

УДК 621.96.044:004.942

**Ворожко С. С.
Кладова О. Ю.
Нарыжный А. Г.
Слюсаренко Т. В.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОЙ РЕЗКИ СЛИТКА

Импульсная резка является практически единственным методом разделения сталей, разливаемых непрерывным способом, на части мерной длины. Несмотря на многолетние исследования, проблема совершенствования технологического процесса и оборудования импульсной резки горячего металла является по-прежнему актуальной. Все расширяющийся марочный и размерный сортамент сталей, возрастающие требования к производительности технологического процесса, к качеству и стоимости конечной продукции [1] обуславливают необходимость создания новых методов анализа особенностей поведения системы, а также формирование рекомендаций по способам её совершенствования

Резка горячего слитка представляет собой комбинацию двух технологических действий: ударного деформирования твердым телом и ударного сдвига. Для этой операции характерны высокая степень пластической деформации вплоть до разрушения, образование новых поверхностей, высокая скорость деформации с образованием волновых явлений. Все это обуславливает кратковременность, высокую интенсивность протекающих процессов, их существенную неоднородность и нелинейность. С механической точки зрения, эти процессы подобны тем, которые свойственны операциямковки, прошивки, разделительным операциям, высадке, объемной штамповки и т. д.

На данный момент времени наиболее результативным и экономичным подходом к решению подобных задач является метод математического моделирования с последующей численной реализацией полученной модели. Перечисленные особенности механического поведения элементов технологической зоны позволяют отнести эту проблему к направлению, изучающему взаимодействие текучей среды и твердой конструкции, а именно Fluid-Structure Interaction (FSI) [2]. Анализ же последних публикаций [3–5] показывает, что до сего времени процессы в технологической зоне МИР рассматривались методами, ориентированными на решение задач взаимодействия только твердых тел.

Перечисленные выше подходы затрудняют анализ явлений, наблюдающиеся при импульсной резке, вызванных наличием у слитка свойств текучей среды, а именно: большие деформации материала в зоне реза, увлечение материала слитка инструментом, волновой характер распространения возмущений и влияние кинематики ножей и слитка на характеристики НДС системы; влияние кинематики инструмента и энерговооруженности МИР на качество получаемой заготовки;

Детальное исследование влияния этих явлений на технологический процесс представляется перспективным с точки зрения поиска путей его совершенствования.

Целью данной работы является обоснование и формирование новой математической модели технологической зоны импульсной резки, численная реализация этой модели и выявление особенностей механического поведения ножей и слитка на основе численных экспериментов.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие практические задачи:

- анализ физико-механического состояния объектов технологической зоны, особенностей их взаимодействия;
- выбор математических моделей поведения объектов, наиболее полно отражающих процессы, в них протекающие;

- поиск методов численной реализации математической модели, соответствующих сложности решаемой проблемы.
- проведение численных экспериментов с целью проверки адекватности модели;
- численное исследование НДС объектов с целью выявления особенностей, влияющих на качество получаемых заготовок, производительность технологического процесса и др.

На первом этапе формирования модели исследования сосредоточены на задаче моделирования основной особенности поведения материала слитка, а именно на его гетерогенных свойствах, когда слитку одновременно присущи признаки жидкости и твердого тела. Эта особенность объясняется прежде всего неравномерностью распределения температуры по сечению слитка: от 870 К на периферии до 1400 К в центре, кроме того центральная зона слитка наиболее поражена пористостью, что определяет снижение предела прочности материала слитка от периферии к центру. Слитки различаются по марочному составу и геометрии. Режущий инструмент также имеет различную геометрию в зависимости от реализуемой схемы реза (рис. 1), изготавливается из высокопрочной стали.

Во время технологического действия слиток обладает скоростью в своей оси порядка 4 м/мин, инструмент движется со значительной (до 25–30 м/с) начальной скоростью в плоскости, перпендикулярной продольной оси разрезаемой заготовки (см. рис. 1).

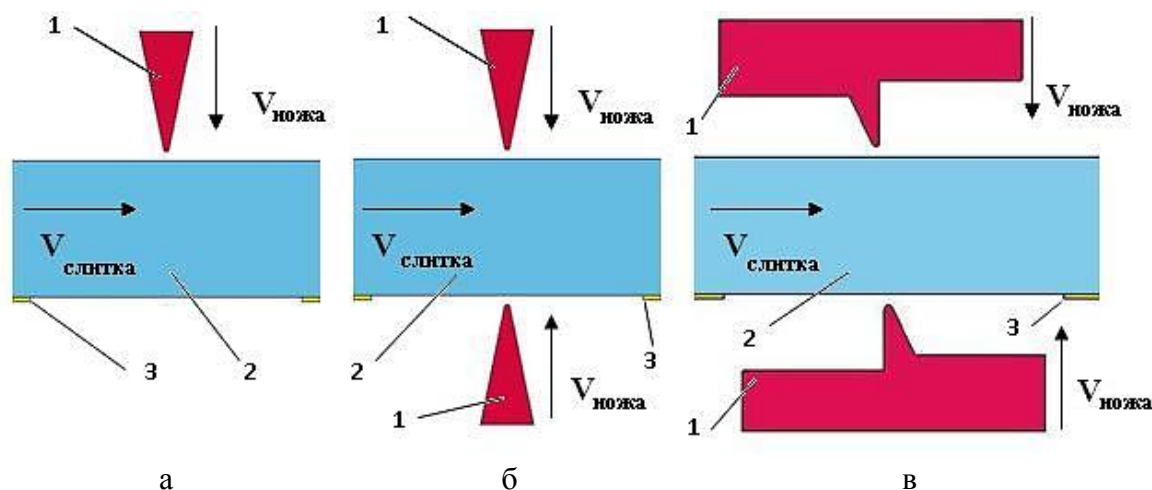


Рис. 1. Объекты технологической зоны (1 – нож; 2 – слиток; 3 – опорные поверхности). Схемы реза (а – рез напроход одним ножом; б – рез двумя симметричными ножами; в – полусрезная схема клиновидными ножами

Контакт ножей со слитком кратковременный (от 0,02 до 0,1 с). Во время реза возникает осевая составляющая усилия реза, приводящая к возникновению волновых явлений в слитке и в кристаллизаторе; гашение избыточной кинетической энергии инструмента происходит за счет обжатия слитка и заготовки. После окончания реза ножи принудительно или под действием силы тяжести возвращаются в исходное состояние.

При многократном повторении процедуры реза ввиду теплообмена между горячей заготовкой и инструментом задача из чисто механической перерастает в термомеханическую, что желательно отразить в математической модели. Однако на этапе исследования единичного реза допустимо решать задачу как чисто механическую.

Перечисленные особенности процессов в технологических системах импульсной резки позволяют охарактеризовать рассматриваемую задачу как объемную нестационарную нелинейную задачу механики сплошных сред с учетом неоднородности механических свойств и характеристик, упругопластического деформирования, ударно-контактного взаимодействия с трением при подвижности слитка и ножей. Именно поэтому задача может быть отнесена к направлению FSI (Fluid-Structure Interaction). Это направление в прикладной механике сформировалось в последнее десятилетие и сосредоточено на исследовании гетерогенных

механических систем, для которых существенно наличие и взаимодействие в динамике текущих сред и конструкций. Понятие текучей среды в контексте FSI имеет характер обобщения, оно распространяется как на традиционные жидкости, так и на металлы в состоянии текучести.

Основной метод, развиваемый для решения задач FSI, – математическое моделирование на базе готовых программных пакетов. Для решения этой задачи выбран пакет LS-DYNA.

Ввиду того, что уравнения механики сплошных сред (уравнения движения, сохранения массы, баланса энергии) являются «внутренними» для таких программных пакетов, представляя математическую модель. Подробно остановимся на принятых реологических соотношениях, контактных, граничных и начальных условиях для элементов механической системы.

Реологические соотношения элементов технологической зоны (рис. 1): режущий инструмент – модель упругого поведения, слиток – пластическая модель с упрочнением. Состояние опорных поверхностей (рольганга) не является предметом исследования в данной работе, поэтому в предлагаемой модели опоры рассматриваются как жесткие тела, ограничивающие движение слитка и заготовки.

В модели реализуется контактное взаимодействие между ножом и слитком, а также между слитком и опорами. Область контакта режущего инструмента и слитка определяется взаимным расположением ножей и слитка, а, следовательно, подлежит определению наряду с неизвестными функциями НДС. Контактные условия могут быть записаны как условия непроникновения материала слитка в материал режущего инструмента, в то время как обратное возможно. Область контакта слитка и опорных поверхностей также является переменной величиной, определяющейся возможностью отрыва слитка от опор под воздействием внешних сил в результате деформирования или движения как целого. Контактные условия для слитка и опор представляют собой также условия взаимного непроникновения тел.

Граничные условия (ГУ) описывают известное по своему характеру взаимодействие механической системы с окружающей средой. В данной задаче используются кинематические ГУ. В зависимости от анализируемой схемы реза ножи могут быть свободными от каких бы то ни было ГУ, могут иметь возможность движения как целого только в направлении, перпендикулярном оси заготовки, могут также дополнительно иметь возможность поворота как целого на заданный угол в плоскости движения.

Начальные условия (НУ). В начальный момент времени задана скорость движения ножей как целого в вертикальном направлении, которая наряду с массой инструмента и определяет кинетическую энергию, необходимую для выполнения реза. Кроме того задана начальная скорость движения слитка в направлении продольной оси.

На основе средств выбранного программного пакета сформированная математическая модель решается численно. Особенностью данной работы является применение метода ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [2] для дискретизации модели гетерогенного элемента – слитка в пространственной области. Основной особенностью этого метода является возможность решения задач с большими деформациями объектов исследования, что принципиально невозможно при применении чисто лагранжевых сеток.

На первоначальном этапе построения численного решения приняты некоторые допущения, не приводящие к значительным погрешностям, однако облегчающие получение решения в приемлемом виде.

С учетом того, что при высокоскоростной резке нагретой заготовки значительного смещения частиц материала из плоскости реза не происходит, а это установлено при экспериментальных исследованиях, допустимо ограничиться рассмотрением задачи резки в двумерном виде (плоское деформированное состояние). Поэтому выделяется только один слой и устанавливаются ограничения на перемещения объектов по оси перпендикулярной плоскости, в которой размещены объекты.

Применение нового метода ALE затрудняет также реализацию моделей, позволяющих анализировать разрушение материала по достижению предельных деформаций, поэтому на первоначальном этапе осуществляется только прогнозирование возникновения областей

локализации трещин по характеристикам НДС слитка. Первый этап моделирования выполнен при условии равномерного распределения механических характеристик по поперечному сечению слитка.

Нижеследующая часть статьи посвящена анализу результатов численных экспериментов, их сопоставлению с экспериментами натурными и практическими наблюдениями в целях оценки адекватности модели и направлений её дальнейшего совершенствования.

Первые расчеты выполнены для схемы реза одним ножом (рез напроход, см. рис. 1, а). Исходные данные модели: размер поперечного сечения слитка в вертикальном направлении – 100 мм, угол сечения ножа $\alpha = 30^\circ$. Предел текучести материала слитка 50 МПа. Рассмотрены два варианта граничных условий для ножа: первый – движение ножа свободное, второй вариант – опорная пластина ножа имеет возможность совершать только вертикальное движение. На рис. 2 представлена форма сечения заготовки, полученная во втором варианте расчета при условии отсутствия обжатия заготовки опорными поверхностями ножа. Как видно из рисунка, наблюдаются высокие деформации материала слитка в зоне реза, образование приливов (зоны А на рис. 2), что определяется гетерогенным состоянием материала. Эффект образования приливов наблюдается и на практике, что свидетельствует об адекватности получаемого численного решения. Сравнение схем со свободным и ограниченным движением ножа показывает значительное увеличение напряжений на кромке ножа (точка А) в случае его ограниченного движения, происходящее во второй половине этапа реза (рис. 2, б), для случая свободного движения на этом же интервале времени напряжения на кромке не превышают 100 МПа (пунктирная линия)

Однако численные эксперименты не продемонстрировали явления увлечения внешних слоев материала слитка к центру при взаимодействии с поверхностью ножа. Попытка учесть это явление путем включения в модель сил трения между контактирующими поверхностями не привела к успеху, очевидно, ввиду высокой пластичности материала и отсутствия учета неравномерности механических свойств по сечению слитка.

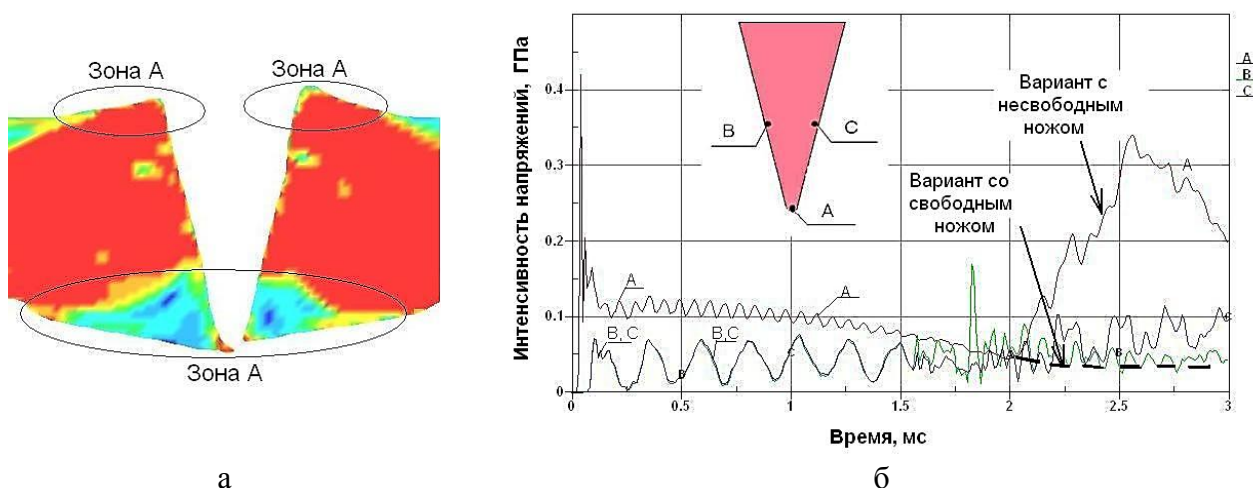


Рис. 2. Рез напроход:

а – форма среза заготовки; б – увеличение напряжений на кромке ножа при запрете поворота ножа как целого в плоскости движения

Во второй группе численных экспериментов исследовалась резка двумя симметричными ножами, отличающимися по углу профиля ножа: 15° , 23° и 30° при тех же механических характеристиках материалов слитка и инструмента, что и в первом расчете, и при одинаковых кинетических энергиях ножей.

Результаты экспериментов показали, что форма получаемого сечения слитка определяется формой ножей (рис. 3) и оптимальным, с точки зрения наименьшего отклонения от прямоугольной формы, является вариант ножей с профилем 15° (рис 3, а).

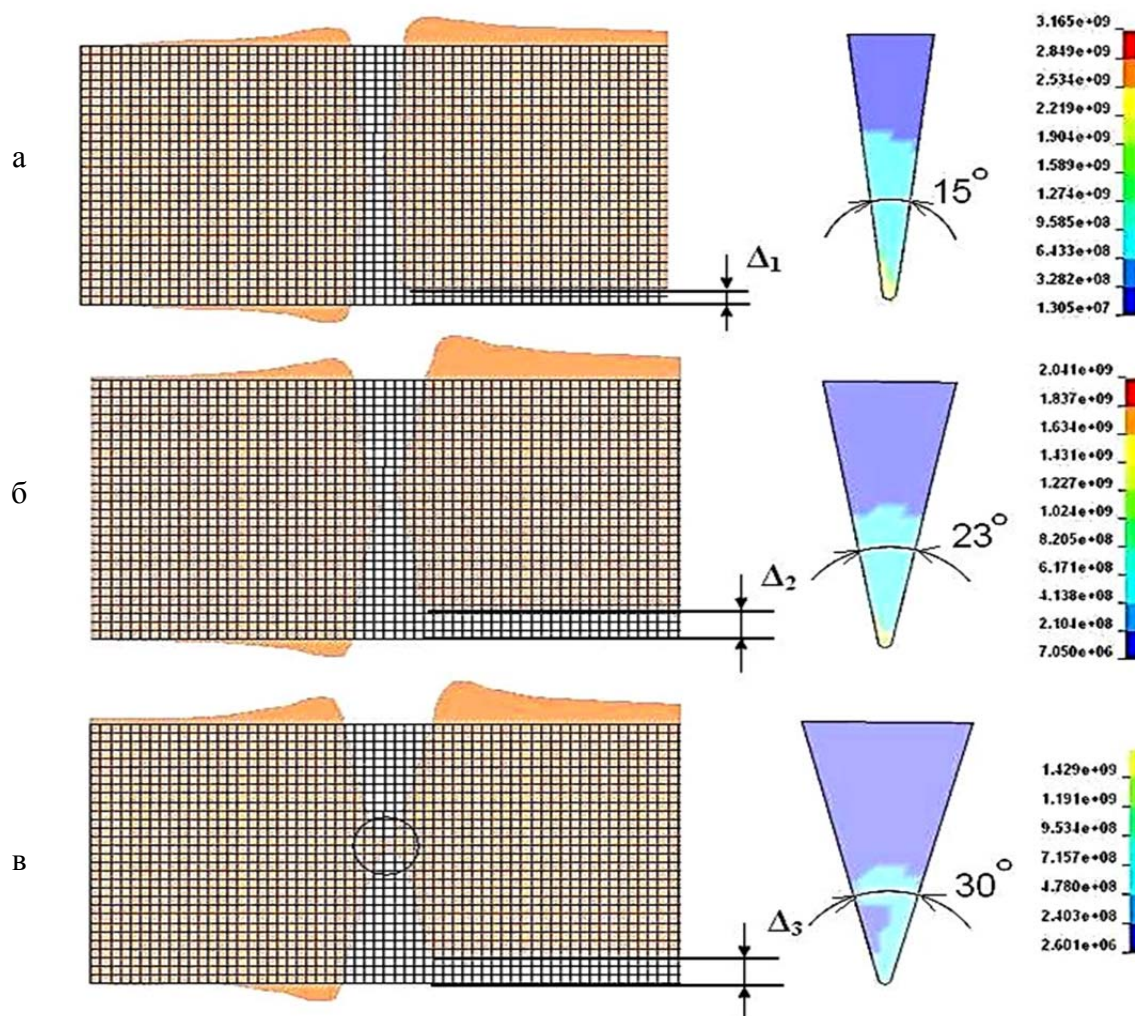


Рис. 3. Форма заготовки и напряжения в ноже при резе симметричными ножами различного профиля

Однако сравнение НДС ножей дает полностью противоположный результат. В более остром ноже возникают большие напряжения, а, следовательно, такой инструмент менее долговечен. Для всех вариантов ножей максимальные напряжения сконцентрированы в вершине ножа (см. рис. 3). Также расчеты показывают линейную зависимость потребной для осуществления реза кинетической энергии от угла профиля ножа. Как видно из рис. 4 (в) запасенной кинетической энергии недостаточно для осуществления реза, в центре слитка остается зона неразделенного материала.

Кроме того, различный угол профиля ножей приводит к изменению кинематики отрезаемой части. С ростом угла отрезаемая часть (заготовка) приобретает все более заметное движение вверх, что видно по величине конечного смещения заготовки как целого ($\Delta_1 < \Delta_2$ на рис. 3). Это объясняется возрастанием вертикальной компоненты силы взаимодействия ножа и заготовки с возрастанием угла профиля ножа

Анализ распределения поля напряжений заготовки во времени показывает возможность модели отражать волновой характер распространения нагружения. Рис. 4 (а) показывает зарождение волны в момент касания ножей заготовки, 4 (б) – образование волновых фронтов, симметрично расходящихся от внедряющихся ножей, на рис. 4 (в–д) – развитие процесса интерференции внутри напряженной области, при котором возникают зоны разгрузки (зоны А и Б) ввиду наложения движущихся волн. На рис. 4 (д) слева наблюдается отражение волны от левого зафиксированного края слитка, рис. 4 (е–з) демонстрируют переход от волнового процесса к квазистационарному нагружению, когда практически весь материал

заготовки достигает пластического состояния. На практике волновой характер нагружения слитка приводит к передаче воздействия от режущего инструмента на металл, находящийся в кристаллизаторе, что является крайне негативным явлением, поэтому возможность исследовать процесс движения волны является ценным свойством модели.

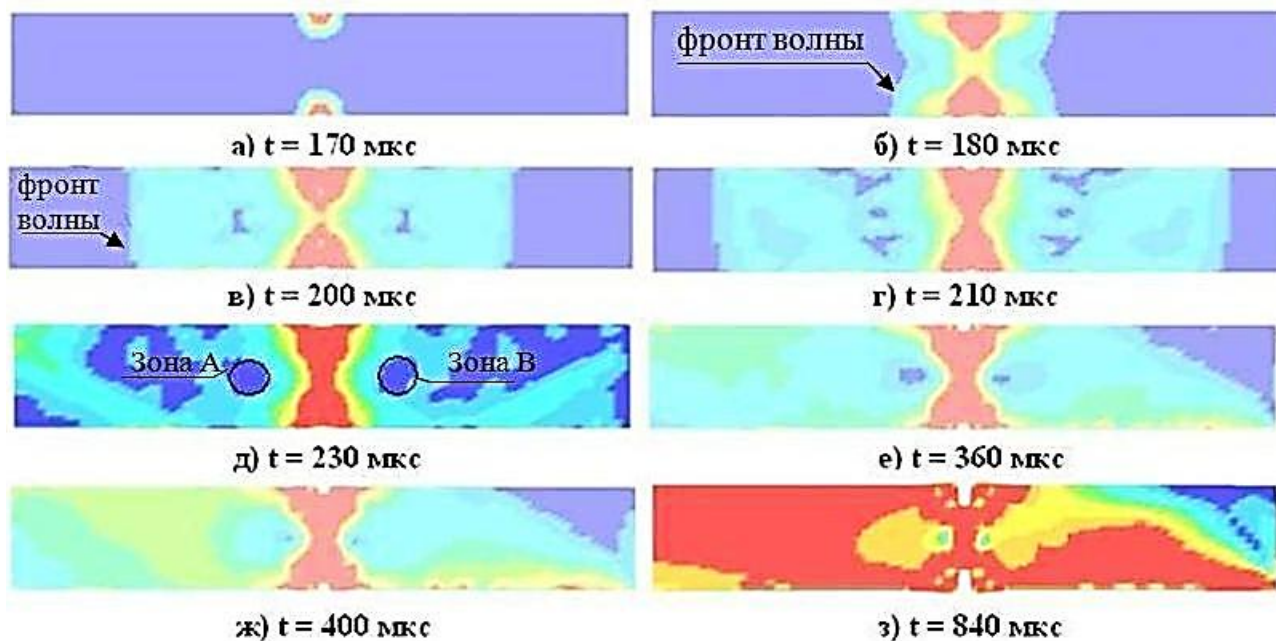


Рис. 4. Картины распределений напряжений слитка на интервале времени [0... 0,084 с]

В третьей группе численных экспериментов исследовалась резка двумя несимметричными ножами (клиновыми), отличающимися по углу профиля ножей: 15, 23 и 30 – а также полусрезная схема, где применяются дополнительные выступы на опорной поверхности ножей для формирования сдвиговых деформаций.

Расчеты показали, что для клиновидных ножей характер поля напряжений отличен от наблюдаемого в симметричных ножах. Максимальные напряжения концентрируются на боковой грани ножа и достигают существенно больших величин, чем в симметричном случае. Это подтверждает практические наблюдения о том, что клиновидные ножи подвержены изгибным деформациям.

Была проанализирована возможность исследования процесса развития сдвиговых деформаций при полусрезной схеме резки с помощью предлагаемой модели. На рис. 5 показаны этапы возникновения больших деформаций между режущими кромками ножей.

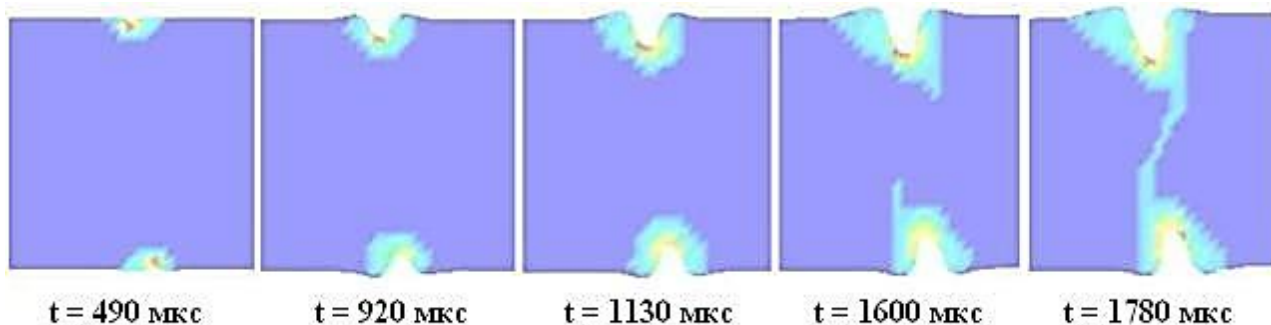


Рис. 5. Развитие деформаций в материале слитка

Как видно из рис. 5 уже при частичном внедрении ножей между ними возникает область высоких, более 40 % деформаций (светло-голубая зона), что свидетельствует о возможности развития трещин и дальнейшего сдвигового разделения материала по этой области.

ВЫВОДЫ

Предложена модель поведения объектов технологической зоны как системы, состоящей из высокопластичного слитка и твердотельных ножей, модель численно реализована на основе комбинированного метода ALE.

Одним из результатов моделирования является выявление волнового характера распространения возмущений в материале слитка при внедрении инструмента. Показана способность модели воспроизводить большие деформации и перемещения без потери устойчивости вычислительного процесса при сравнительно небольшой длительности вычислений. Модель отражает наблюдаемые на практике процесс образования приливов материала в области реза и возникновение перемычки (утонения) материала в слитке между режущими кромками ножей, что подтверждает адекватность модели.

Проведенные численные эксперименты показали особенности зависимостей НДС режущего инструмента от его геометрии. Показано различие в расположении областей максимальных напряжений для симметричных и клиновых ножей. Выявлено, что величина кинетической энергии, потребной для выполнения технологического действия, пропорциональна углу профиля ножа. Анализ поля деформаций для полусрезной схемы реза показал возникновение линии концентрации высоких деформаций уже на первоначальном этапе внедрения ножей.

Сформулированы направления дальнейших исследований: учет неоднородности механических свойств слитка по его поперечному сечению, поиск возможности учета разрушения материалов слитка одновременно с использованием комбинированного метода ALE, переход к упругопластической модели режущего инструмента (с учетом разрушения), разработка протяженных моделей слитка и заготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Импульсная резка горячего металла* / В. С. Кривцов, А. Ю. Боташев, А. Н. Застелла, С. А. Мазниченко, С. И. Планковский, В. Н. Сапрыкин. – Харьков : Нац. аэрокосм. Ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 476 с.
2. Donea J. *Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods* / J. Donea, A. Huerta, J.-P. Ponthot, A. Rodriguez-Ferran // *Encyclopedia of Computational Mechanics*. – John Wiley & Sons, 2004. – P. 1–38.
3. Хитрых Е. Е. *Математическое моделирование процессов импульсной резки непрерывных слитков*. – Международная научно-техническая конференция «Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»: Тезиси докладов. – Харьков : Национальний аэрокосмічний університет «ХАІ», 2007. – С. 74.
4. *Импульсная резка горячего металла* / Мазниченко С. А., Застела А. Н., Планковский С. И., Обрываева Т. Е., Хитрых Е. Е. // Международная научно-техническая конференция «Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности»: тезисы докладов. – Харьков : Национальный аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», 2007. – С. 66–67.
5. Кривцов В. С. *КЭ-моделирование импульсной резки непрерывных слитков (сдвиговым и клиново-сдвиговым ножами)* / В. С. Кривцов, Е. Е. Хитрых // Международная научно-техническая конференция «Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»: тезисы докладов. – Харьков : Национальний аэрокосмічний університет «ХАІ», 2008. – С. 65.

Ворожко С. С. – ассистент НАКУ «ХАИ»;

Кладова О. Ю. – канд. техн. наук, доц. НАКУ «ХАИ»;

Нарыжный А. Г. – канд. техн. наук, доц. НАКУ «ХАИ»;

Слюсаренко Т. В. – ассистент НАКУ «ХАИ».

НАКУ «ХАИ» – Национальный аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.

E-mail: OlgaKlad@gmail.com

Статья поступила в редакцию 03.04.2012 г.