

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ИМПУЛЬСНОЙ РЕЗКИ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

С учетом стремления металлургов и машиностроителей увеличить производительность металлургического оборудования, удешевить получение конечного продукта целесообразным для осуществления процесса резки является использование стальных заготовок нового оборудования, обладающего энергетическими, технологическими, конструктивными и эксплуатационными преимуществами перед существующими образцами режущих агрегатов. Ввиду этого все более актуальной становится проблема разделения заготовок на мерные части импульсными (высокоскоростными) методами, так как применяемые способы резки не позволяют обеспечить высокое качество резки таких заготовок. Импульсное разделение сортовой заготовки осуществляется с помощью машин импульсной резки (МИР), разработанных в Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» [1]. Импульсный метод резки позволяет осуществлять разделение заготовок со скоростями 25...30 м/с и обладает технологическими, экономическими и эксплуатационными преимуществами [1].

В настоящее время в области импульсной (высокоскоростной) резки выделяют несколько направлений усовершенствования процесса резки заготовок, в частности резку не только горячей, но и полугорячей и холодной заготовок, что позволяет экономить энергоресурсы и повысить конкурентоспособность мини-прокатного производства.

Кроме того, в мировой практике в связи с необходимостью применения сталей с определенными механическими свойствами для решения конкретных конструкторских задач наблюдается четкая тенденция к расширению марочного и размерного сортаментов сталей, разливаемых непрерывным способом, как наиболее дешевым при их производстве.

При холодной резке разделение заготовок происходит за счет образования трещины. Хрупкие разрушения характеризуются малой пластической деформацией, предшествующей разрушению и, следовательно, малой величиной энергии, поглощенной металлом при разрушении [2]. В этом смысле раскрой заготовок холодного металла необходимо вести таким образом, чтобы магистральная (разделяющая) трещина распространялась как хрупкая, поэтому не всегда можно обеспечить полное разделение проката. Исходя из этого в некоторых случаях раз-

деление заготовок необходимо проводить с предварительным нагревом по всей толщине. Температура оказывает определенное воздействие на все свойства материала. К свойствам, существенно зависящим от температуры, относится и вязкость разрушения. Температура влияет на вязкость разрушения не только непосредственно, но и косвенно через температурную зависимость предела текучести [2]. Исходя из этого высокоскоростная резка заготовок клиновидными ножами с предварительным нагревом является более выгодной и экономичной, такой метод обеспечит более высокое качество реза, что является важным фактором для производства.

Чтобы внедрить в производство способ импульсной резки сортовых заготовок, необходимо изучить зависимость усилия резки от параметров процесса, для этого требуется создать математическую модель процесса резки заготовок машинами импульсной резки. В настоящее время разработана модель процесса высокоскоростной резки в 2D-постановке, позволяющая определить основные энергосиловые параметры процесса, а также проанализировать влияние закона движения ножей МИР на нежелательный продольный импульс в сторону кристаллизатора МНЛЗ (т. н. «попятный» импульс). Определены поля скоростей течения металла и работа деформации при импульсной резке металла пластиноножом с клиновой заточкой [3, 4]. Усовершенствованная математическая модель будет учитывать температуру, большую номенклатуру конструкционных материалов, а также переход от 2D-модели к 3D. Модель позволит определить основные энергосиловые параметры процесса резки сортовых заготовок для изделий АКТ.

**Целью работы** является разработка усовершенствованной численной модели процессов импульсной резки сортовых заготовок из высокопрочных сталей для изделий АКТ.

Для решения поставленной задачи в работе определены основные параметры для моделирования – физико-механические свойства применяемых материалов сортовой заготовки, ее температура, геометрия ножей МИР и заготовки, масса МИР и ее составных частей, начальные скорости ножей МИР (для резки материалов с различными физико-механическими свойствами к ножам МИР необходимо подвести различное количество энергии, поэтому начальные скорости ножей МИР выбраны в качестве одного из факторов разрабатываемой модели).

**Определение температуры нагрева разрезаемой заготовки.** Нагрев металла перед резкой осуществляют в нашем случае в методических печах. Основная цель нагрева металла – повысить его пластичность и снизить сопротивление деформации [5].

Качественный нагрев металла в методической печи характеризуется следующими показателями:

1. Температура поверхности заготовки на выходе из печи соответствует заданному значению с точностью  $\pm (10...15)$  К.

2. Заготовки должны быть достаточно прогреты, чтобы перепады температур по толщине заготовок не превышали допустимых значений, величина которых составляет 20...40 К, а в местах касания заготовок с донными трубами – 50...70 К.

3. Перепады температуры по длине заготовок соответствуют принятой технологии прокатки.

4. Скорость нагрева металла от начального состояния до 500...700 С не превышает максимально допустимого значения.

Температура оказывает существенное влияние на механические свойства металлов и сплавов. Данные по физико-механическим свойствам рассматриваемых сталей при определенных температурах нагрева по всему сечению приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1 – Физические свойства материалов при различных температурах нагрева

Параметры	Температура нагрева, °С	Сталь 45 (AISI 1045)	40X (AISI 5140H)	40XФА (42CrMo)	12XH2 (15CrNi6, AISI 3115)	30XГСА (35ChGS)
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	800	–	–	7796	–	7620
	900	7598	7560	–	–	–
	1000	–	–	–	7510	–
$E$ , ГПа	800	–	–	135	–	125
	900	155	115	–	–	–
	1000	–	–	–	106	–
$\mu$		0,3	0,27	0,27	0,27	0,3

**Работа ножей импульсных машин.** Как показал анализ результатов импульсной резки горячих заготовок большой номенклатуры марок сталей и сплавов, широкого диапазона поперечных сечений квадратной, круглой и прямоугольной форм в различном физическом состоянии, в подавляющем большинстве случаев качество поверхности среза хорошее. Исследование макроструктуры показывает, что при резке отсутствуют трещины, крупные вырывы, но наблюдается значительное смещение слоев материала (рис. 1), обусловленное движением лезвия ножа в заготовке [1].

Видно, что степень деформации периферийных слоев по отношению к другим зонам – наибольшая, поскольку при внедрении ножей в заготовку эти слои увлекаются ими и смещаются к центральной зоне в результате внешнего трения при взаимодействии поверхности ножа с материалом заготовки. Вследствие такого контакта в процессе длительной эксплуатации режущие кромки ножей и их боковые грани изнашиваются.

Таблица 2 – Механические свойства материалов при определенных температурах нагрева сортовой заготовки

Параметры	Температура нагрева, °С	Сталь 45 (AISI 1045)	40X (AISI 5140H)	40XФА (42CrMo)	12XH2 (15CrNi6, AISI 3115)	30XГСА (35ChGS)
$\sigma_b$ , МПа	800	–	–	98	–	85
	900	76	69	–	–	–
	1000	–	–	–	44	–
$\sigma_m$ , МПа	800	–	–	54	–	51
	900	54	41	–	–	–
	100	–	–	–	23	–
$\delta$ , %	800	–	–	59	–	62
	900	62	65	–	–	–
	1000	–	–	–	63	–
НВ, МПа		201	167	241	207	241

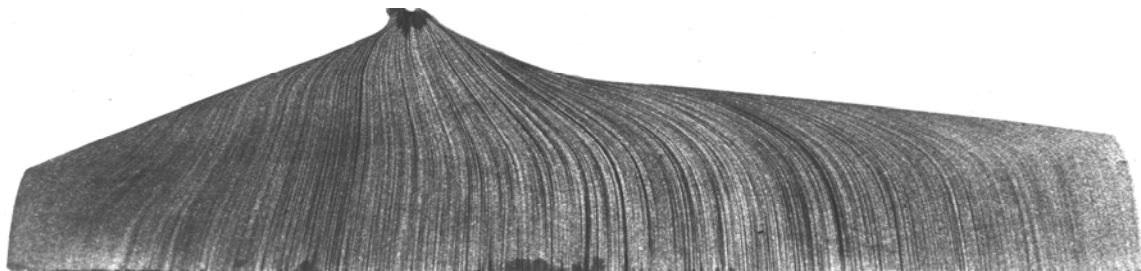


Рисунок 1 – Макроструктура среза: □160 мм, 18X2H4BA

Анализ результатов работы ножей импульсных машин в течение продолжительного времени свидетельствует об их удовлетворительной общей стойкости. В зависимости от марки материала разрезаемой заготовки и в особенности от ее температуры стойкость ножей по величине допустимого износа составляет от 5000 (700...750°С) до 40000...50000 (950...1000°С) резов [1].

**Выбор геометрических параметров клиновидного ножа.** Взаимодействие режущего агрегата импульсной машины и разрезаемых частей горячей заготовки осуществляется посредством специального инструмента – ножей необходимых форм и размеров, установленных на подвижных частях МИР.

В данной работе для решения задачи импульсной резки сортовой заготовки выбран вариант симметричных клиновидных ножей. Одним из основных параметров клиновидного лезвия ножа, определяющих усилие

резки, является ширина проекции режущей кромки на плоскость, перпендикулярную к вектору скорости. Условие минимума работы, расходуемой на разрезку заготовки, предполагает применение ножей с кромкой как можно меньшей ширины. Однако в противоречие с этим требованием входит условие прочности ножа, определяющее надежность его работы. Таким образом, при выборе ширины режущей кромки ножа, равной  $2a$  (рис. 2), необходимо соблюдать условие прочности, которое можно записать в виде

$$2\sigma_{сн} k_v \frac{1}{h} \sqrt{\frac{h^2 + 4a^2}{3}} < [\sigma_{сж}] < \sigma_B. \quad (1)$$

Установлены оптимальная форма и размеры режущей кромки ножей, углы заточки и наклона боковых граней, размеры корневой части ножа (рис. 3).

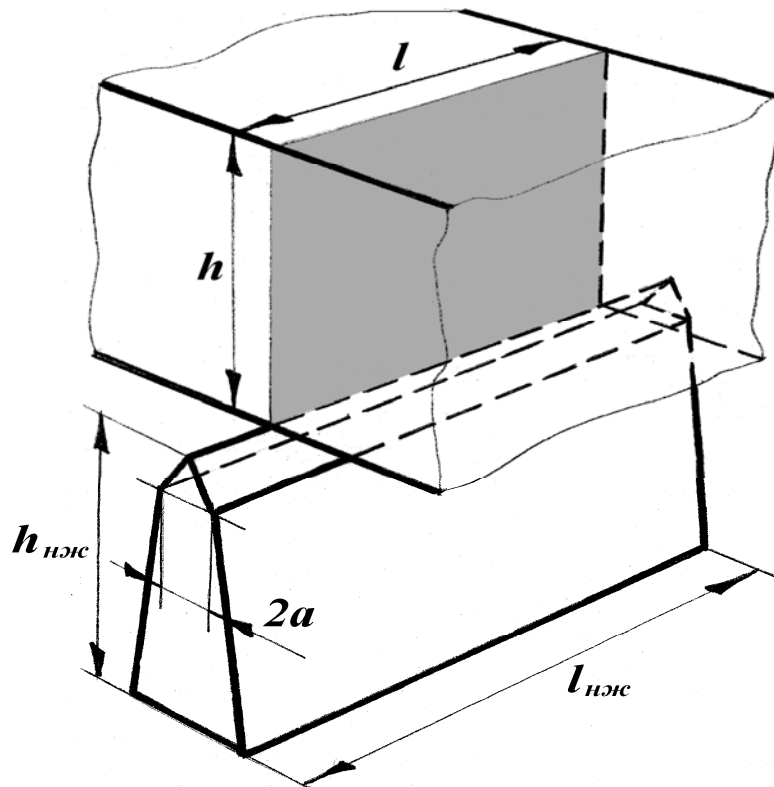


Рисунок 2 – Параметрическая схема ножа МИР

Размеры высоты лезвий на бойке  $h_{нж.б}$  и корпусе  $h_{нж.к}$  подчиняются соотношению подвижных частей режущего агрегата, а также закону сохранения импульса пути. Таким образом,

$$\frac{h_{нж.б}}{h_{нж.к}} = \zeta; \quad h_{нж.б} + h_{нж.к} = h.$$

**Определение работы деформирования.** Для резки материалов с различными физико-механическими свойствами к ножам МИР необходимо подвести различное количество энергии. На основе исходных дан-

ных о разрезаемой заготовке (физико-механические свойства применяемых материалов сортовой заготовки, ее температура, геометрия ножей МИР и заготовки, масса МИР и ее составных частей) необходимую работу можно определить с помощью графика, приведенного в работе [1]. На графике, данные для построения которого получены в процессе экспериментально-статистических исследований, имеются две зоны зависимости удельной энергии деформирования в джоулях на один квадратный сантиметр сечения горячих заготовок от их температуры.

Зная температуру ( $t$ , °С) заготовки при резке и площадь ее поперечного сечения в месте реза ( $см^2$ ), по найденному из графика значению удельной энергии ( $E_{y\partial}$ , Дж/ $см^2$ ) определяем исходную величину энергии цикла привода МИР (кДж) для квадратной заготовки  $E_{исх} = E_{y\partial} \cdot h \cdot \ell \cdot 10^{-3}$  (табл. 3) [1].

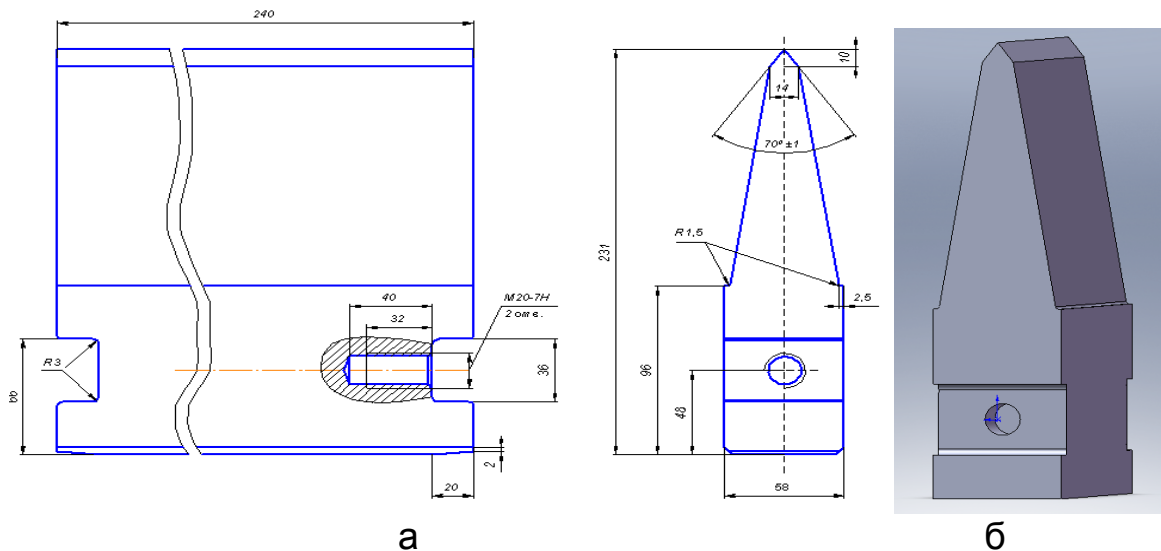


Рисунок 3 – Чертеж (а) и 3D-модель (б) унифицированного ножа для резки квадратных заготовок 160x160, 200x200, 240x240 мм с углом клиновидности 70 (5ХВ2С)

Таблица 3 – Потребная энергия на полное разделение сортовой заготовки квадратного сечения

Марка стали	Потребная энергия, Дж		
	□160 мм	□200 мм	□240 мм
Сталь 45	134,4	210	302
40Х	158,1	247	355,7
40ХФА	149,5	233,6	336,4
12ХН2	83,8	131	188,6
30ХГСА	157	245,5	353,5

**Определение начальных скоростей ножей МИР.** Поскольку разрезаемые материалы обладают конкретными физико-механическими свойствами, то для их разделения к ножам МИР необходимо подвести разное количество энергии, т. е. их начальные скорости будут различны.

Поскольку массы подвижных элементов МИР являются постоянными величинами, то значение скорости верхнего ножа определяется из соотношения (чтобы исключить возможную передачу составляющих усилия резки через заготовку и осуществить полный разрез, начальная скорость нижнего ножа задается больше начальной скорости верхнего):

$$V_{\text{в}} = \frac{1}{\zeta} \cdot V_{\text{н}}, \quad (2)$$

где  $\zeta = \frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{б}}} = 3,3$ .

Скорости ножей определяют работу, требуемую для полного разделения заготовки. Эти данные будут использованы при задании краевых условий для математической модели.

Значения начальных скоростей ножей МИР для каждого материала сведем в таблицу (табл.4).

Таблица 4 – Начальные скорости ножей МИР в зависимости от материала и сечения сортовой заготовки

Материал заготовки	Скорость нижнего ножа $v_{\text{н}}$ , м/с	Скорость верхнего ножа $v_{\text{в}}$ , м/с	Скорость нижнего ножа $v_{\text{н}}$ , м/с	Скорость верхнего ножа $v_{\text{в}}$ , м/с	Скорость нижнего ножа $v_{\text{н}}$ , м/с	Скорость верхнего ножа $v_{\text{в}}$ , м/с
	□ 160 мм		□ 200 мм		□ 240 мм	
Сталь 45 (AISI 1045)	18,2	5,5	22,8	6,9	27,3	8,3
40X (AISI5140H)	19,7	5,9	24,7	7,4	29,6	8,9
40XФА (42CrMo)	19,2	5,8	24	7,2	28,8	8,7
12XH2 (AISI 3115)	14,4	4,4	18	5,4	21,6	6,5
30XГСА (30HGS)	19,7	5,9	24,6	7,5	29,5	8,9

**Математическая модель процесса импульсной резки сортовой заготовки.** Для решения поставленной задачи было принято решение разработать 3D-модель. При моделировании приняты следующие допущения:

- ножи МИР – абсолютно жесткие (недеформируемые) тела;
- массы ножей приведены к соответствующим справочным точкам;
- задача решена в трехмерной постановке.

Поскольку сортовая заготовка имеет различную длину (до 20 м), то моделировать ее целиком нецелесообразно, при моделировании рассматривается участок заготовки длиной 500 мм.

Для резки сортовой заготовки принимаем следующие граничные условия (рис. 4). Для задания инерционных свойств ножей используют точечные массы, размещаемые, как правило, в справочных точках (reference point), присвоенных соответствующим телам.

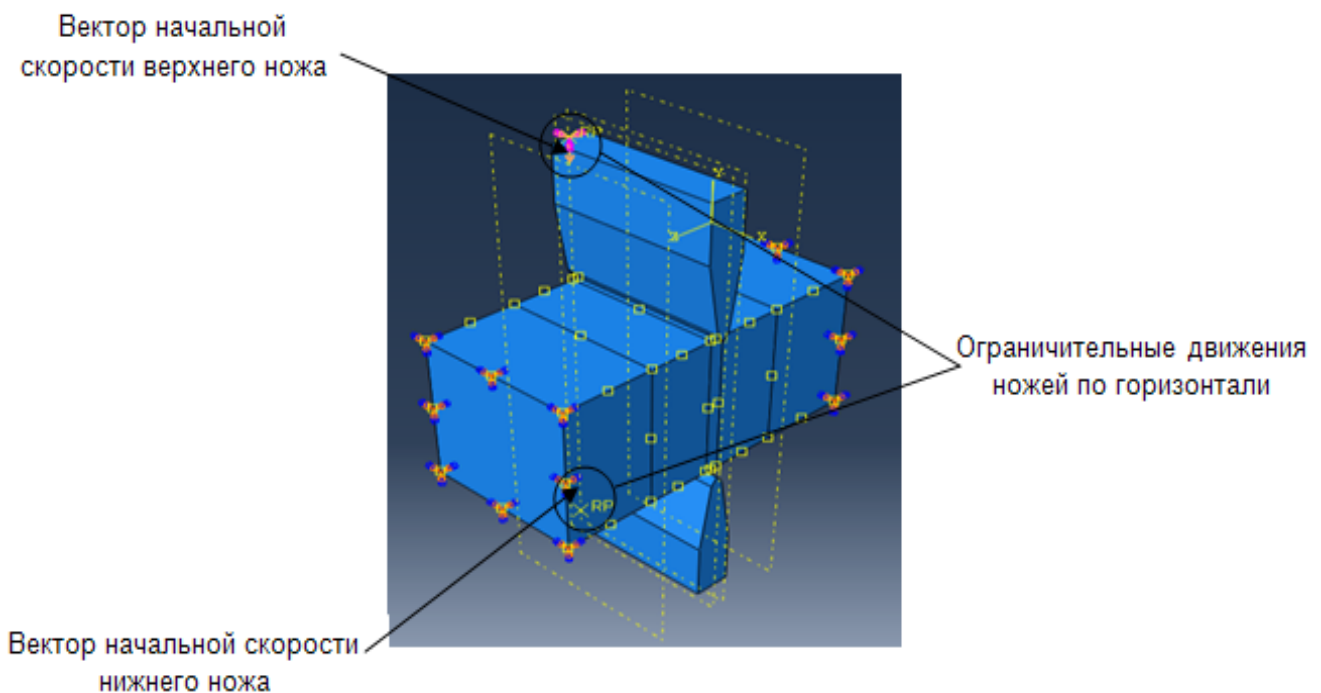


Рисунок 4 – Граничные условия для модели процесса импульсной резки

Свойства материалов в МКЭ-системе Abaqus CAE задаются в табличной форме в специализированном модуле Material. Для решения задач разрушения, таких, как импульсная резка, в программном пакете необходимо задать параметры разрушения материала. Для процессов, характеризующихся высокими скоростями деформации, целесообразно использовать модель материала и модель разрушения по Джонсону – Куку.

Разработанная модель (рис. 5) позволяет определить:

- напряженно-деформированное состояние разрезаемой заготовки;
- работу деформирования;
- усилие резки.



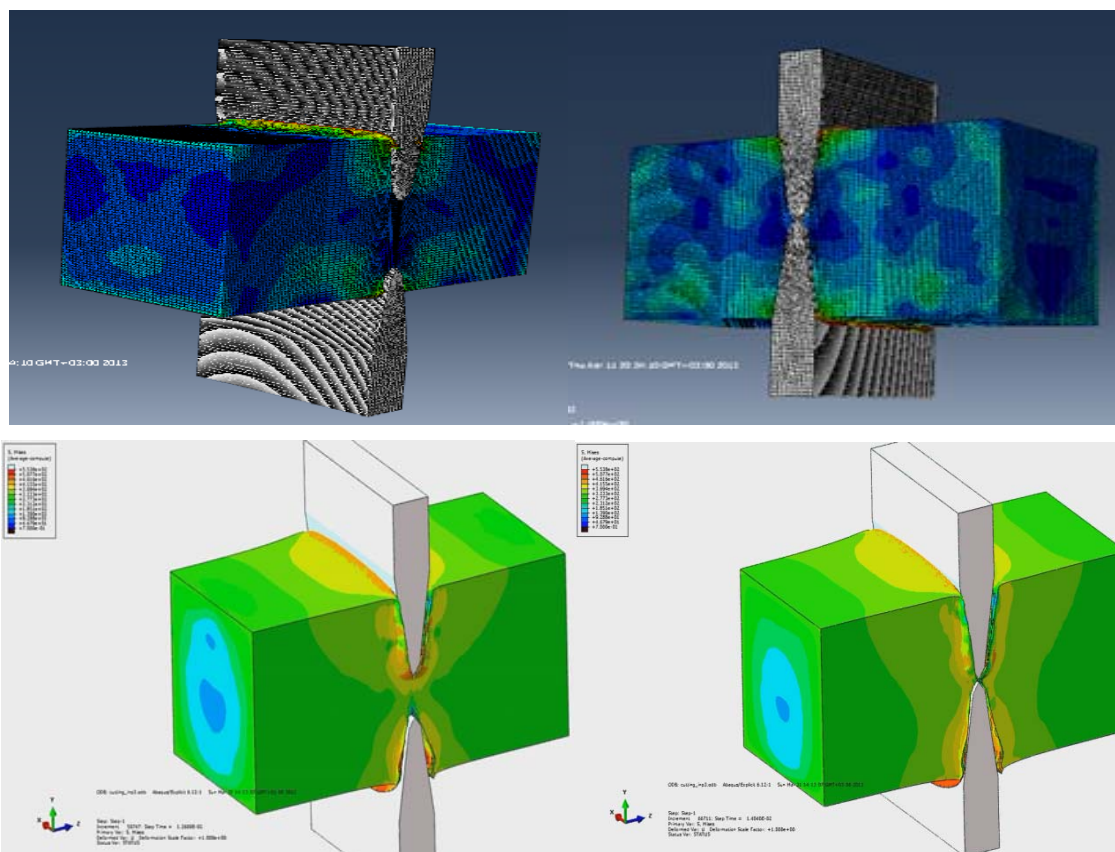


Рисунок 5 – Результаты моделирования

## Выводы

Обоснованы и определены исходные параметры, необходимые при создании численных моделей процессов импульсной резки сортовых заготовок из высокопрочных сталей, а именно:

1. Физико-механические свойства пяти высокопрочных сталей (Сталь 45, 40X, 40XФА, 12ХН2, 30ХГСА) при определенных температурах нагрева.

2. Геометрические характеристики унифицированного режущего инструмента для сортовых заготовок сечений 160x160, 200x200, 240x240 мм.

3. Значения необходимой энергии для полного разделения заготовок.

4. Начальные скорости ножей МИР в диапазоне от 5 до 30 м/с. Скорости ножей определяют работу, требуемую для полного разделения заготовки. Эти данные использованы при задании краевых условий для математической модели.

5. Разработана трехмерная математическая модель процесса импульсной резки сортовой заготовки из различных материалов, с помощью которой определены основные энергосиловые параметры процесса резки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Импульсная резка горячего металла [Текст] / В.С. Кривцов, А.Ю. Боташев, А.Н. Застела и др. // – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 476 с.

2. Садовский, А.О. Обзор исследований явления перехода металла от вязкого разрушения к хрупкому и анализ факторов, влияющих на его осуществление [Текст] : отчет о поисковой НИР. Ч. 1. – Х., 1984. – 126 с.

3. Ходько, Ф.О. Розробка математичної моделі процесу імпульсного різання неперервних злитків з авіаційних матеріалів клиновидними ножами [Текст]: дипломная работа. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – 176 с.

4. Мельник, В.К. Определение поля скоростей течения металла и работы деформации при импульсной резке металла пластиной-ножом с клиновой заточкой [Текст] / В. К. Мельник, С. Ф. Мещеряков // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Х.: Изд-во ХГУ. 1968. – Вып 2. – С. 18 – 21.

5. Поливанчук, А.С. Исследование переходного процесса нагрева заготовок в методической печи и разработка системы автоматического управления [Электронный ресурс] / А.С. Поливанчук. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2012/fkita/polivanchuk/diss/index.htm>

*Поступила в редакцию 15.05.2013.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Планковский,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*