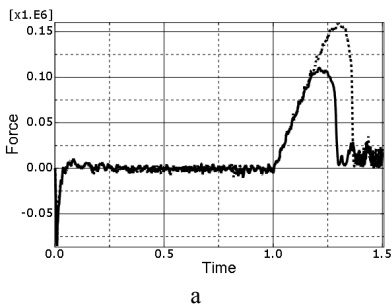


Рис. 4. Зависимость силы внешнего сопротивления (а) и скорости листа в ножах (б) по результатам моделирования для стали 20 (---) и 65Г (—)

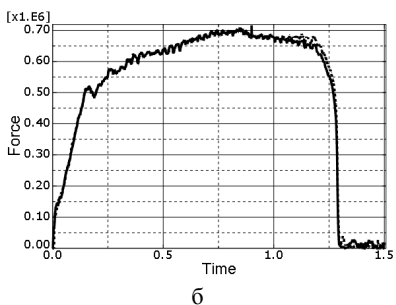
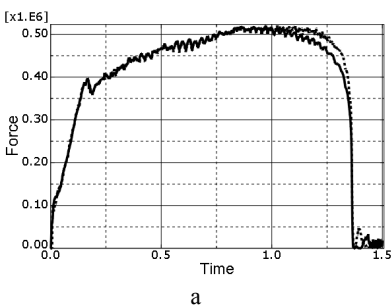


Рис. 5. Зависимость радиального усилия на верхний (—) и нижний (---) ножи для стали 20 (а) и 65Г (б)

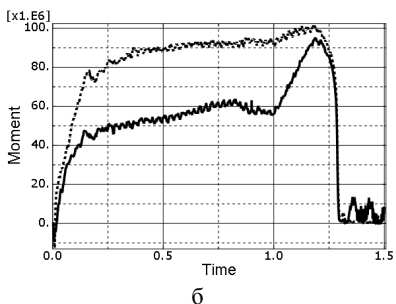
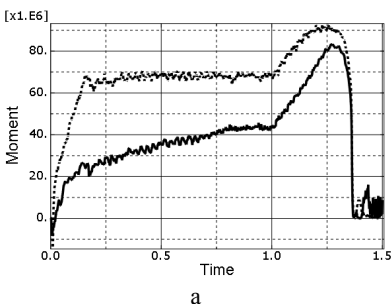


Рис. 6. Зависимость момента резки на верхнем (—) и нижнем (---) ножах для стали 20 (а) и 65Г (б)

## **Выводы**

По результатам моделирования установлено, что в процессе резки толстолистовых раскатов на дисковых ножницах в горячем состоянии нижний нож нагружен большим крутящим моментом, чем верхний. Показано, что наличие сил внешнего сопротивления практически не влияет на радиальное усилие, действующее на ножи, но, в то же время, приводит к увеличению крутящих моментов на ножах до полной остановки раската. Отмечено, что при определении проектных нагрузок необходимо учитывать предел прочности материала и коэффициент трения.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Целиков А.И. Прокатные станы : учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 432 с.
2. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. – М. : Metallurgija, 1985. – 375 с.
3. 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.
4. Боровик П.В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах : дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук, спец. 05.03.05 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с.
5. Liu G.R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 с.
6. Wisselink H.H. Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D.-Thesis / H.H. Wisselink. –Twente, The Netherlands, 2000.
7. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справ. изд. / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М. : Metallurgija, 1982. – 312 с.

## **REFERENCES**

1. Celikov A.I. Prokatnye stany : uchebnik dlja vuzov / A.I. Celikov, V.V. Smirnov. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 432 p.
2. Korolev A.A. Konstrukcija i raschet mashin i mehanizmov prokatnyh stanov / A.A. Korolev. – М. : Metallurgija, 1985. – 375 p.
3. Lukashin N.D. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov / N.D. Lukashin, L.S. Kohan, A.M. Jakushev – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 p.
4. Borovik P.V. Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovaniija processa prodol'noj rezki tolstyh gorjachekatanyh listov na diskovyh nozhnicah : dis. na soiskanie uchen. stepeni kand. tehn. nauk, spec. 05.03.05 / Borovik Pavel Vladimirovich. – Kramatorsk, 2008. – 225 p.
5. Liu G.R. The Finite Element Method: A Practical Course / G.R. Liu, S.S. Quek. – 2003. – 348 p.

6. Wisselink H.H. Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D-Thesis / H.H. Wisselink. –Twente, The Netherlands, 2000.
7. Grudev A.P. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem: sprav. izd. / A.P. Grudev, Ju. V.Zil'berg, V.T. Tilik. – M. : Metallurgija, 1982. – 312 p.

***Боровік П.В. Математичне моделювання процесу різання товстолистовий розкатів у гарячому стані на дискових ножицях.***

*Представлені результати математичного моделювання процесу гарячого різання товстолистових розкатів дисковими ножами на базі методу скінченних елементів. Отримано розрахункові залежності кінематичних і силових параметрів процесу на прикладі двох марок сталі. Встановлено вплив сили зовнішнього опору на величину і розподіл силових параметрів процесу. Виявлено особливості протікання процесу важливі для проектування. Рекомендовані параметри, що вимагають врахування при визначенні розрахункових навантажень процесу гарячого різання товстолистових розкатів дисковими ножами для проектування ножиць.*

***Ключові слова:*** дискові ножиці, товстолистовий розкат, гаряче різання, момент різання.

***Borovik P.V. Mathematical simulation of the hot thick plate cutting process using the rotary shears.***

*The purpose of the work is theoretical analysis of the hot thick plate cutting process using the rotary shears based on the finite elements method.*

*The simulation of the hot thick plate cutting process using the rotary shears based on the finite elements method have been conducted. The dependences of the kinematic and force parameters of the process are calculated having two kinds of steel as a sample. The simulation results are well similar with the results of previous experimental studies.*

*The influence of external forces to the value and distribution of power parameters of the process has specified. The features of the process are important to the design identified.*

*The parameters requiring consideration in determination of design loads of hot thick plate cutting disc blades for the design of shears have recommended.*

***Keywords:*** rotary shears, thick plate, hot cutting, moment of cutting.

Боровік П.В. – канд. тех. наук, докторант Донбаской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск, Украина.  
e-mail: borovikpv@mail.ru