

УДК 621.951.47

С.И. ПЛАНКОВСКИЙ, А.В. ГАЙДАЧУК, О.В. ШИПУЛЬ, Е.С. ПАЛАЗЮК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПЛАВЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ  
ПРИ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТОНИРУЮЩИМИ СМЕСЯМИ**

*Проведен анализ факторов, значимых для построения модели удаления заусенцев при термоимпульсной обработке. Показана необходимость учета тепловых и силовых воздействий. В качестве первого этапа построения полной математической модели процесса разработана конечно-элементная модель для расчета распределения температур в заусенце. Модель учитывает зависимость теплофизических характеристик материала обрабатываемых деталей от температуры. На примере тестовой задачи для заусенца, имеющего форму пластины, проведено сравнение результатов численного моделирования с известным аналитическим решением. Сформулированы задачи дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** термоимпульсная обработка, удаление заусенцев, математическое моделирование, поле температур, радиус скругления.

**Введение**

Термоимпульсная обработка детонирующими газовыми смесями является одним из наиболее перспективных методов финишной отделки и очистки высокоточных деталей. Уникальным свойством метода является возможность обработки внутренних полостей произвольно сложной формы. Поэтому естественной областью его применения может быть обработка корпусов агрегатов гидравлических и топливных систем ЛА [1].

Процесс термоимпульсного удаления заусенцев происходит за тысячные доли секунды. При этом при назначении режимов обработки приходится учитывать большое количество факторов - теплофизические характеристики материала и конструктивные особенности деталей, параметры удаляемых заусенцев, требования качества обработки кромок и др. Поэтому для сокращения времени разработки технологии необходимо применять математическое моделирование процесса.

Известны аналитические модели для расчета процесса оплавления заусенца [1, 2]. Однако они построены при серьезных упрощениях и не учитывают всех видов воздействий. Поэтому рассматриваемая в настоящей работе задача разработки комплексных математических моделей термоимпульсной обработки с их интеграцией с современными CAD/CAE-системами является актуальной.

**Описание задачи моделирования**

Образование заусенцев на кромках является неизбежным следствием любых видов механообработки [3]. В настоящее время разработано несколько

различных стандартов, в которых классифицируются различного рода дефекты и искажения кромок. Одна из первых попыток такой классификации была сделана в работе Gillespie [4]. В зависимости от механизма образования он разделил заусенцы на четыре вида: заусенцы Пуассона (рис. 1, а, б), завивающиеся заусенцы (рис. 1, в), рваные заусенцы (рис. 1, г) и отрезные заусенцы (рис. 1, д).

Образование первого вида заусенцев связано с явлением поперечной деформации при действии продольной нагрузки, характеризуемым коэффициентом Пуассона.

Второй вид заусенцев образуется на кромках выхода инструмента и по мнению Gillespie связан с обработкой затупленным инструментом, приводящей к выдавливанию материала на кромке.

Завивающиеся заусенцы также образуются на кромках выхода инструмента, однако их образование связано с отрывом материала на кромке.

Отрезные заусенцы образуются при операциях отрезания и вызваны отделением заготовки от основного материала под действием силы тяжести.

К основным параметрам заусенцев относят размеры (толщину у корня, высоту, длину вдоль кромки), твердость, форму поперечного сечения, конфигурацию вдоль кромки, место расположения.

Из-за значительных деформаций при резании и воздействия высоких температур свойства материала заусенца могут существенно отличаться от свойств основного материала.

Стандартами качества кромок устанавливаются не только требования удаления заусенцев, но и их скругления заданным радиусом. При термоимпульсной обработке это требует точного дозирования энергии.

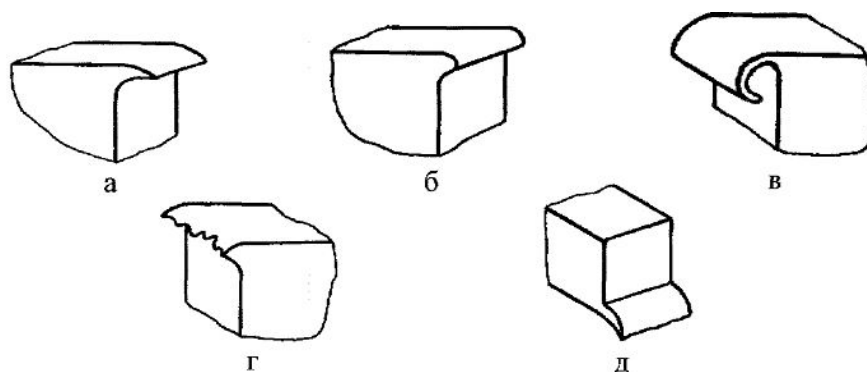


Рис.1. Классификация заусенцев, образующихся при механообработке, по Gillespie [4]

При термоимпульсной обработке удаление заусенцев и обработка кромок происходит в результате взаимодействия материала детали с продуктами сгорания газообразных топливных смесей.

Эффективная обработка кромок возможна только в случае, если, по крайней мере, часть топливной смеси сгорает в режиме детонации или теплового взрыва с образованием ударных волн, которые распространяются в камере до затухания в течение времени порядка  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  с [2, 5, 6].

Несмотря на малое время воздействия ударных волн именно этот период определяет величину осредненных тепловых потоков в деталь. Так, например, по данным работы [5] величина тепловых потоков при действии ударных волн достигает величины порядка  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

В той же работе отмечается необходимость учета тепла химических реакций при взаимодействии газов с материалом заусенца. Такой учет, безусловно, необходим при применении топливных смесей с избытком кислорода, особенно для материалов, у которых температура воспламенения ниже температуры плавления (например, магниевых и

титановых сплавов).

Кроме интенсивного нагрева во время распространения ударных волн заусенцы подвергаются существенному динамическому воздействию. Так, по данным работы [7], при детонации метанокислородной смеси максимальная интенсивность детонационной волны растет с повышением давления смеси. При начальном давлении смеси 1 МПа, являющимся обычным для термоимпульсной обработки, она составляет 22 МПа. Интенсивное термомеханическое воздействие может приводить к хрупкому сколу заусенцев (рис. 2).

Таким образом, при создании математической модели удаления заусенцев при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями необходимо учитывать такие возможные механизмы:

- оплавление заусенца и отрыв жидкого металла ударными волнами;
- сгорание заусенца при обработке смесями с избытком кислорода;
- хрупкое скалывание заусенца, вызванное термическим разупрочнением и динамическим воздействием ударных волн.

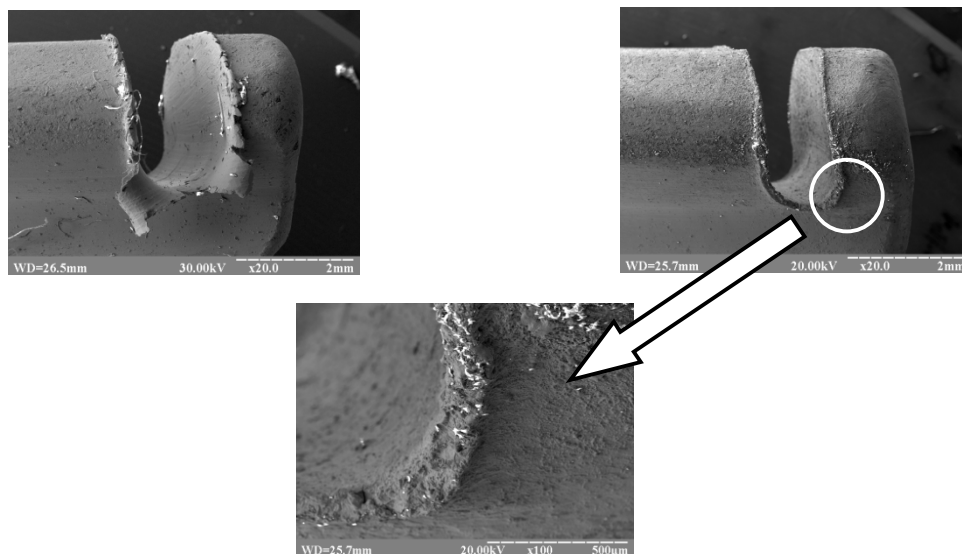


Рис. 2. Хрупкий скол вьющегося заусенца при термоимпульсной обработке замка лопатки ГТД

### Описание существующих и создаваемой математических моделей

До настоящего времени моделирование удаления заусенцев при термоимпульсной обработке рассматривалось в весьма ограниченном количестве работ.

Одной из первых таких работ была статья [8], в которой численно анализировалась возможность удаления заусенца с поверхности путем испарения и оплавления. Задача рассматривалась в двумерной постановке. Заусенец представлялся в виде треугольного выступа над полуплоскостью. Воздействие продуктов сгорания задавалось как тепловой поток, равномерно распределенный по нормали к границе. В результате был сделан вывод о невозможности удаления заусенцев испарением, так как при необходимой для этого величине теплового потока неизбежно происходит унос основного материала детали.

Процесс удаления заусенцев оплавлением наиболее полно исследовался в работах, выполненных А.В. Лосевым [2, 9, 10]. Заусенец в этих работах представлялся в виде пластины постоянной толщины, выступающей из детали (рис. 3). Механизмом удаления заусенца считалось оплавление.

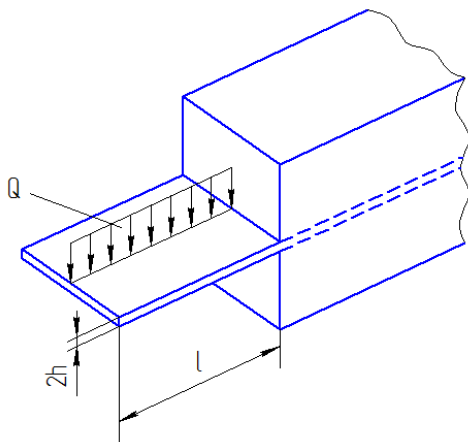


Рис. 3. Физическая модель детали с заусенцем [2]

При продолжении пластины вглубь детали и пренебрежении теплоотводом по поверхностям, выделенным на рис. 3 пунктиром, задача сводилась к расчету поля температур для плоской задачи нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right).$$

С учетом уже отмеченной особенности термоимпульсной обработки, задача представлялась в виде суперпозиции двух задач: задачи о действии на поверхности заусенца мгновенного теплового потока и задачи о действии стационарного теплового потока.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что для низких давлений смеси (до 0,65 МПа) заусенец в импульсном режиме воспринимает 70...80% тепла, при средних (до 1 МПа) 80...90%, а при высоких 85...90% [2].

Задача решалась для области, изображенной на рис. 4 со следующими условиями:

для нагрева мгновенным потоком

$$T(x, y, 0) = 0,$$

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial T(x, h, \tau)}{\partial x} = -\frac{mQ\delta P(x)}{\lambda},$$

для нагрева постоянным потоком

$$T(x, y, 0) = 0,$$

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial T(x, h, \tau)}{\partial x} = -\frac{(1-m)QP(x)}{\lambda},$$

где  $Q$  – тепловой поток;

$\lambda$  – температуропроводность и теплопроводность материала детали;

$\delta$  – дельта функция Дирака;

$m$  – доля тепла, выделившаяся в импульсном режиме;

$$P(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [0, l]; \\ 0, & \text{при } x \in (l, \infty). \end{cases}$$

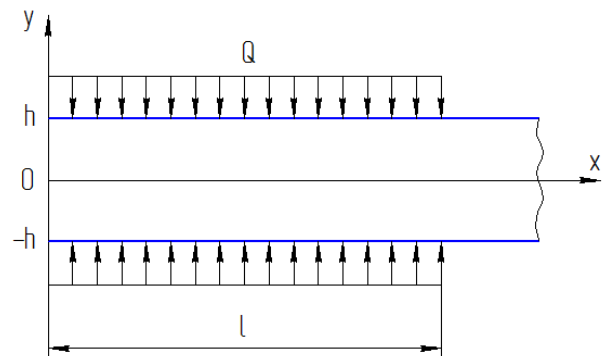


Рис. 4. Расчетная схема для определения полей температур в заусенце [2]

Решение, полученное таким образом, обладает недостатками, присущими решениям, получаемым методами мгновенных источников – в начальный момент времени температура поверхности не определена. Погрешность определения температуры сохраняется и в моменты времени, близкие к нулю.

Более точным представляется построение решения на базе суперпозиции решений о действии стационарных потоков разной интенсивности со сменой величины потока после затухания ударных волн [2]:

$$T(x, y, \tau) = \frac{qa}{\lambda 1h} \left[ \frac{1}{2} \int_0^\tau \left( \operatorname{erf} \frac{1-x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{1+x}{2\sqrt{a\tau}} \right) d\tau + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \frac{n\pi y}{h} \int_0^\tau \exp \left( -a \frac{n^2 \pi^2 \tau}{h^2} \right) \left( \operatorname{erf} \frac{1-x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{1+x}{2\sqrt{a\tau}} \right) d\tau \right]$$

Данное решение получено в предположении независимости теплофизических характеристик материала от температуры. Кроме того, изменение энтальпии при фазовом переходе также не учитываются.

Дополнительными недостатками модели являются: постоянная геометрия расчетной области, не учитывающая оплавления заусенца, и невозможность моделирования скругления кромки из-за отсутствия подвода тепла на части границы, превышающей высоту заусенца.

Тем не менее, аналитические решения, полученные в работе [2], позволили впервые разработать методику назначения режимов термоимпульсной обработки.

Для устранения перечисленных выше недостатков модель оплавления заусенца может быть усовершенствована следующим образом.

Во-первых, расчетная схема должна быть изменена таким образом, чтобы в большей мере удовлетворять реальной картине отделки кромок. Для изучения влияния конструктивных особенностей детали на характеристики кромки после термоимпульсной обработки предусмотрена возможность изменения угла кромки  $\alpha$  (рис. 5).

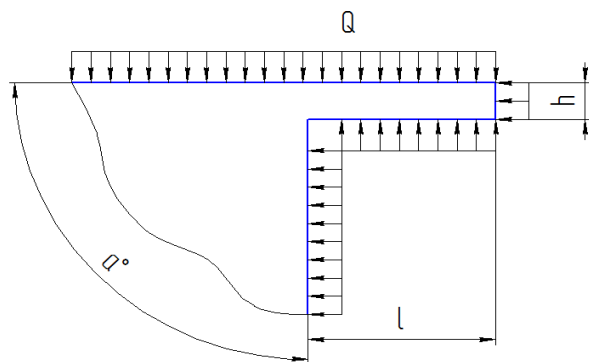


Рис. 5. Модернизированная расчетная схема определения температур в заусенце

Во-вторых, будем считать, что при расплавлении материала он удаляется. Соответственно геометрия расчетной области и граница, на которой действует тепловой поток, изменяются со временем.

Наконец, при расчете следует учесть реальные зависимости теплопроводности и теплоемкости материалов от температуры и скрытую теплоту плавления при фазовом переходе.

Решение такой задачи возможно только численным методом. В настоящей работе для получения результатов применялся вычислительный МКЭ пакет ANSYS CFX.

## Анализ результатов моделирования

На первом этапе была решена тестовая задача в постановке, принятой в работе [2]. Затем полученные результаты сравнивались с аналитическим решением, приведенным выше.

Моделирование проводилось для случая нагрева пластинчатого заусенца из широко применяемой в авиационном агрегатостроении стали 30X13.

На рис. 6 показаны зависимости изменения температуры заусенца по толщине на момент времени  $\tau=0,001$  с. Аналитический расчет по приведенной выше зависимости выполнен с использованием системы компьютерной алгебры Mathcad, а результаты численного моделирования получены с помощью средств ANSYS CFX.

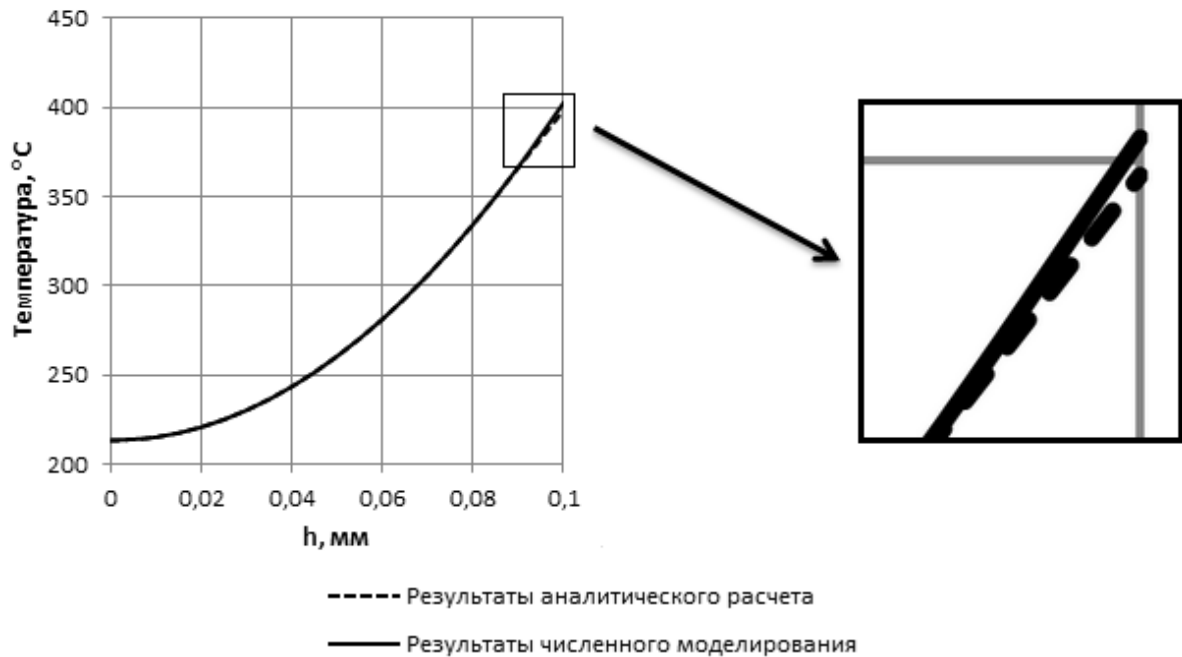
В обоих случаях расчеты проводились при одинаковых внешних условиях – подвод тепла источниками одинаковой мощности к заусенцам толщиной 0,2 мм и длиной 1 мм. Экспериментальные данные по теплоотдаче продуктов детонации газовой смеси показывают, что максимальные тепловые потоки при затухании ударных волн могут достигать значений  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup> [6]. Такая плотность теплового потока принималась при решении поставленной задачи.

Для более адекватного моделирования процесса нагрева была построена измельченная гексаэдрическая сетка конечных элементов с размером ячейки  $2 \cdot 10^{-6}$  м. Значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости считались независимыми от температуры.

Принципиальных отличий между характером изменения температуры для аналитического и численного решения не выявлено. Разница наблюдается лишь в значениях температур у поверхности заусенца. При этом расхождение результатов при определении температур аналитическим способом и с помощью численного моделирования не превышает 1%.

Таким образом, можно сказать, что численная модель адекватно описывает процесс нагрева заусенца в линейной постановке и при доработке может быть использована при решении более сложных задач.

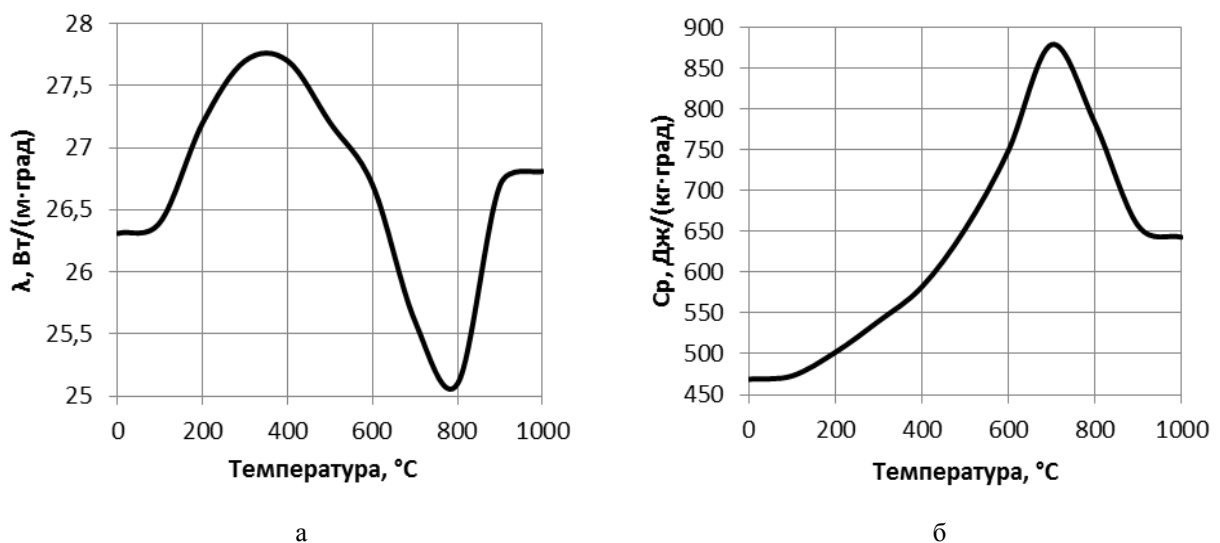
На следующем этапе модель была уточнена путем учета зависимости теплофизических коэффициентов от температуры. При этом оценивалась величина погрешности, которая связана с решением задачи в линейной постановке.

Рис. 6. Изменение температуры заусенца по толщине при  $\tau = 0,001$  с

Известно, что при нагреве металлов и сплавов помимо структурных превращений изменяются их механические и физические свойства. При нагреве легированных сталей их теплофизические свойства изменяются в зависимости от рода и количества легирующих элементов. У высоколегированных сталей, содержащих хром и никель, с повышением температуры теплопроводность увеличивается. В зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости при нагреве стали 30X13 приведены на рис. 7. Для этой стали коэффициент теплопроводности при достижении температуры  $700^{\circ}\text{C}$  изменяется только на 5%, но коэффициент теплоемкости увели-

чивается почти в 2 раза по сравнению со свойствами при нормальных условиях. Учет изменения теплофизических свойств с увеличением температуры позволит получить более адекватный результат при численном решении данной задачи.

Рассмотрим влияние учёта изменения теплофизических свойств на результат численного моделирования при использовании описанной ранее математической модели процесса нагрева заусенца. В случае задания теплопроводности и теплоемкости как функций от температуры наблюдаются существенные отличия в значениях температуры рассматриваемого заусенца (рис. 8).

Рис. 7. Изменение теплофизических свойств стали 30X13 с увеличением температуры: а – коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ; б – коэффициент теплоемкости  $C_p$

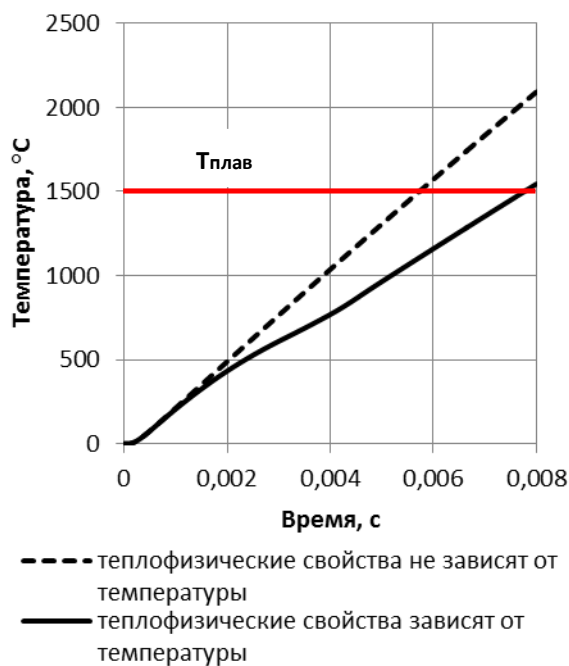


Рис. 8. Изменение температуры среднего ( $h=0$ ) слоя заусенца по времени

Если при действии теплового источника в течение 0,001 с разность температур составляет 3 %, то через 0,005 с она уже достигает 34 %. С дальнейшим увеличением времени действия источника тепла эта разность постепенно увеличивается. Поэтому использование постоянных значений теплофизических свойств материалов приводит к недопустимой погрешности полученных результатов и, как следствие, заданию неправильных режимов обработки.

Обработка кромок деталей представляет собой важный процесс производственного цикла и включает в себя не только операцию очистки от заусенцев, но также притупление кромок произвольным радиусом и размерное округление.

Картина оплавления рассматриваемого заусенца, полученная при использовании модернизированной расчетной схемы определения температур, показана на рисунке 9. При полном оплавлении заусенца кромка неизбежно притупляется с определенным радиусом.

Важным параметром при удалении заусенцев и округлении кромок деталей являются повторяемость и точность радиусов скругления. В работе [11] отмечается, что радиус скругления зависит только от характеристики источника тепла и теплофизических свойств материала обрабатываемой детали.

Однако необходим также учет влияния конструктивных особенностей детали на характер кромки после термоимпульсной обработки.

Основным геометрическим параметром кромки является ее угол (рис. 5). Большинство деталей

имеют кромки с углами, варьирующимися от 45° (кромка с острым углом) до 135° (кромка с тупым углом).

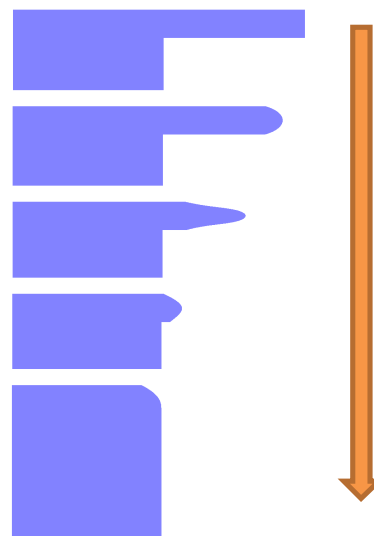


Рис. 9. Картина оплавления заусенца и скругления кромки детали

Численное моделирование проводилось при одинаковых геометрических параметрах заусенца, но с различной величиной угла кромки. Результаты моделирования показывают, что с увеличением угла кромки радиус скругления тоже увеличивается (рис. 10). Это напрямую связано с повышением оттока тепла в массив детали и более медленным прогревом заусенца.

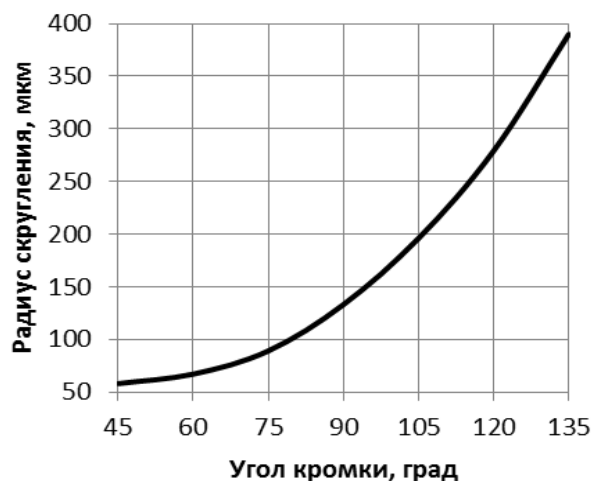


Рис. 10. Изменение радиуса скругления от угла кромки детали

Поэтому конструктивные особенности детали наряду с теплофизическими свойствами материала и характеристиками теплового источника являются определяющими параметрами при определении режимов термоимпульсной обработки и получении кромок с заданным радиусом.

В дальнейшем следует рассмотреть механизм удаления заусенцев (оплавление, сгорание в избытке окислителя, хрупкое скалывание) в зависимости от режимов обработки (мощность теплового источника, время его действия), геометрических параметров заусенца, материала.

### Выводы

1. Разработана численная модель оплавления заусенца в виде пластины. При решении тестовой задачи в линейной постановке погрешность определения температурных полей относительно аналитического расчета не превысила 1%.

2. Установлено, что использование постоянных значений теплофизических характеристик приводит к недопустимой погрешности результатов (до 40%). Для получения более точных результатов необходимо задание теплопроводности и теплоемкости как функций от температуры.

3. Установлено, что помимо характеристик источника тепла и теплофизических свойств материала обрабатываемой детали на радиус скругления кромки влияет ее угол.

### Литература

1. Жданов, А.А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностных деталей агрегатов авиационных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04/ Жданов Александр Андреевич. – Х., 2003. – 120 с.

2. Лосев, А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.

3. Gillespie, L.K. *Deburring and edge finishing handbook* [Text] / L.K. Gillespie. – New York City: Industrial Press, 1999. – 404 p.

4. Gillespie, L.K. *Formation and properties of machining burr.*, ASME Transactions [Text] / L.K. Gillespie, P.T. Blotter // *Journal of Engineering for Industry*. – 1976. – Vol. 98, No. 1. – P. 66-74.

5. Адонин, С.М. О теплоотдаче продуктов детонации газовой смеси в камере [Текст] / С.М. Адонин, В.И. Манжалеи // *Нестационарные проблемы механики: сб. научных трудов Института гидродинамики*. – Вып. 74. – Новосибирск. – 1986. – С. 3–10.

6. Манжалеи, В.И. Затухание ударных волн после детонации газа в камере [Текст] / В.И. Манжалеи // *Гидродинамика взрыва: сб. научных трудов Института гидродинамики*. – Вып. 78. – Новосибирск. – 1986. – С. 142–153.

7. Иванов, К.В. Детонационные волны в смесях с повышенным начальным давлением [Электронный ресурс] / К.В. Иванов, С.В. Головастов // 50-я научная конференция МФТИ. Секция физики высоких плотностей энергий: тез. докл. науч. конф., 23 ноября 2007 г. М., 2007. – 5 с. – Режим доступа к документу: [http://mipt.ru/nauka/conf\\_mipt/conf50/plen\\_section\\_s/fpfe/FVPE/Ivanov.html](http://mipt.ru/nauka/conf_mipt/conf50/plen_section_s/fpfe/FVPE/Ivanov.html). – 3.06.2009.

8. Пак, Н.И. Численное моделирование процесса термического удаления заусенцев концентрированным потоком энергии [Текст] / Н.И. Пак, С.А. Шикунов // *Обработка материалов импульсными нагрузками: сб. научных трудов Института гидродинамики*. – Новосибирск. – 1990. – С. 168–175.

9. Лосев, А.В. Расчет температурного поля пластины при её местном нагреве [Текст] / А.В. Лосев, Б.А. Колоколов, С.Ф. Мецержаков // *Обработка металлов давлением в машиностроении: сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 17. – Х. – 1981. – С. 49-54.

10. Лосев, А.В. Теоретический анализ термоимпульсного удаления заусенцев с деталей [Текст] / А.В. Лосев // *Импульсная обработка металлов давлением: сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х. – 1997. – С. 43-49.

11. Лосева, О.А. Проблема скругления кромок [Текст] / О.А. Лосева // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 45. – Х. – 2010. – С. 122-128.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии авиадвигателестроения А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПЛАВЛЕННЯ ЗАДИРОК ПРИ ТЕРМОІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ ДЕТОНУЮЧИМИ СУМІШАМИ

**С.І. Планковський, О.В. Гайдачук, О.В. Шипуль, Є.С. Палазюк**

Проведено аналіз факторів, значущих для побудови моделі видалення задірок при термоімпульсній обробці. Показано необхідність врахування теплових і силових впливів. В якості першого етапу побудови повної математичної моделі процесу розроблено кінцево-елементну модель для розрахунку розподілу темпера-

тур в задирку. Модель враховує залежність теплофізичних характеристик матеріалу оброблюваних деталей від температури. На прикладі тестової задачі для задирки, маючого форму пластини, проведено порівняння результатів чисельного моделювання з відомим аналітичним рішенням. Сформульовано завдання подальших досліджень.

**Ключові слова:** термоімпульсна обробка, видалення задирок, математичне моделювання, поле температур, радіус скруглення.

#### **SIMULATION OF THE BURRS REFLOW PROCESS IN THERMAL-PULSE DEBURRING WITH DETONATING MIXTURES**

*S.I. Plankovsky, A.V. Gaidatchouk, O.V. Shipul, Ye.S. Palazyuk*

Analysis the factors relevant to building a model of thermal-pulse deburring has been performed. The necessity of taking into account the thermal and force effects has been shown. At the first stage of building a complete mathematical model of the process finite element model for calculating the temperature distribution in the burrs has been developed. The model accounts for the dependence of thermophysical properties of the workpiece material from the temperature. On the example of a test problem for the plate shaped burr a comparison of numerical results with the known analytical solution has been performed. The problems for further research have been formulated.

**Key words:** thermal-pulse deburring, burrs removal, mathematical simulation, temperature field, rounding radius.

**Планковский Сергей Игоревич** – д-р техн. наук, проф. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.plank@khai.edu.

**Гайдачук Александр Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.gaydachuk@khai.edu.

**Шипуль Ольга Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: o.shipul@khai.edu.

**Палазюк Евгений Сергеевич** – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: e.palaz@mail.ru.