

КРИВЦОВ В.С., докт. техн. наук., проф., ХАИ, Харьков
ЗАСТЕЛА А.Н., канд. техн. наук., доц., ХАИ, Харьков
ХИТРЫХ Е.Е., асс., ХАИ, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ РЕЗКИ НЕПРЕРЫВНЫХ СЛИТКОВ

Рассмотрены особенности математического моделирования процессов высокоскоростной резки непрерывных слитков в классической постановке и с применением метода конечных элементов. Проведено математическое моделирование процесса импульсной резки непрерывных слитков клиновидными ножами с целью выбора оптимальных законов движения ножей МИР, обеспечивающих отсутствие нежелательного попятного импульса силы в сторону кристаллизатора криволинейной МНЛЗ.

Розглянуто особливості математичного моделювання процесів високошвидкісного різання неперервних зливків у класичній постановці та з використанням методу кінцевих елементів. Проведено математичне моделювання процесу імпульсного різання неперервних зливків клинчастими ножами з метою вибору оптимальних законів руху ножів МИР, що забезпечують відсутність небажаного поп'ятного імпульсу сили у бік кристалізатора криволінійної МНЛЗ.

The article analyses the peculiarities of mathematical modeling of impulse cutting processes for continuous casting (in classical and finite element method definitions). The modeling of cutting with V-shaped knives was performed to find the laws of motion which guarantee the absence of undesirable backward impulse of force towards a continuous casting machine crystallizer.

Введение. Для решения важных задач – экономии металлов и повышения качества заготовок – необходимо широкое применение новых технологий получения металлических слитков, а также безотходных или малоотходных технологий изготовления деталей машин. Использование безотходных методов горячей обработки металлов давлением, в частности резки с высокими скоростями деформирования – один из наиболее перспективных путей совершенствования процесса разделения стальных заготовок на необходимые для производства части. Опыт промышленной эксплуатации оборудования, реализующего этот принцип, подтверждает высокую эффективность его использования. Преимущества импульсного оборудования очевидны как с технологической, так и с экономической точки зрения; высокоскоростные технологии обработки металлов давлением позволяют снизить материало- и ресурсозатраты при производстве [1].

В настоящее время многие вопросы технологии высокоскоростного разделения металла и изготовления предназначенных для этого машин импульсной резки (МИР) достаточно глубоко изучены: имеется большой опыт применения серийного оборудования высокоскоростного действия в технологических линиях машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на заводах различных стран, известны технология и особенности изготовления деталей и узлов МИР, методики расчета их элементов на прочность, тепловых и других расчетов. Однако некоторые вопросы, в частности проблемы точного дозирования (управления во времени) количества располагаемой энергии цикла

МИР, проблемы их динамики и взаимодействия с примыкающим оборудованием в настоящее время изучены недостаточно. Для расширения объема знаний в этой области такие направления научных исследований являются наиболее перспективными [2, 4, 5].

Как показал обширный опыт эксплуатации импульсного режущего оборудования, важным с научной точки зрения является анализ особенностей взаимодействия элементов системы «МИР – режущий инструмент – непрерывный слиток». Поскольку при резке слитков (в особенности на криволинейных МНЛЗ) импульсным методом с применением клиновидного инструмента возникает продольный импульс силы, его составляющая, действующая в сторону кристаллизатора, может негативно воздействовать на технологический процесс литья. Поэтому научная задача состоит в отыскании таких схем резки, конфигурации режущего инструмента либо задании такого закона его движения, при которых нежелательный продольный импульс в сторону кристаллизатора МНЛЗ отсутствует или находится в нормированных (заданных) пределах.

Для решения технологических задач разделения горячих непрерывных слитков необходимо учитывать особенности процессов высокоскоростного деформирования металла, зависимость его свойств от температуры, параметров деформирования, в том числе скоростей и ускорений деформации в различных областях слитка.

Решение поставленных задач с проведением натуральных экспериментальных исследований требует значительных затрат времени и материальных средств; проведение полноценного многофакторного натурального эксперимента на промышленной МНЛЗ в сложившейся в настоящее время ситуации затруднено. В современных условиях имеющийся математический аппарат и широкие возможности программного обеспечения развитой компьютерной техники позволяют использовать результаты численного исследования полей напряжений и деформаций в конструктивных элементах и на контактных поверхностях «режущий инструмент – разрезаемый материал». Такие численные исследования требуют создания комплекса адекватных математических моделей, описывающих рассматриваемый процесс, и позволяют получить весьма точные решения, значительно сократив при этом общие расчетно-временные и финансовые затраты на исследования. Современные программные пакеты, реализующие методы аппроксимации (в том числе метод конечных элементов – МКЭ) позволяют получать достоверные результаты, достаточно близкие к данным из натуральных экспериментов. На завершающем этапе исследования с применением выбранного метода математического моделирования следует провести натуральный эксперимент, который подтвердил бы правильность полученных результатов. Такая методика исследования позволяет в сложившихся экономических условиях сократить общие затраты на выполнение работы.

Таким образом, можно сформулировать **цель работы** – разработка комплекса математических моделей, позволяющего решать задачи высокоскоростной резки непрерывных слитков.

Математическая модель процесса импульсной резки в классической постановке. Модель разработана на основании уравнений механики сплошных сред. Приняты следующие допущения:

1. Весовыми (массовыми) силами можно пренебречь.
2. Деформация протекает при постоянном объеме.
3. Плотность ρ материалов непрерывного слитка и режущего инструмента в условиях пластического течения металлов не изменяется.
4. Материал заготовки идеально пластичен.
5. Материалы разрезаемого слитка и инструмента изотропны, начальные напряжения и деформации в них отсутствуют.
6. Направляющий тензор напряжений \overline{D}_σ совпадает с направляющим тензором скоростей деформаций \overline{D}_ε : $\overline{D}_\sigma = \overline{D}_\varepsilon$.
7. Влияние течения металла вдоль плоскости реза на зону деформирования отсутствует.
8. Поле температур по сечению заготовки двумерное и условно неизменное в течение цикла резки (вследствие кратковременности процесса).
9. Температура поверхности заготовки T_n одинакова по периметру сечения.
10. Изменение температуры от поверхности к центру заготовки происходит по параболическому закону с показателем параболы $n = 2$.
11. Уравнения механики сплошных сред применяются в предположении квазистатичности действия ударной нагрузки.

При решении задач используют следующие уравнения:

- 1) уравнение движения

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} + \text{div } T_\sigma, \quad (1)$$

- 2) уравнение неразрывности

$$\text{div } \vec{v} = 0, \quad (2)$$

- 3) закон совпадения при больших пластических деформациях направляющего тензора напряжений с направляющим тензором скоростей деформаций

$$\overline{D}_\sigma = \overline{D}_\varepsilon, \quad (3)$$

- 4) коэффициент жесткости

$$\mu_i = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}. \quad (4)$$

Уравнения (1) – (4) позволяют определить поля скоростей и деформаций слитка при высокоскоростном его разделении, однако для этого необходимо иметь поля распределения скоростей, которые можно получить, например, в результате экспериментальных исследований методом сеток, что не всегда возможно в сложившихся экономических условиях.

Математическая модель процесса импульсной резки с применением МКЭ. Применение МКЭ позволяет сократить суммарные финансовые затраты на проведение научных исследований и требует лишь натурной проверки полученных результатов на завершающем этапе исследования.

Анализ специализированных интернет-форумов и данных открытой печати показывает, что моделирование процессов импульсного деформирования (с разрушением) материала непрерывного слитка представляет собой довольно сложную задачу, однако подобные задачи (например, задача строгания и др.) могут успешно решаться методом конечных элементов [6].

МКЭ-моделирование (рис. 1) процессов импульсной резки имеет ряд особенностей, связанных с рассматриваемым технологическим процессом высокоскоростной резки [3]:

1. Необходимо разработать упругопластическую модель процесса деформирования металла.

2. Математическая КЭ-модель должна адекватно описывать (и наглядно представлять при анализе результатов расчета) процесс разрушения металла. Для этого необходимо выбрать адекватный критерий разрушения

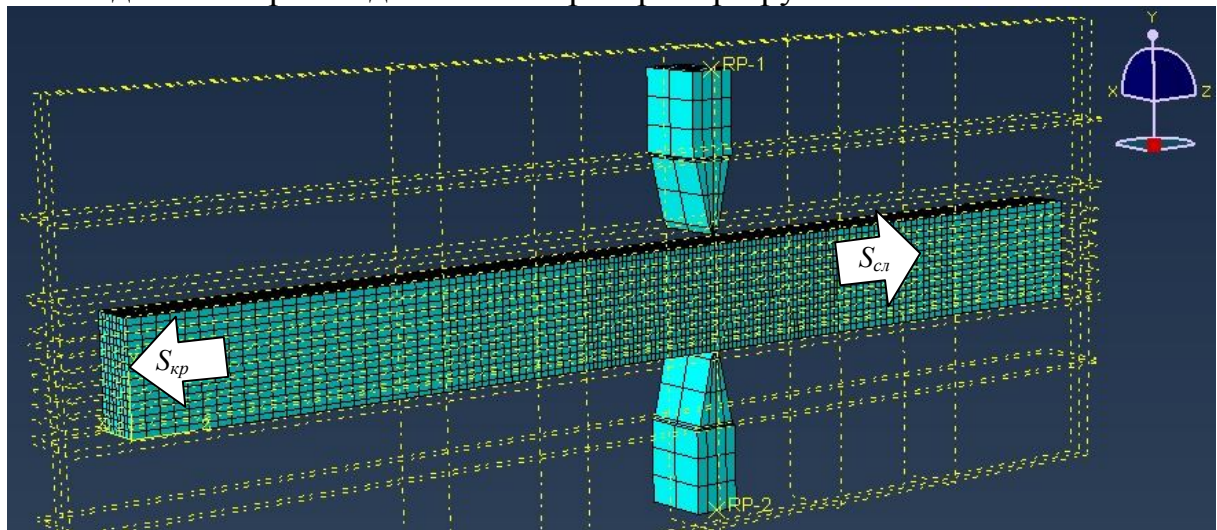


Рис. 1. Математическая модель процесса импульсной резки непрерывного слитка: $S_{кр}$ – нежелательный попятный импульс; $S_{сл}$ – импульс в сторону отделяемой части слитка

материала и верно задать свойства металла, соответствующие опытным данным. В некоторых случаях для этого без проведения специальных натурных экспериментов не обойтись.

3. Математическая модель должна также учитывать зависимость свойств деформируемого металла от температуры – от 1200°C в сердцевине слитка до 850°C на ребрах (рис. 2).

4. Математическая модель должна учитывать изменение свойств материала в зависимости от скорости деформации. Следует отметить, что для рассматриваемого диапазона начальных скоростей нижнего ножа МИР (5...25 м/с) зависимостью свойств деформируемого металла от скорости деформации можно пренебречь [3].

Совокупность приведенных требований делает процесс разработки математической модели процесса импульсной резки достаточно трудоемким, а саму модель, как в двумерной, так и в трехмерной постановке, – достаточно сложной.

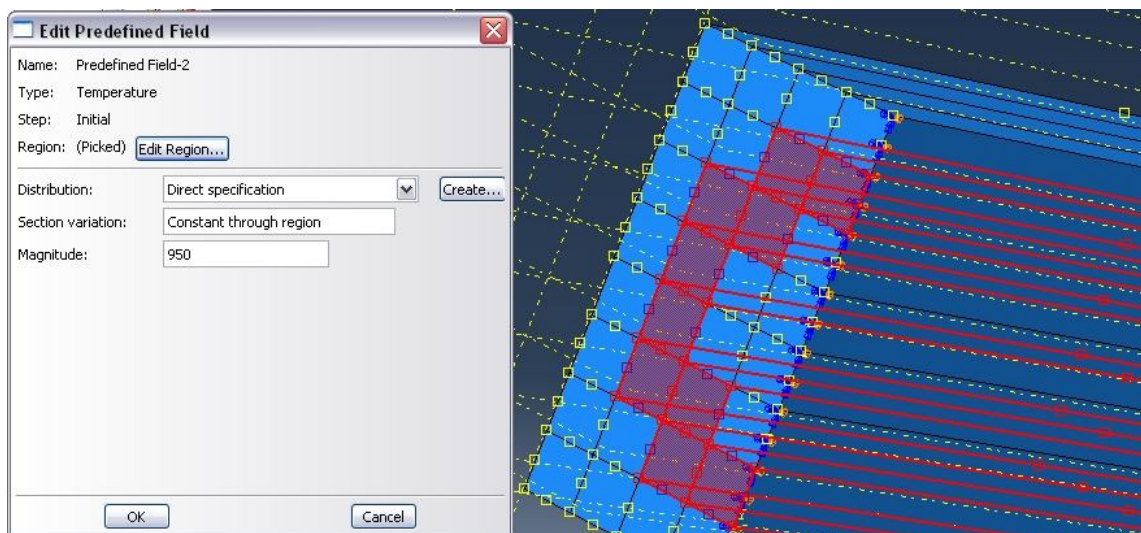


Рис. 2. Задание распределения температуры по зонам слитка

Для достижения поставленной цели в программной среде «Abaqus» разработан комплекс (набор) математических моделей процесса резки непрерывного слитка ножами различной формы (рис. 1).

Для анализа изменения по времени целевой функции (попятного импульса $S_{кр}$, зависящего от горизонтальных скоростей точек слитка $v_{гор}$) были введены пять базовых точек RP_i по высоте слитка, для которых проводили анализ изменения скоростей $v_{гор, i}$ по времени (рис. 3).

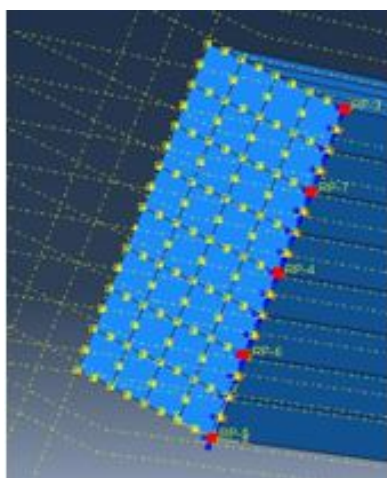


Рис. 3. Базовые точки RP_i

В качестве базового технологического процесса выбрана резка непрерывного слитка машиной, установленной в мартеновском цеху завода «Сарканайс металлургс» (Латвия).

Ввиду ограниченной производительности вычислительной техники в КЭ-моделях рассматривается некая конечная область вблизи зоны реза (эта зона должна быть, по крайней мере, больше, чем $2b + b + b$, где b – половина ширины ножа МИР), поэтому в разработанных конечно-элементных моделях применяются т. н. «присоединенные массы» (рис. 4).

Эти массы определяют массу слитка слева от зоны реза ($M_{кр}$, 19 м), справа от зоны реза ($M_{заг}$, 12 м), а также массы верхнего ($m_в$) и нижнего ($m_н$) ножей. Начальные скорости верхнего и нижнего ножей и их массы связаны коэффициентом ξ , который для рассматриваемой МИР равен $\xi = \frac{v_н}{v_в} = \frac{m_в}{m_н} = 3,3$.

$$\xi = \frac{v_н}{v_в} = \frac{m_в}{m_н} = 3,3.$$

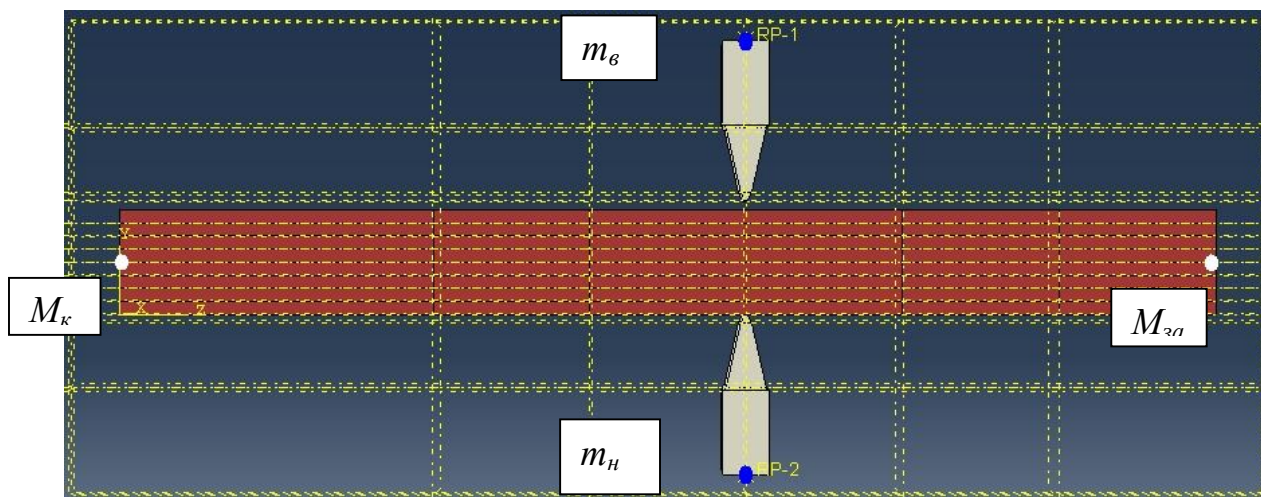


Рис. 4. Присоединенные массы

При моделировании рассматривался диапазон начальных скоростей нижнего ножа МИР от 5 до 25 м/с. Задача решалась для трех марок сталей – инструментальной стали 40, легированной 40ХНМА и нержавеющей 30Х13.

Был рассмотрен ряд законов движения нижнего ножа МИР (линейный, по дуге, по параболе и др.), при этом закон движения верхнего ножа МИР определялся выбранным законом движения нижнего ножа. Для каждого из законов анализировалась динамика изменения целевой функции, и таким образом определялся оптимальный закон движения ножей МИР.

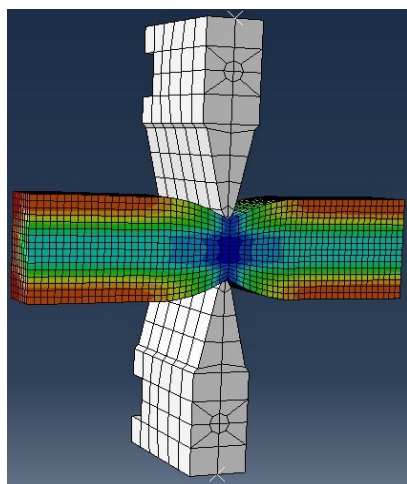


Рис. 5. Результаты моделирования

В результате (рис. 5) подтвержден факт, установленный ранее экспериментально исследователями ХАИ, что попятный импульс возникает на втором этапе резки, когда две зоны слитка, в которых напряжения достигают предела текучести материала при данной температуре, встречаются друг с другом.

Выводы. 1. Высокоскоростная резка непрерывных слитков является перспективным методом разделения металла в технологических линиях МНЛЗ. Этот метод резки характеризуется безотходностью, большей по сравнению с традиционными методами производительностью, а

также рядом других достоинств.

2. Разработан комплекс математических моделей, позволяющий проводить анализ динамического взаимодействия элементов системы «МИР – клиновидный режущий инструмент – непрерывный слиток» с целью устранения нежелательного попятного импульса в сторону кристаллизатора криволинейной МНЛЗ.

3. Установлено, что в случае, если траектория движения нижнего ножа МИР (а также зависящая от нее траектория верхнего ножа) задается в виде дуги окружности некоторого радиуса R , зависящего от свойств материала слитка и начальной скорости ножей, то при этом нежелательный попятный импульс силы в сторону кристаллизатора криволинейной МНЛЗ отсутствует.

Список литературы: 1. Импульсная резка горячего металла [Текст] / В. С. Кривцов, А. Ю. Боташев, А. Н. Застела и др. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. – 476 с. 2. Планковский, С. И. Перспективы применения импульсной резки в машинах непрерывного литья заготовок [Текст] / С. И. Планковский, С. А. Мазниченко, Е. Е. Хитрых // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 43 (4). – Х., 2005. – С. 85 – 91. 3. Хитрых, Е. Е. Задание свойств деформируемого металла при численном решении задач импульсной резки непрерывных слитков [Текст] / Е. Е. Хитрых // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (62). – Х., 2010. – С. 63 – 67. 4. Планковский, С. И. Расчет ножа-пластины с клиновой заточкой машины импульсной резки металла [Текст] / С. И. Планковский, А. Н. Застела, Е. Е. Хитрых // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 47. – Х., 2010. – С. 92 – 97. 5. Планковский, С. И. Расчет инструмента для импульсной резки проката по комбинированной схеме [Текст] / С. И. Планковский, А. Н. Застела, Е. Е. Хитрых // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. Донбасской гос. машиностр. академии. – Вып. 3 (24). – Краматорск, 2010. – С. 185 – 189. 6. Форум САПР2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fsapr2000.ru/index.php?showforum=179>. – 31.10.2011 г.

УДК 621.778.5

В.А. ХАРИТОНОВ, канд. техн. наук, проф., МГТУ, Магнитогорск
М.В. ЗАРЕЦКИЙ, старший преподаватель, МГТУ, Магнитогорск
Л.М. ЗАРЕЦКИЙ, канд. техн. наук, дир. ООО «АрМон», Магнитогорск

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ОБЖАТИИ ПРОВОЛОКИ В НЕПОЛНОМ СЛОЕ ПОВИВА КАНАТА С ЦЕЛЬЮ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Сформулирована задача точного позиционирования проволок каната за счет совокупного воздействия преформации и пластического обжатия в очаге свивки. Выработана и обоснована методика расчета оптимальных параметров преформации, получен и подтвержден численный результат.

Ключевые слова: арматурный канат, свивка, качество, преформация, упругая отдача, изгибающий момент, пластическое обжатие, глубина проникновения деформации.

Сформульовано задачу точного позиціонування дротів канату через допомогу сукупної дії преформації й пластичного обтиснення в осередку звивання. Вироблено та обґрунтовано методику розрахунку оптимальних параметрів преформації, отриманий й підтверджений чисельний результат.

Ключові слова: арматурний канат, звивання, якість, преформація, пружна віддача, момент, що вигинає, пластичне обтиснення, глибина проникнення деформації.

The problem of precise positioning of the wires of the rope through the combined effects of preformation and plastic reduction in the hearth of lay has been formulated. Developed and justified method of calculating the optimal parameters of preformation was obtained and confirmed by numerical results.

Keywords: reinforcing rope, lay, quality, preformation, elastic recoil, bending moment, plastic reduction, depth of penetration of deformation/

Постановка проблемы. В работе [1] нами рассматривалась задача расчета точных параметров преформации свиваемых проволок. Задача определения параметров преформации в нашем случае осложняется тем, что необходимо точно позиционировать проволоки в неполном слое повива, в отличие от большинства существующих конструкций канатов, где преформация