

УДК 678.5.029.7.65.011.54

**В. Л. МАЛАШЕНКО, А. Н. МЕЩЕРЯКОВ, А. А. КОРОСТЕЛЕВА, А. В. ЛОСЕВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ОБЛОЯ С ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ**

*В статье приведены физико-математические модели процессов нагрева облоя и массива детали источником тепла постоянной мощности и результаты исследований нагрева моделей ликвидов и массива деталей из полиэтилена и полипропилена. Теоретически установлены оптимальная плотность теплового источника и время его воздействия на детали при оплавлении облоя различной толщины. Представлены экспериментальные исследования термоимпульсного процесса удаления облоя с полиэтиленовых деталей при использовании источников тепла с различными техническими характеристиками: большой мощностью и кратким воздействием и относительно малой мощностью, но длительным нагревом, которые полностью подтверждают расчетные параметры обработки.*

**Ключевые слова:** скругление кромок, термоимпульсный процесс, температурное поле, теплофизические свойства материалов, облой, термопластик.

**Введение**

Общее потребление изделий из пластмасс растет ежегодно более чем на два процента. Широкое применение пластмасс в аэрокосмической отрасли объясняется их специфическими свойствами: относительно малым удельным весом, высокой прочностью, радиопрозрачностью и др. При этом для формообразования изделий используют автоматизированное оборудование, а на операциях удаления облоя еще широко применяют ручной труд. Трудоемкость зачистных операций достигает 80% от общих трудозатрат на производство пластмассовых деталей [1]. Поэтому поиск эффективной технологии, позволяющей снижать затраты на этих операциях, является актуальным в настоящее время.

Одним из перспективных направлений в области отделочно-очистных технологий является использование тепловых эффектов при обработке, заключающейся в предварительном охлаждении изделий до хрупкого состояния материала с последующим удалением облоя виброгалтовкой и ручной обрезки облоя различными лезвийными инструментами, горячей проволокой и др. Из всего многообразия известных технологий наиболее приемлемой является обработка термоимпульсным методом. Суть обработки состоит в следующем: детали помещают в герметичную камеру с горючей смесью, смесь поджигают, и тепло от ее сгорания оплавляет ликвиды. Инструментом в данном методе является газовая горючая смесь. Метод отличается высокой производительностью, гибкостью, низкими затратами на обработку (стоимость заряда газовой смеси), простотой регулирования параметров обработки при известных закономерностях взаимного

влияния процессов, происходящих в деталях, облое и в оборудовании (газовой среде).

Из анализа статистических данных по потреблению термопластов следует, что наибольшая доля рынка приходится на термопласты общетехнического назначения, а именно: полиэтилен высокого и низкого давления, полипропилен, поливинилхлорид и полиэстер. В таблице 1 приведены теплофизические свойства некоторых термопластичных пластмасс, температура плавления которых находится в интервале  $\sim 120...170^\circ\text{C}$ , а коэффициент теплопроводности меньше, чем у металлов и сплавов, на два-три порядка. Причем при изменении температуры теплофизические свойства некоторых пластмасс значительно изменяются. Поэтому параметры термоимпульсной обработки для каждого материала необходимо назначать с учетом его особенностей. Задача выбора режимов удаления ликвидов включает в себя противоречивые условия – с одной стороны, нужно обеспечить плавление облоя, а с другой – сохранить исходное состояние поверхностного слоя. Для решения задачи оптимизации режимов обработки при условии сохранения исходного состояния детали используем физико-математические модели.

Решение задачи сводится к определению условий нагрева и охлаждения поверхностей детали и времени оплавления облоя. На рисунке 1 показаны типовые детали из полиэтилена до и после обработки на оптимальном режиме (а), перегретыми поверхностями (б) [2] при отклонении от оптимального режима.

Из экспериментов следует необходимость анализа температурных полей массива детали и облоя при нагреве квазипостоянным источником тепла с последующим выбором характеристик источника

Теплофизические свойства полимеров

| Полимер                     | $C$ ,<br>кДж/кг·град   | $\lambda$ ,<br>Вт/м·град                  | $a$ ,<br>$10^{-6}$ м/с | $T_{пл}$ , °C | Теплота плавления,<br>кДж/моль |
|-----------------------------|------------------------|---|------------------------|---------------|--------------------------------|
| Полиэтилен низкой плотности | 2,0...3,5<br>2,4...4,0 | (20 -70 °C)<br>0,29...0,42<br>0,28...0,38 | 1,4...1,6<br>1,1...1,2 | 103...115     | 7,54... 8,38                   |
| Полипропилен                | 1,7...1,9              | (20 - 130°C)<br>0,12...0,25               | 1,3                    | 160...172     | 8,79...10,89                   |

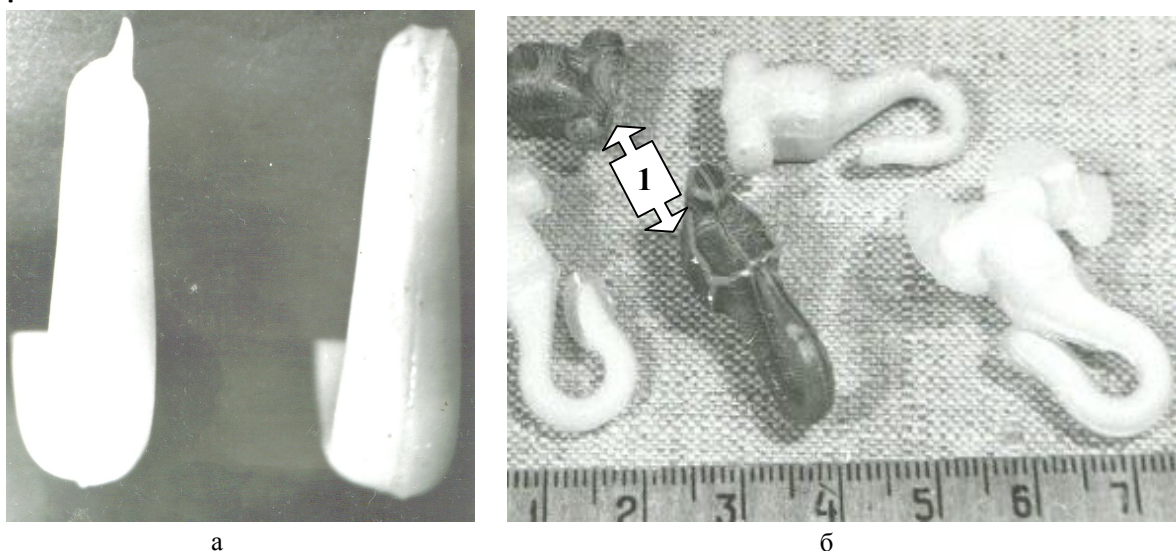


Рис.1. Детали из полиэтилена: а – фрагмент детали до и после зачистки, б – (1) детали с перегретой поверхностью при избыточной мощности источника тепла

тепла (оборудования), что в свою очередь дает возможность определить условия организации процесса сгорания газовой смеси.

### 1. Аналитическая модель нагрева массива детали постоянным источником тепла

Теоретический анализ температурного поля массива детали проводим при подводе тепла и нагреве от источника постоянной мощности [3]. Рассмотрим этап нагрева модели детали равномерно распределенным источником тепла при следующих допущениях:

- утечкой тепла на полубесконечных участках границы ( $-\ell$ ) и ( $\ell$ ) пренебрегаем (рис. 2);
- температуру в начальный момент времени принимаем равной  $0^\circ\text{C}$ ;
- к поверхности детали на участке  $\ell$  подводится тепло;
- вследствие кратковременности действия источников тепла теплообмен с окружающей средой не учитываем.

Модель детали представляет собой полуплоскость (рис. 2). Изменение температуры происходит в направлении осей  $OX$  и  $OY$ . Теплообменом с окру-

жающей средой пренебрегаем, источник тепла – внутренний, имеет мощность  $q$ . Тепло подводится к поверхности детали на участке  $-\ell... \ell$ .

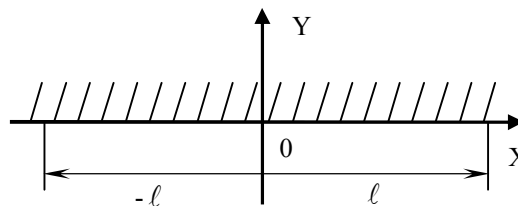


Рис. 2. Модель детали

Условие задачи математически можно сформулировать следующим образом. Имеем дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right] + \frac{QP(x)\delta(y)}{c\gamma} \quad (1)$$

с краевыми условиями:

$$T(x, y, 0) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Применяя преобразования Фурье, получаем решение, позволяющее моделировать процесс нагрева поверхности деталей при различных теплофизических свойствах материалов и плотности теплового потока во времени:

$$T(x, y, \tau) = \frac{Q}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau}} e^{-\frac{y^2}{4a\tau}} \left( \operatorname{erf} \frac{\ell - x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell + x}{2\sqrt{a\tau}} \right) d\tau, \quad (5)$$

где  $a = \lambda / C \gamma$  – температуропроводность,  
 $\lambda$  – теплопроводность материала,  
 $C$  – теплоемкость материала,  
 $\gamma$  – плотность материала,  
 $\tau$  – время нагрева,  
 $Q$  – плотность теплового потока.

## 2. Аналитическая модель нагрева облоя постоянным источником тепла

Рассмотрим выбранную модель ликвида (рис. 3), которая может быть представлена неограниченной пластиной, ширина и длина которой бесконечно велики по сравнению с толщиной, равной  $2h$ . Изменение температуры происходит в направлениях осей  $OY$ ,  $OX$ . Следовательно, рассматриваемая задача является двухмерной. Собственно ликвидом является часть пластины длиной  $\ell$ , на которую действуют источники тепла мощностью  $q$ . Для понимания физической сущности процесса удаления заусенца наряду с определением энергии теплового источника важным является нахождение температурного поля заусенца.

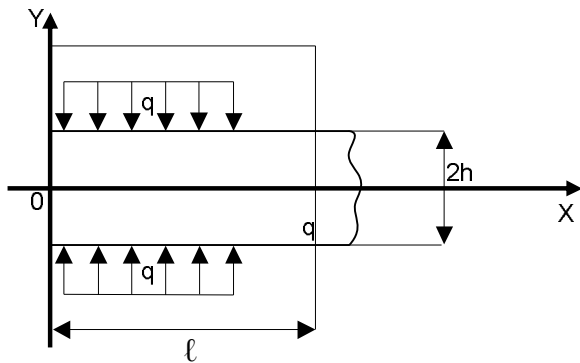


Рис. 3. Модель ликвида

Рассмотрим нагрев расчетной модели заусенца источниками тепла постоянной мощности, непрерывно распределенными на участке (рис.3) при следующих допущениях:

- начальная температура пластины принимается равной  $0^\circ\text{C}$ ;
- к поверхности пластины на участке длиной  $\ell$  мгновенно подводится тепло;
- вследствие кратковременности действия источников тепла теплообмен с окружающей средой не учитывается.

В этом случае уравнение теплопроводности принимает следующий вид:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right] + \frac{qP(x)\delta(h-y)}{c\ell\gamma}, \quad (6)$$

где  $\delta(h-y)$  – дельта-функция Дирака.

$$\text{Начальное условие } T(x, y, 0) = 0, \quad (7)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(x, h, \tau)}{\partial y} = 0. \quad (10)$$

Окончательное решение получим в виде ряда, коэффициенты которого есть интегралы с переменным верхним пределом:

$$T(x, y, \tau) = \frac{a q}{\ell h \lambda} \left[ \frac{1}{2} \int_0^{\tau} \left( \operatorname{erf} \frac{\ell - x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell + x}{2\sqrt{a\tau}} \right) d\tau + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \frac{n \pi y}{h} \times \int_0^{\tau} \exp \left( -\frac{a n^2 \pi^2 \tau}{h^2} \right) \times \left( \operatorname{erf} \frac{\ell - x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell + x}{2\sqrt{a\tau}} \right) d\tau \right]. \quad (11)$$

Аналитическая зависимость позволяет моделировать процесс нагрева элементов детали в виде пластины, т.е. самых теплонапряженных звеньев системы (облоя), в зависимости от их геометрических размеров, характеристики источника тепла, теплофизических свойств материалов и времени обработки.

## 3. Исследование температурных полей моделей ликвидов и массива детали

Многообразие полимерных материалов с индивидуальными теплофизическими свойствами осложняет применение термоимпульсного метода, поскольку на выбор режимов обработки влияют более двадцати взаимовлияющих факторов. Для каждого материала существует только одна оптимальная зависимость режимов от теплофизических свойств и геометрических размеров ликвидов [2, 3], а экспериментальный путь решения такой задачи проблематичен и дорогостоящ. Поэтому для оптимизации режимов резонно использовать физико-математические модели процессов, происходящих в детали и ликвидах при нагреве.

Для примера ограничимся исследованием моделей деталей из наиболее распространенных термопластов. В таблице 1 приведены теплофизические свойства полиэтилена низкой плотности и полипропилена.

Выполним численные эксперименты по определению условий обработки деталей, исключаящих

негативные последствия. Толщина удаляемых ликвидов – до 200 мкм. Исследуем температурные поля облоя и массива образца детали из полиэтилена и полипропилена при различных условиях нагрева.

Для численных исследований используем физико-математические модели, которые позволяют моделировать температурные поля в ликвидах и в массиве деталей при изменении мощности источника тепла и времени воздействия на объекты. В таблице 2 сведены результаты численных экспериментов, которые выполнялись при одинаковой мощности источника тепла. На рисунках 4 и 5 показаны типичные температурные поля облоя толщиной  $2 \cdot 10^{-4}$  м и поверхностного слоя массива детали из полиэтилена глубиной  $1 \cdot 10^{-4}$  м, где цифрами 1-5 соответственно обозначены временные интервалы и приповерхностные слои. При обработке деталей из материалов с относительно низкой теплопроводностью необходимо обеспечить оптимальные режимы подвода тепла для предотвращения перегрева их поверхностей и оплавления облоя. Относительно низкие температура плавления и теплопроводность полимерных материалов обуславливают необходимость обеспечения точного дозирования тепла и равномерной температуры газов в рабочей камере. Кроме того, необходимо обеспечить прогрев до плавления сред-

него слоя облоя и предотвратить перегрев его поверхности, чтобы исключить разложение полимеров с выделением углерода. На рисунке 6 (а, б) и 7 показаны типичные результаты теоретических и экспериментальных исследований удаления облоя при детонационном сгорании смеси. Для процесса теплообмена в режиме детонационного сгорания характерны высокая мощность теплового источника и кратковременность действия. Интенсивный теплообмен между продуктами сгорания и обрабатываемыми деталями приводит к перегреву поверхностей и утрате товарного вида (рис.7).

На рисунках 8 (а, б) и 9 показаны результаты исследований удаления облоя при оптимальных режимах обработки за счет подавления детонации и интенсивного теплообмена. По результатам численных исследований установлено, что процесс термимпульсной обработки пластмасс целесообразно осуществлять плавлением при горении газовой смеси без детонации при давлении продуктов сгорания до 15 МПа. Температура рабочей среды газа достигающей в среднем  $2000^{\circ}\text{C}$ . При этом необходимо регулировать время контакта продуктов сгорания и деталей в интервале  $10^{-1} \dots 10^{-3}$  с, для чего предусмотрена система выпуска [4].

Таблица 2

Результаты численных экспериментов

| Материал     | Толщина ликвида<br>$h, \text{ м}$ | Время обработки<br>$\tau, \text{ с}$ | Температура ликвида<br>$\Delta t_{\text{л}}, ^{\circ}\text{C}$ | Температура детали<br>$\Delta t_{\text{д}}, ^{\circ}\text{C}$ |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Полиэтилен   | $5 \cdot 10^{-5}$                 | 0,005                                | 130...200  | 3,5   |
|              | $1 \cdot 10^{-4}$                 | 0,020                                | 126...190  | 2,5   |
|              | $2 \cdot 10^{-4}$                 | 0,100                                | 124...180  | 1,5   |
| Полипропилен | $5 \cdot 10^{-5}$                 | 0,004                                | 185...290  | 5,0   |
|              | $1 \cdot 10^{-4}$                 | 0,008                                | 180...280  | 3,0   |
|              | $2 \cdot 10^{-4}$                 | 0,070                                | 180...280  | 1,5   |

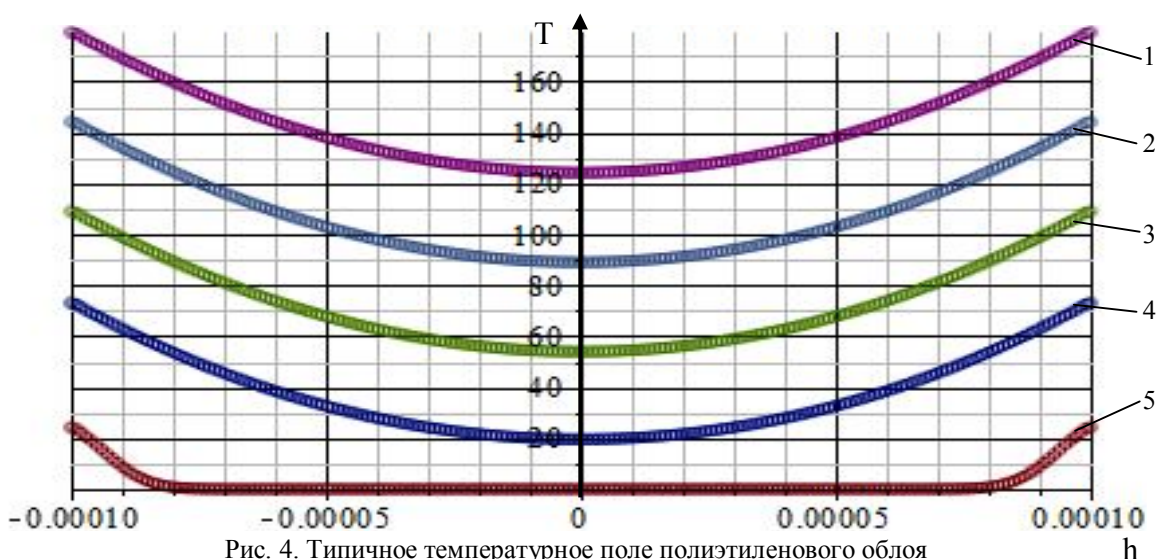


Рис. 4. Типичное температурное поле полиэтиленового облоя  
Время обработки  $\tau = 10^{-1}$  с;  $2h = 2 \cdot 10^{-4}$  м



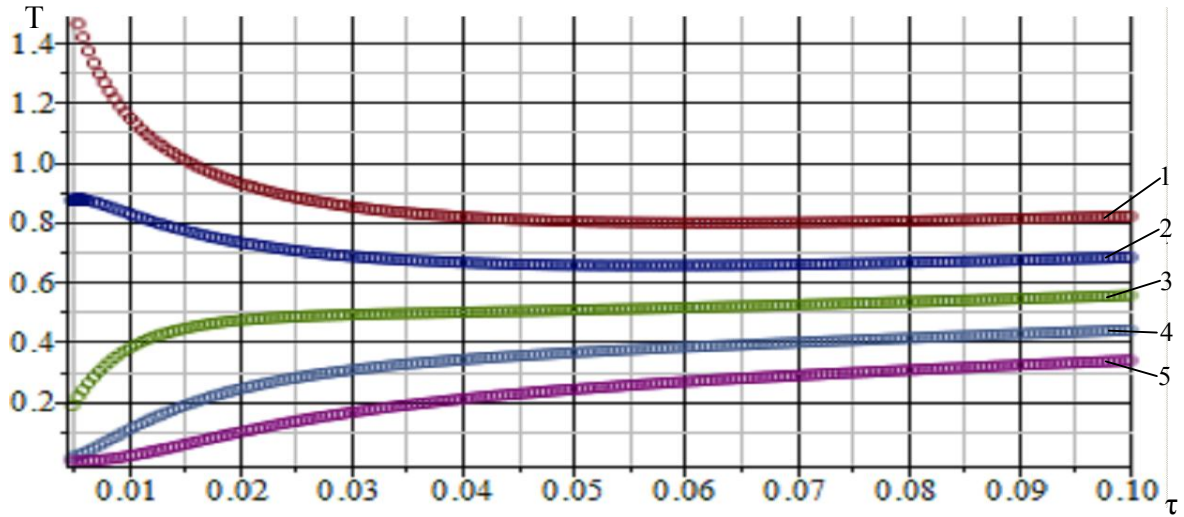
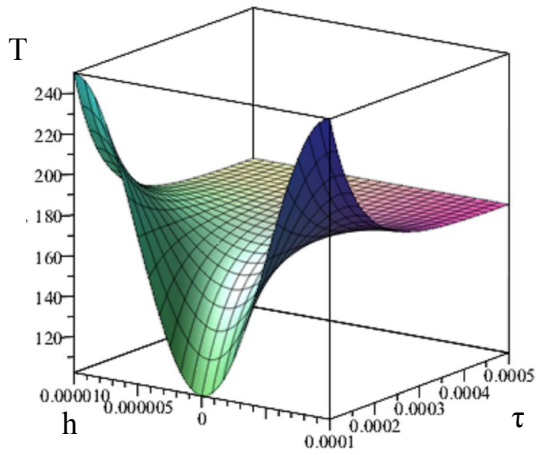
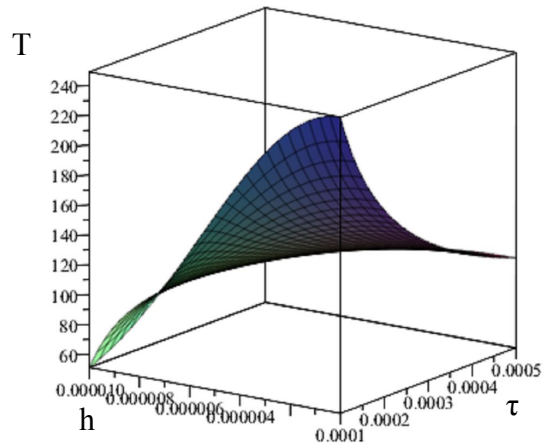


Рис. 5. Типичное температурное поле массива детали  
 Время обработки  $\tau = 10^{-1}$  с;  $h = 10^{-4}$  м



а



б

Рис. 6. Температурные поля облоя (а) и поверхности детали (б) при интенсивном нагреве

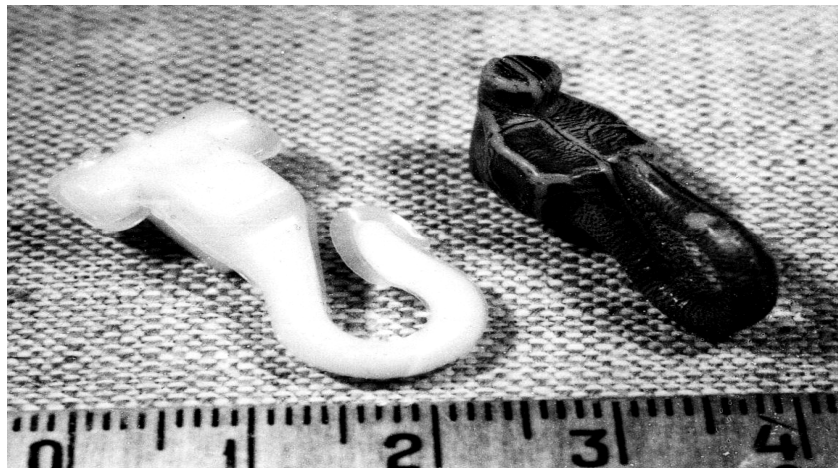


Рис. 7. Детали до и после интенсивной обработки с перегретой поверхностью

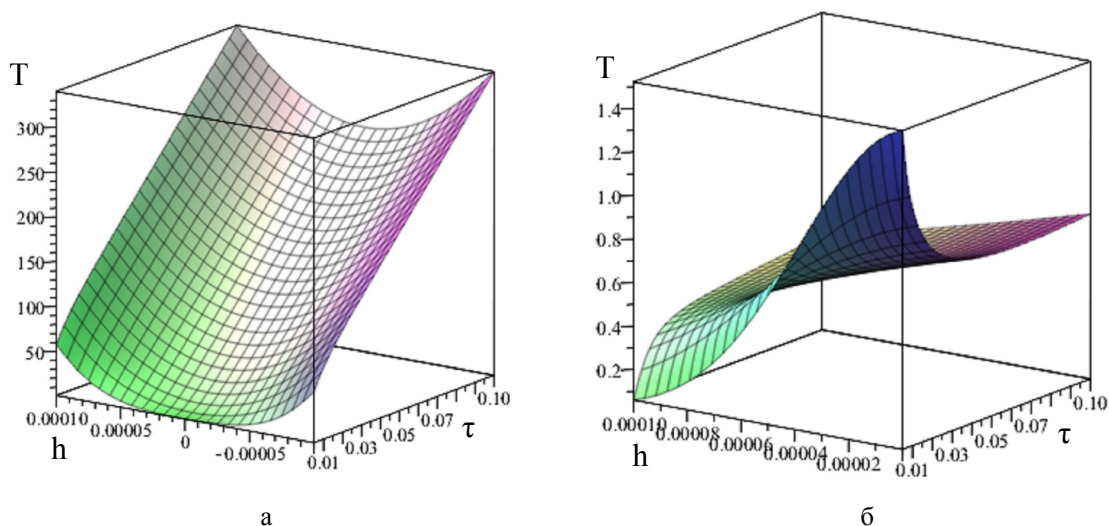


Рис. 8. Температурные поля обля (а) и поверхности детали (б) при квазипостоянном нагреве



Рис. 9. Детали до и после обработки на оптимальном режиме при квазипостоянном нагреве

### Заключение

Исследование температурных полей заусенцев и теплонапряженных элементов детали, а также влияния мощности и типа источника тепла на объект позволяет установить:

- взаимосвязь энергоемкости процессов нагрева с теплофизическими свойствами материалов;
- оптимальный режим нагрева ликвидов по времени;
- характеристику источника тепла, исходя из геометрии заусенцев, тонкостенных элементов детали и теплофизических свойств материалов;

- оптимальные режимы обработки деталей с учетом свойств материала и геометрических размеров удаляемых и сохраняемых элементов конструкции.

### Литература

1. Мусаев, Р. Ш. Совершенствование технологии зачистной обработки деталей из термопластов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Руслан Шабанович Мусаев. – Пенза, 2009. – 138 с.
2. Лосев, А. В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08;

защищена 27.06.1995; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.

3. Лосев, А. В. Теоретический анализ термоимпульсного удаления заусенцев с деталей [Текст] / А. В. Лосев // Импульсная обработка металлов давлением. – Х.: ХАИ, 1997. – С. 43 - 49.

4. Методика назначения режимов термоимпульсной зачистки деталей из термопластов

[Текст] / С. И. Планковский, А. Н. Мещеряков, О. В. Штупль, В. Л. Малащенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2013. – Вып. 76. – С. 94 – 103.

Поступила в редакцию 11.03.2014, рассмотрена на редколлеии 12.03.2014

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ОБЛОЮ З ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТЕРМОПЛАСТИВ

*В. Л. Малащенко, О. М. Мещеряков, А. А. Коростельова, О. В. Лосев*

У статті наведено фізико - математичні моделі процесів нагріву облою і масиву деталі джерелом тепла постійної потужності та результати досліджень нагріву моделей ліквідів і масиву деталей з поліетилену і поліпропілену. Теоретично встановлено оптимальну щільність теплового джерела і час його впливу на деталі при оплавленні облою різної товщини. Представлено експериментальні дослідження термоімпульсного процесу видалення облою з поліетиленових деталей при використанні джерел тепла з різними технічними характеристиками: великою потужністю і коротким впливом і відносно малою потужністю, але тривалим нагріванням, які повністю підтверджують розрахункові параметри обробки.

**Ключові слова:** зкруглення кромки, термоімпульсний процес, температурне поле, теплофізичні властивості матеріалів, облой, термопластик.

## THE RESERCH DEFLASHING PROCESS FROM THE THERMOPLASTIC WORKPIECE

*V. L. Malashenko, A. N. Mehscheryakov, A. A. Korostelyova, A. V. Losev*

The paper presents physical and mathematical models of the flash and the workpiece heating by the constant power heating source. The results of the studies for polyethylene and polypropylene workpieces are given. The optimal heat flow rate and exposure time at melting of flash with different thickness are given theoretically. The experimental studies of the thermal – pulse deflashing process from plastic workpieces using heat sources with different characteristics: high power and short exposure and relatively low power, but prolonged heating, that fully confirm the design parameters of the processing are represented.

**Key words:** rounding edges, thermal - pulse process, temperature field, thermal and physical properties of materials, flash, thermoplastic.

**Малащенко Владимир Львович** – ст. преподаватель каф. технологии самолетостроения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: k104@khai.edu.

**Мещеряков Александр Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, профессор каф. технологии самолетостроения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Коростелева Алла Антоновна** – научный сотрудник каф. технологии самолетостроения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Лосев Алексей Васильевич** - канд. техн. наук, ст. научный сотрудник каф. технологии самолетостроения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.