



## Конечно-элементная модель электронно-лучевой пайки твердосплавных режущих элементов к оправке

Г.Г. Горанский<sup>1</sup>, А.И. Поболь<sup>2</sup>

### АННОТАЦИЯ:

Созданы обобщенные конечно-элементные (КЭ) модели электронно-лучевой обработки (ЭЛО) поверхностей для материалов с существенно отличающимися теплофизическими свойствами, позволяющие производить расчет и оптимизацию режимов процесса. Для изделий разной геометрии, учитывая термодинамику процесса и температурные зависимости свойств материалов, управляя геометрией электронного пучка и циклограммой процесса, оптимизированы диапазоны энергетических параметров ЭЛО. КЭ моделирование нагрева поверхности при ЭЛО проведено для детали плоской формы стационарным источником со сканирующей разверткой, а также при воздействии в режиме линейного перемещения луча без сканирующей развертки. Для оптимизации электронно-лучевого оплавления при пайке предложена термодинамическая КЭ модель, учитывающая геометрические особенности резцовых вставок и теплофизические свойства составляющих их материалов. Показано, что учет температурной зависимости теплофизических свойств материалов позволяет реализовывать схемы ЭЛО с меньшей продолжительностью воздействия пучка большей мощности.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

конечно-элементная модель; электронно-лучевая обработка; твердосплавный инструмент

## 1. Введение

В строительной индустрии Беларуси и за рубежом для заготовительных, формообразующих и отделочных операций при изготовлении полуфабрикатов и изделий из гранита, мрамора и других каменных пород широко используются инструменты, в которых твердосплавные режущие элементы крепятся к державкам методом электронно-лучевой (ЭЛ) пайки. Определение оптимальных режимов и схем электронно-лучевой обработки (ЭЛО) твердосплавных элементов, обеспечивающих сохранение исходной структуры материала и высоких механических свойств по всему макрообъему изделий, различающихся формой и размером, является актуальной научной и прикладной задачей. Эмпирический поиск рациональных технологических схем и режимов ЭЛО с целью сокращения времени, материальных и трудовых затрат целесообразно предварить разработкой модели процесса.

Целью работы является создание обобщенной конечно-элементной модели процесса ЭЛО, которая, благодаря учету температурных зависимостей свойств обрабатываемых материалов, позволит для деталей разной геометрии, корректируя циклограмму процесса, оптимизировать энергетические параметры электронного пучка при пайке, термообработке без оплавления, а также при обработке с оплавлением поверхности.

<sup>1</sup> ГП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», эл. почта: georggoran@rambler.ru, orcid id: 0000-0001-8883-1201

<sup>2</sup> ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», эл. почта: alex.pobol@gmail.com, orcid id: 0000-0002-8426-8252

## 2. Методика ЭЛО поверхности металла

Для исследований методов ЭЛО образцов материалов в режимах закалки поверхности, пайки, наплавки, обработки покрытий использовалась установка на базе энергоблока ЭЛА-15 (рис. 1). Рабочая камера установки ЭЛО выполнена из нержавеющей стали. Характеристики оборудования представлены в таблице 1.



Рис. 1. Электронно-лучевое оборудование

Таблица 1

Параметры установки

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение [кВ]	60
Максимальная мощность в луче [кВт]	15
Диапазон изменения тока луча [мА]	1-250
Диапазон изменения тока фокусировки [мА]	400-1000
Внутренние габаритные размеры вакуумной камеры (диаметр × длина) [мм]	1350 × 2500
Уровень вакуума в рабочей камере [Па]	$3 \times 10^{-3}$

Высокий вакуум (порядка  $10^{-2}$  Па) в рабочей камере установки создается диффузионным насосом АВП 400. Между рабочей камерой и диффузионным насосом установлена азотная ловушка ДУ-400.

Система управления электронным лучом позволяет реализовывать ЭЛ воздействие на материалы в режимах точечного нагрева с высокой плотностью энергии (до  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>), нагрева расфокусированным лучом, линейного перемещения луча без сканирующей развертки, сканирования луча по заданной траектории.

## 3. Методика конечно-элементного моделирования процесса ЭЛО

Для моделирования влияния высокоэнергетического воздействия на структуру обрабатываемой детали выбран метод термодинамического конечно-элементного анализа. Поставлена задача моделирования условий, наиболее близких к реальным процессам, происходящих при электронно-лучевой обработке поверхности без оплавления. За основу взяты данные, полученные экспериментальным путем. Изначально считалось, что вся энергия луча тратится на нагрев, а затем при пересчете, для корректировки результата, применялся коэффициент, учитывающий особенности взаимодействия луча с поверхностью детали.

При моделировании сделан ряд допущений:

- энергия, затрачиваемая и высвобождаемая во время фазовых переходов в материалах, во время нагрева и охлаждения не учитывалась;

- пучок электронов представлялся как равномерный тепловой поток ко всей обрабатываемой поверхности, т.е. допускалось идеально равномерное сканирование всей обрабатываемой зоны;
- влиянием излучения нагретой детали и теплопередачи в оснастку благодаря теплопроводности по причине быстрого протекания процесса решено пренебречь.

Исследования эффективности ЭЛ нагрева экспериментальных образцов из стали У8 выполнялись с применением различной плотности энергии электронного пучка (таблица 2). В центре образца с размерами 30х30х20 мм зачеканивалась хромель-алюмелевая термопара, значения температуры записывались с помощью шлейфового осциллографа. Электронный луч диаметром 1 мм разворачивался в зону нагрева прямоугольной формы. Тепловой поток направлялся на центральную область образца размерами 10х10 мм<sup>2</sup>. Мощность и плотность энергии ЭЛ нагрева регулировалась изменением тока луча.

**Таблица 2**

Режимы ЭЛ обработки экспериментальных образцов из стали У8

№ кривой	1	2	3	4
$q_{эл}$ [Вт/см <sup>2</sup> ]	848	1357	1683	2255
$t_n$ [с]	14,0	10,0	6,0	2,4

Удельная мощность  $q_{эл}$  воздействия рассчитывалась из зависимости  $q_{эл} = U \cdot I / F$ , где:  $U$  – ускоряющее напряжение в ЭЛ пушке (использовалось постоянное значение, равное 60 кВ),  $I$  – ток луча,  $F$  – площадь нагрева на поверхности образца.

Теплофизические свойства стали У8, заложенные в модель, приведены в таблице 3. Время воздействия соответствовало экспериментальным значениям в соответствии с таблицей 2.

**Таблица 3**

Теплофизические свойства стали У8

Температура [°С]	Коэффициент теплопроводности [Вт/(м·°С)]	Плотность [кг/м <sup>3</sup> ]	Удельная теплоемкость [Дж/(кг·°С)]
20	53	7839	452
100	49	7817	477
200	46	7786	511
300	42	7752	528
400	38	7714	548
500	35	7676	565
600	33	7638	594
700	30	7600	624
800	24	7552	724

Удельная мощность потока подбиралась так, чтобы график изменения температуры, полученный КЭ моделированием максимально совпал с экспериментальным. Внимание уделялось как конечной температуре образца, являющейся показателем количества энергии, поступившей в образец, так и максимальной температуре нагрева образца.

В результате расчетов получены диаграммы распределения температур в различные моменты времени (рис. 2). Очевидно значительное влияние геометрии обрабатываемой детали и продолжительности воздействия на характер распространения тепла.

Совмещенные графики температур экспериментальных образцов и результатов конечно-элементного (КЭ) моделирования представлены на рисунке 3. Цифрами со штрихами обозначены смоделированные кривые. Неполное соответствие экспериментальных и расчетных данных объясняется следующими причинами:

- усредненным значением площади облучаемой поверхности в модели (в реальных экспериментах площадь находилась в диапазоне 0,7-1,1 см<sup>2</sup>);
- наличием потери энергии излучения с поверхности нагреваемого тела в реальных экспериментах, не учитываемого при моделировании;
- некоторым несоответствиям реальным используемым в модели теплофизическим свойствам.

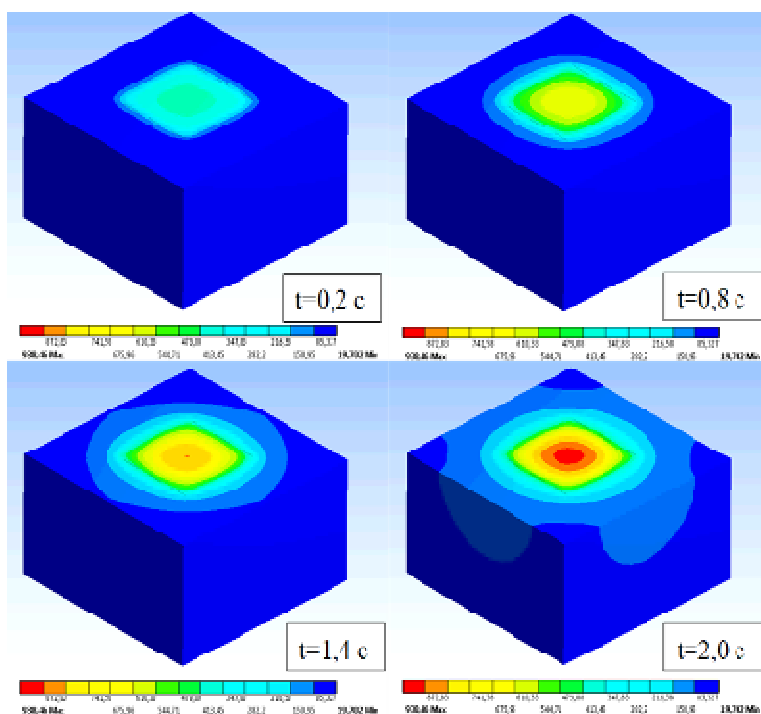


Рис. 2. Полученные КЭ моделированием диаграммы распределения температур в различные моменты времени

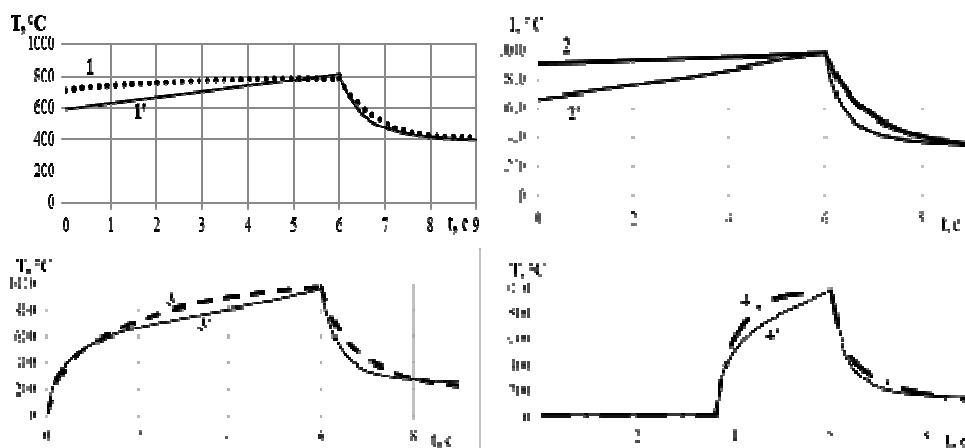


Рис. 3. Совмещенные графики температур экспериментальных образцов и результатов КЭ моделирования

Максимальное расхождение в 240°C наблюдалось для участка нагрева между кривыми 2 и 2'. Расхождения экспериментальных и моделируемых кривых на участках максимальных и установившихся температур не превысило 35°C, что составило 14% от экспериментальных значений.

На рисунке 4 представлен график зависимости эффективной удельной тепловой мощности от затраченной. Учитывая погрешность расчетов и измерений, зависимость можно считать линейной. Пересчет можно проводить, пользуясь уравнением для линии тренда:

$$Q_{\text{уд.зат.}} = 3,1 \times Q_{\text{уд.эфф.}} - 672$$

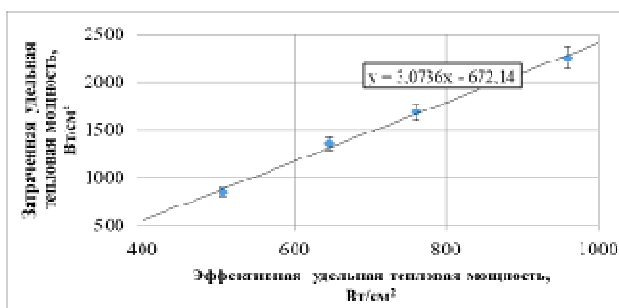


Рис. 4. Соотношение эффективной и затраченной удельных тепловых мощностей

Разработанная методика моделирования использована для расчета приближенных энергетических параметров процесса ЭЛ обработки: его режимов и циклограмм.

#### 4. Моделирование ЭЛО поверхности модельного слоистого материала с существенно различающимися теплофизическими свойствами

Конечно-элементное моделирование ЭЛО поверхности выполнено для покрытия из стали 08X19N10T на подложку из чугуна ВЧШГ. Геометрическая модель представлена двухслойным параллелепипедом размерами 20x20x6 мм с толщиной поверхностного слоя 1 мм. КЭ – модель (рис. 5а) состоит из элементов типа тетраэдр. Слой материала подложки из ВЧШГ представлен 2000 элементами и 2646 узлами, слой покрытия из 08X19N10T имеет 3200 элементов и 5043 узла, в дальнейшем в процессе расчета проводилось измельчение сетки КЭ в объемах, где обнаруживался значительный градиент температур. Использован движущийся со скоростью 10 мм/с объемный источник тепла Голдака (рис. 5б), описываемый двойным эллипсоидом, с равномерно распределенной мощностью в объемном пятне диаметром 5 мм и глубиной 50 мкм.

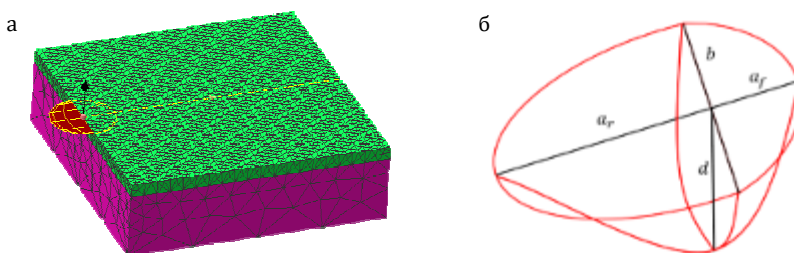


Рис. 5. КЭ модель покрытия 08X19N10T на подложке из ВЧШГ (а) и форма представления источника Голдака (б)

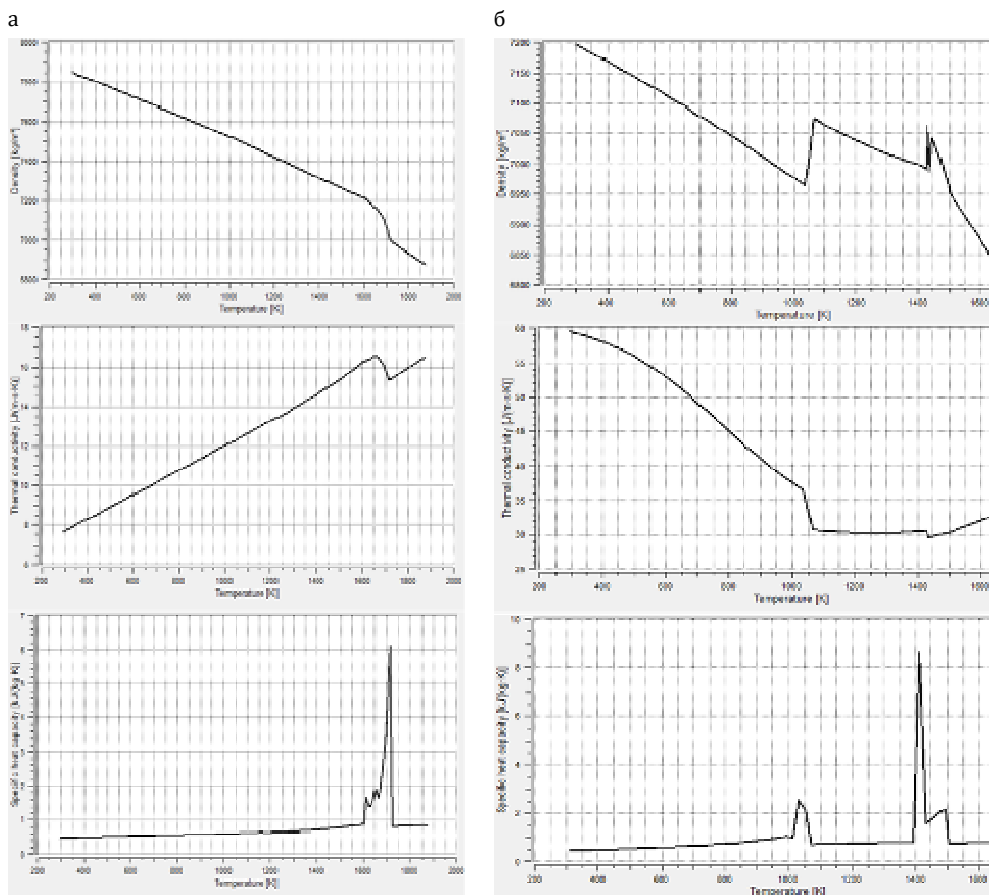
Удельная мощность варьировалась в диапазоне  $10^3 - 5 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Диапазон удельной мощности выбран, исходя из литературных данных, а также из соображений, что снижен-

ные значения теплопроводности нержавеющей стали будут способствовать повышению кинетики нагрева и, тем самым, снижению необходимой удельной мощности.

Физические свойства материалов (рис. 6) рассчитаны согласно [1-4]. Учтено, что материал покрытия имеет приблизительно вдвое сниженные значения теплопроводности [5]. В результате проведения термодинамического расчета получены распределения полей температур в различные моменты времени (рис. 7). Полезная мощность пересчитывалась с применением ранее описанной методики, разработанной при моделировании теплового воздействия ЭЛ нагрева. Учитывая геометрические ограничения модели и краевые эффекты областью образца, наиболее адекватно отражающей термические условия воздействия ЭЛО, является геометрический центр его поверхности.

На рисунке 8 показано сечение четверти модели, отражающее распределение пиковых температур в геометрическом центре образца при удельной мощности  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup> и  $2 \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>.

Исходя из результатов расчетов, при воздействии на исследуемую композицию энергией с удельной мощностью  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup> поверхность образца достигает температур плавления только в некоторых отдельных зонах, тогда как при воздействии удельной мощностью  $2 \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> происходит перегрев поверхности и возможно кипение расплавленного покрытия с нарушением гладкости поверхностного слоя.



**Рис. 6.** Расчетные зависимости плотности (density), теплопроводности (thermal conductivity) и теплоемкости (specific heat capacity) в зависимости от температуры для 08X19H10T (а) и ВЧШГ (б)

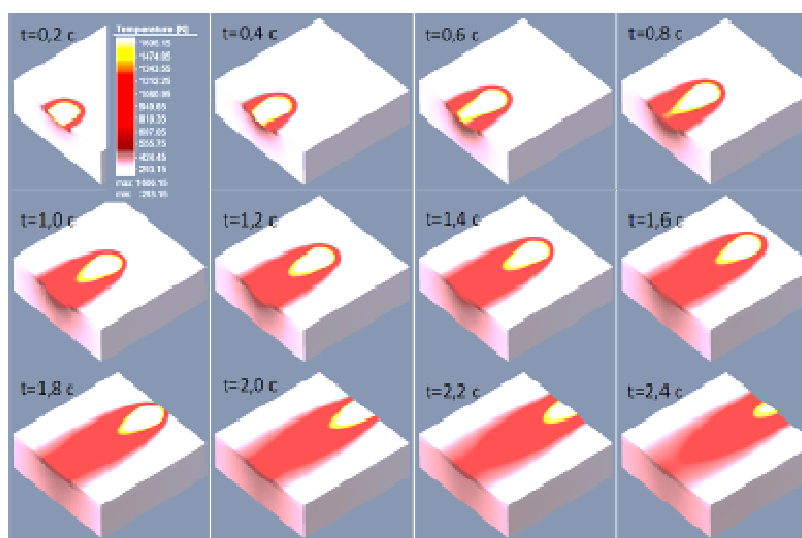


Рис. 7. Распределение полей температур в различные моменты времени

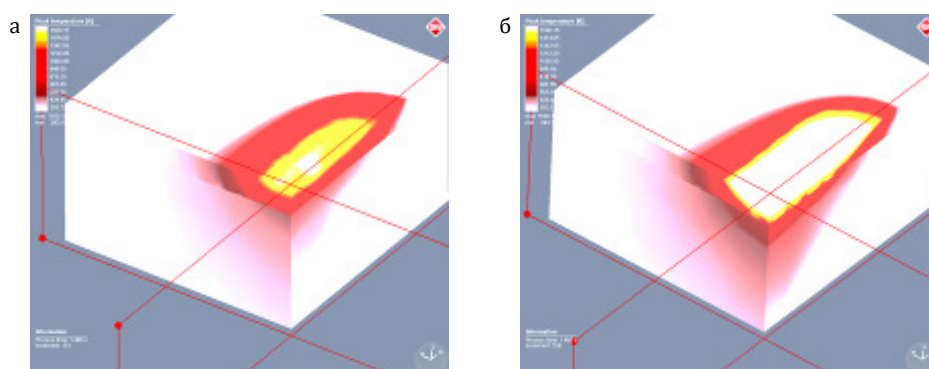


Рис. 8. Сечение четверти модели, показывающее распределение пиковых температур в геометрическом центре образца при удельной мощности: а)  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup>; б)  $2 \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>

КЭ модель позволила определить, что рекомендуемые в [6] режимы для зонной очистки поверхности отличаются от расчетных почти на порядок. Благодаря ей выявлен узкий диапазон параметров ЭЛ воздействия ( $10^3 - 1,5 \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>), позволяющий оплавить приповерхностную зону исследуемого материала без существенного огрубления морфологии поверхности в результате перегрева материала. Это позволяет уменьшить число экспериментов, необходимых для поиска рациональных режимов воздействия.

Выявленные особенности ЭЛО модельной композиции материалов с существенно отличающимися теплофизическими свойствами позволили рассчитывать режимы ЭЛО и для твердых сплавов.

## 5. Моделирование процесса электронно-лучевой пайки твердосплавных пластин к оправке с использованием высокотемпературного припоя

Процесс пайки с использованием ЭЛО применительно к инструменту представляет собой визуально контролируемый процесс нагрева соединяемых элементов (оправки,

инструментальных материалов и припоя) расфокусированным пучком электронов с целью нагрева ее до температуры, достаточной для расплавления тугоплавкого припоя, но не превышающей температур, приводящих к деградации свойств соединяемых материалов. Благодаря возможности строгой локализации ЭЛ нагрева и ввода требуемого количества тепла процесс пайки реализуется с высокой скоростью (десятки-сотни градусов в секунду) за промежутки времени порядка 1-60 с. В этой связи возможные температурные интервалы нагрева расширяются, а риск деградации свойств твердых сплавов в случае их кратковременного перегрева снижается.

Задачей является минимизация продолжительности и интенсивности теплового воздействия на твердосплавные материалы с целью исключения структурных и фазовых превращений в твердосплавных материалах, а также исключения больших градиентов напряжений в паяном соединении. Известно, что большинство материалов имеют значения теплопроводности, зависящие от температуры. Использование температурного диапазона с наибольшей теплопроводностью для исследуемого материала позволит добиться максимальной скорости нагрева, что повысит эффективность тепловложения и производительность технологического процесса.

С целью изучения рациональных путей оптимизации ЭЛО при пайке разработана термодинамическая КЭ модель. Она представлена усеченным цилиндром диаметром 10 мм и длиной 25 мм (для описания геометрии материала оправки), ромбовидной пластиной размерами 8x6x1,5 мм (твердый сплав) и прослойкой толщиной 0,25 мм, представляющей материал припоя. Установлены теплофизические свойства, соответствующие исследуемым материалам. Задан поверхностный источник тепла в виде круга с равномерным распределением мощности по поверхности.

В качестве материала оправки взяты (как наиболее часто используемые) низкоуглеродистые стали: сталь 20 и сталь 45 (рис. 9). Расчет их свойств производился по описанной выше методике.

В дальнейшем в результатах расчетов в качестве примера приведены результаты для стали 20, как имеющей большие значения теплопроводности при комнатной температуре.

Базовым является метод, при котором расфокусированный пучок электронов диаметром 5 мм воздействует на центральную часть оправки, а мощность постоянно регулируется оператором в диапазоне 300-1200 Вт до наступления момента расплавления припоя. При этом процесс пайки занимает 40-60 с. Возможно снижение величины максимальной мощности, что снизит требования к качеству контроля за процессом оператором, но увеличит длительность операции.

Выбраны пути оптимизации процесса ЭЛ пайки варьированием следующих параметров:

- размером и областью воздействия;
- мощностью и продолжительностью воздействия.

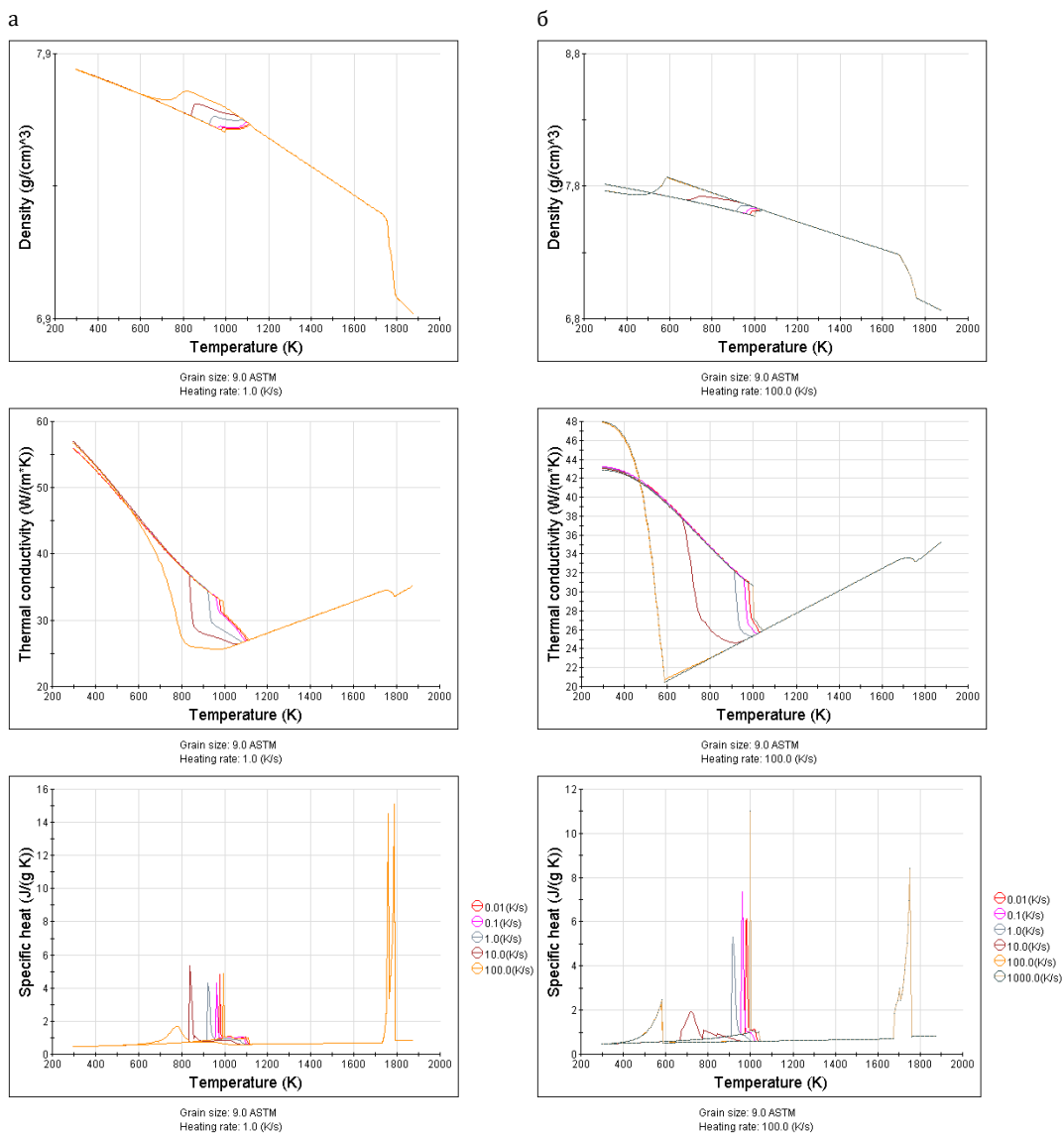
Анализ результатов моделирования (рис. 10) показал, что:

- ЭЛ воздействие на зону, приближенную к зоне пайки, приводит к большим температурным градиентам, а тепло не успевает распространиться на всю зону контакта припоя с режущей вставкой (а);
- конфигурация оправки с открытым пазом (б) более выгодна с точки зрения равномерности распределения тепла в процессе пайки по сравнению с оправкой без паза (в);
- уменьшение диаметра пятна источника нагрева приводит к существенному возрастанию тепловых градиентов (г).

Исходя из вышеприведенных результатов, можно сделать вывод, что при ЭЛ пайке с целью получения меньших температурных градиентов следует:

- максимально возможно увеличивать площадь ЭЛ воздействия расфокусированным пучком электронов;
- нагрев осуществлять с края оправки, удаленного от места пайки;
- выбирать геометрию заготовки таким образом, чтобы минимизировать число концентраторов тепловых потоков.



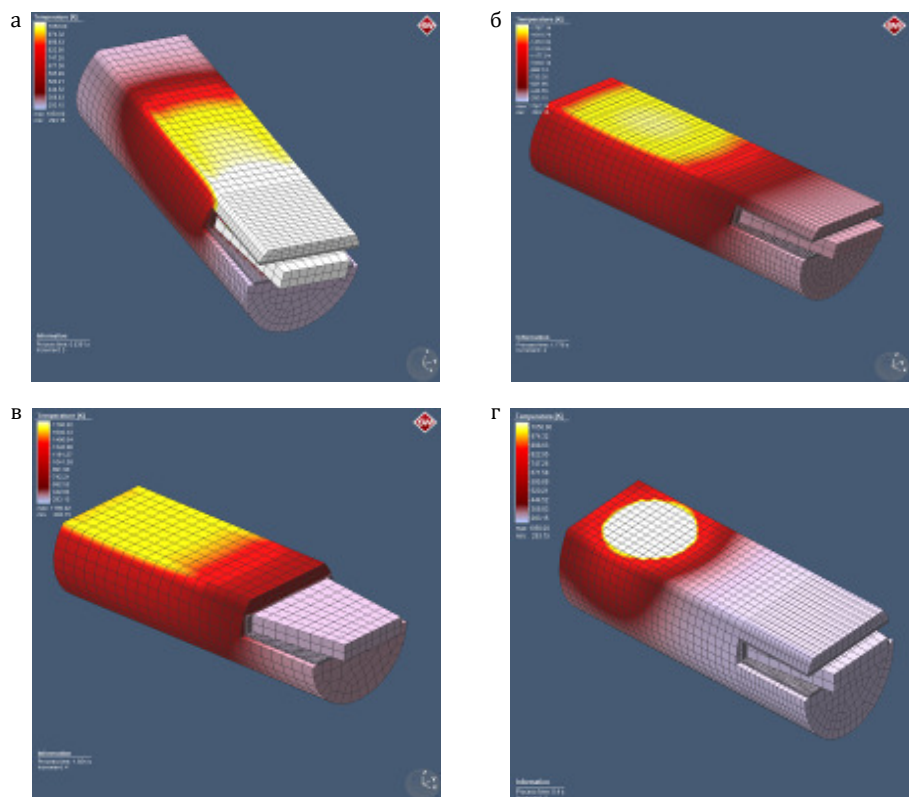


**Рис. 9.** Расчетные значения плотности (density), теплопроводности (thermal conductivity) и теплоемкости (specific heat capacity) в зависимости от температуры для стали 20 (а) и стали 45 (б)

Расчет тепловых полей при различных циклограммах теплового воздействия (рис. 11) показывает, что:

- при воздействии пучком мощностью 300 Вт в течение 40 с происходит равномерный нагрев зоны пайки до температур плавления припоя, в зоне непосредственного ЭЛ воздействия оплавления не происходит (а);
- при воздействии пучком мощностью 700 Вт в течение 10 с при достижении температуры в зоне ЭЛ воздействия значений, близких к температуре плавления стали, в некоторой отдаленной области зоны пайки температура не достигает температуры плавления припоя (б);

- при предварительном подогреве мощностью 300 Вт в течение 20 с и последующем воздействии пучком мощностью 700 Вт в течение 4 с весь объем припоя не достигнет температуры плавления (в);
- при начальном интенсивном нагреве мощностью 700 Вт в течение 8 с и последующем воздействии пучком мощностью 300 Вт в течение 20 с весь объем припоя будет расплавлен (г).

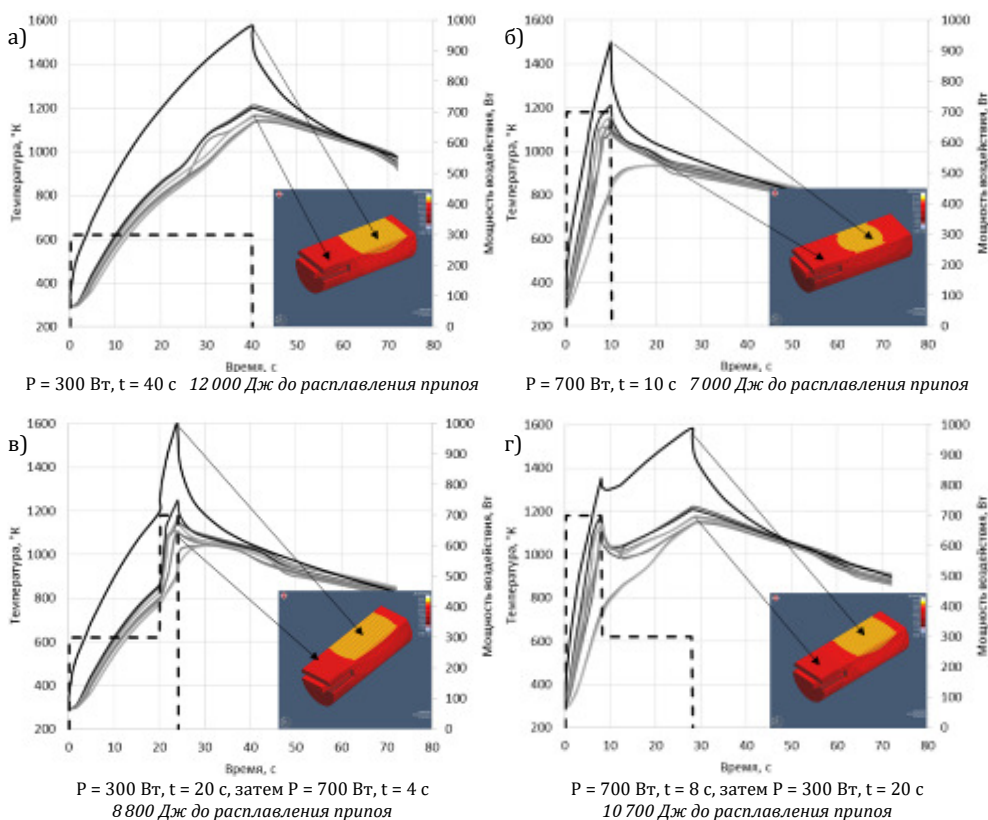


**Рис. 10.** Распределение тепловых полей в модели электронно-лучевой пайки оправки режущего инструмента при различных размерах и областях воздействия источника тепла: а) воздействие на участок, близлежащий к паяемому соединению; б) воздействие на заднюю часть оправки; в) модель оправки без открытого паза; г) воздействие пучком диаметром 5 мм

При расчете режимов ЭЛ воздействия важно учитывать, что теплофизические свойства материалов меняются с температурой.

Варьирование продолжительностью и интенсивностью теплового воздействия позволяет находить оптимальные режимы пайки. Проведение процесса пайки по варианту (г) позволяет на 37% снизить продолжительность процесса и на 10% снизить количество затрачиваемой энергии.

С учетом зависимости теплофизических свойств материалов от температуры реализованы схемы ЭЛО, позволяющие вводить большую мощность пучка при меньшей продолжительности его воздействия. Выявленные особенности нагрева резцовых оправок и полученные с помощью моделирования режимы ЭЛО использованы при изготовлении опытных партий режущего инструмента.



**Рис. 11.** Температуры в зонах непосредственного ЭЛ воздействия (верхние графики) и зонах пайки (нижние графики) при различных циклограммах (пунктирная линия) теплового воздействия ( $P$  – мощность,  $t$  – продолжительность)

## 6. Выводы

Обобщенные КЭ модели ЭЛО поверхностей для материалов с существенно отличающимися теплофизическими свойствами позволяют производить расчет и оптимизацию режимов. Для изделий разной геометрии, учитывая термодинамику процесса и температурные зависимости свойств материалов, управляя геометрией электронного пучка и циклограммой процесса, оптимизированы диапазоны энергетических параметров электронно-лучевых пайки, термообработки без оплавления, обработки поверхности с оплавлением. КЭ и экспериментальное моделирование нагрева поверхности при ЭЛО проведено для детали плоской формы стационарным источником со сканирующей разверткой, а также в режиме линейного перемещения луча без сканирующей развертки.

КЭ моделированием обоснован оптимальный диапазон параметров при ЭЛО покрытия с существенно отличающимися теплофизическими свойствами по сравнению со свойствами материала основы, обеспечивающий оплавление приповерхностной зоны материала без появления дефектов перегрева поверхности (так, для биметалла сталь 08Х19Н10Т – чугун ВЧШГ определен диапазон удельной мощности  $10^3 - 1,5 \times 10^3 \text{ Вт/см}^2$ ). Это сокращает число опытов, необходимых для поиска технологичных режимов ЭЛО.

Для оптимизации электронно-лучевого оплавления при пайке предложена термодинамическая КЭ модель, учитывающая геометрические особенности резцовых вставок и теплофизические свойства составляющих их материалов. Показано, что учет темпе-

ратурной зависимости теплофизических свойств материалов позволяет реализовывать схемы ЭЛО с меньшей продолжительностью воздействия пучка большей мощности.

### **Литература**

- [1] Guo Z. et al., Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation, Mater. Sci. Eng. A. 2005, 413, 465-469.
- [2] Miodownik A.P., Saunders N., Modelling of materials properties in duplex stainless steels, Mater. Sci. Technol. 2002, 18, 8, 861-868.
- [3] Harding R.A., Saunders N.J., Theory and practice of computer modeling of phase diagrams for cast irons, Trans. Am. Foundrymen's Soc. 1998, 105, 451-458.
- [4] Saunders N. et al., Using JMatPro to model materials properties and behavior, J. Met. 2003, 55, 12, 60-65.
- [5] Hasui A., Naplavka i napylenie, Mashinostroenie, M.: 1985, 240 p.
- [6] Rykalin N.N., Osnovy elektronno-luchevoj obrabotki materialov, Mashinostroenie, M.: 1978, 240 p.

## **The finite element model for electron beam soldering of carbide cutting elements to a mandrel**

### **ABSTRACT:**

Generalized finite-element models for the electron-beam treatment of the surface of materials with significantly different thermophysical properties have been created, allowing the calculation and optimization of process conditions. For products of different geometries, taking into account the thermodynamics of the process and the temperature dependences of the properties of materials, controlling the electron beam geometry and the process cycloramas, the ranges of energy parameters of electron beam processing have been optimized. Finite-element modeling of surface heating during electron-beam processing was carried out for a flat-shaped part by a stationary source with scanning, as well as when exposed to linear beam movement without scanning. To optimize electron beam reflow during soldering, a thermodynamic finite-element model is proposed that takes into account the geometric features of the cutter inserts and the thermophysical properties of their constituent materials. It is shown that taking into account the temperature dependence of the thermophysical properties of the materials makes it possible to realize electron beam processing schemes with a shorter duration of exposure to a beam of greater power.

### **KEYWORDS:**

finite element model; electron beam processing; carbide tool