

Математическое моделирование напряженного состояния деталей военной техники при детонационной очистке

*Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Одной из основных проблем определения термонапряженного состояния деталей военной техники при детонационной очистке является определение размера элементов расчетной сетки, необходимого для получения достаточно точного с практической точки зрения решения. В настоящей работе для этого был предложен подход, основанный на настройке расчетной модели по задаче, для которой использовалось точное аналитическое решение для компонент напряжений и приближенное решение уравнения теплопроводности. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что предложенный подход к определению размера элементов в поверхностном слое деталей может быть использован при расчете термических напряжений, возникающих при детонационной очистке.

Ключевые слова: детонационная очистка, математическое моделирование, термические напряжения.

Введение

Детонационная очистка сопровождается быстрым интенсивным нагревом поверхности деталей, что чревато необратимыми побочными эффектами. Во-первых, сильный нагрев приводит к большим градиентам температур и, как следствие, к большим термомеханическим напряжениям. Температурные напряжения при быстром нагревании могут вызвать внутренние растрескивания, которые приводят к существенной деградации механических свойств детали. Во-вторых, в зоне нагрева возможно возникновение остаточных напряжений, при охлаждении могут привести к растрескиванию поверхностных слоев. В-третьих, остаточные пластические деформации могут привести к значительным искажениям формы элемента конструкции [1].

Все эти явления способны спровоцировать, например, повышенный износ материала. С учетом одновременного действия на детали интенсивных тепловых потоков и высокого давления для оценки величины возникающих напряжений и возможности появления указанных дефектов необходимо решать задачу расчета термонапряженного состояния. Особенно важным проведение таких расчетов является для случая очистки деталей при ремонте военной техники, поскольку в результате эксплуатации в поверхностном слое деталей могут возникнуть дефекты. Их величина, определенная в ходе контроля состояния, может быть допустимой для безопасной эксплуатации, однако при воздействии на такие детали ударных волн в процессе детонационной очистки может произойти развитие трещин, из-за чего деталь станет непригодной для дальнейшего использования [2].

С учетом быстротечности протекающих процессов, а также высокого уровня давлений и температур при детонационной очистке основой для оценки термонапряженного состояния принято численное моделирование. Одной из основных проблем решения данной задачи является определение размера элементов расчетной сетки, необходимого для получения достаточно точного с практической точки зрения решения. Поэтому целью настоящей статьи является разработка математической модели оценки термонапряженного состояния деталей военной техники в процессе детонационной очистки.

Математическая модель напряженного состояния деталей при детонационной очистке

Изменение температуры тела может происходить не только за счет нагрева, но и за счет его деформирования. При интенсивном внешнем нагружении, проходящем с большой скоростью, возникает эффект связанности, когда деформации и температура тела взаимно зависят друг от друга. Однако в такой постановке задачи расчета термонапряженного состояния рассматриваются только при импульсном нагреве или ударном нагружении упругого тела, например, при локальном лазерном или электронно-лучевом нагреве, ударном взаимодействии тел при высоких скоростях столкновения и др. В подавляющем количестве практически важных приложений задача расчета термонапряженного состояния рассматривается в упрощенной постановке, что предполагает использование следующих допущений [3].

Упругость. Рассматриваются только хрупкие тела, т.е. тела, которые вплоть до разрушения не проявляют существенных пластических свойств. Для детонационной очистки время действия тепловых потоков на поверхности обрабатываемой детали не превосходит величины порядка 0,1 с, а для большинства случаев имеет порядок 0,01 с. За такое малое время взаимодействия с продуктами сгорания поверхность деталей не успевает прогреться более чем на 100...150°C. В этих условиях металлы не успевают проявить свои пластические свойства и их поведение может быть описано упругими соотношениями.

Однородность и изотропность. Рассмотрение однородного и изотропного материала связано с попыткой выяснения основных причин и закономерностей разрушения тел при поверхностном нагреве. Механические свойства поверхностного слоя металлических деталей (твердость, предел текучести) отличаются от свойств внутренних областей. Однако это практически не относится к таким характеристикам как модуль упругости, коэффициент Пуассона или коэффициент линейного термического расширения, что позволяет использовать допущение об однородности при расчете термонапряженного состояния при детонационной очистке.

Квазистатика. Квазистатическая постановка, не учитывающая в уравнениях равновесия инерционные члены, означает, что нестационарность напряжений в теле обусловлена только нестационарностью его нагрева. Для металлов скорость распространения упругих волн составляет тысячи метров в секунду. Для максимальных размеров деталей порядка сотен миллиметров и толщин до десятков миллиметров для характерного времени детонационной очистки, составляющего сотые или десятые доли секунды, можно считать, что возможное разрушение определяется квазистатическими, а не динамическими напряжениями.

Несвязность. Предположение о независимости температурного поля от вызываемых им деформаций, строго говоря, не совсем верно. При любом процессе деформирования выделяется или поглощается теплота, оказывающая влияние на распределение температуры. Однако, как показано во многих работах при обычной теплопередаче, происходящей в неравномерно нагретом теле за счет внешних источников тепла, влияние на температуру деформации пренебрежимо мало, и учет в уравнении теплопроводности связанного члена не меняет картину распределения напряжений.

При принятых допущениях система уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние деталей при детонационной очистке в квазистатической постановке несвязной теории термоупругости имеет вид [4]:

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \alpha_T \text{grad}(T) &= 0 \\ \nabla^2 T - \frac{1}{a} \dot{T} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где \vec{u} – вектор перемещений; λ , μ , α_T – коэффициенты Ляме и линейного термического расширения материала детали соответственно; a – коэффициент температуропроводности материала детали.

С учетом невысоких температур нагрева детали механические и теплофизические коэффициенты материала будем считать независимыми от температуры, что позволит решать задачу в линейной постановке.

С учетом действия на поверхность детали давления граничными условиями для системы уравнений (1) являются три уравнения равновесия вида [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_T E T}{1 - 2\nu} n_x + p n_x &= \lambda e n_x + \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} n_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} n_y + \frac{\partial u_x}{\partial z} n_z \right) + \\ &+ \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} n_x + \frac{\partial u_y}{\partial x} n_y + \frac{\partial u_z}{\partial x} n_z \right), \end{aligned} \quad (2)$$

и тепловой поток для уравнения теплопроводности

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q, \quad (3)$$

где n_x, n_y, n_z – направляющие косинусы нормали к поверхности детали; ν , E – коэффициент Пуассона и модуль Юнга материала детали.

Система уравнение (1)-(3) замыкается начальными условиями для компонент вектора перемещения и скорости, а также начального значения температуры. Без потери общности решения при линейной постановке задачи значения этих величин могут быть приняты равными нулю.

Достоинством постановки задачи расчета термонапряженного состояния в виде системы уравнений (1)-(3) является то, что ее решение может быть получено в два этапа: расчет нестационарного температурного поля при граничном условии (3) и расчет напряжений в детали, вызванных совместным действием нестационарного нагрева и давления на поверхности с граничным условием (2). Эти задачи решались численно с применением метода конечных элементов. Одной из основных проблем при этом является определение размера элементов расчетной сетки, необходимого для получения достаточно точного с практической точки зрения решения. Обычно эта задача решается путем проведения нескольких расчетов с изменяющимся характерным размером конечных элементов или проведения вычислений с использованием адаптивной сетки. В настоящей работе для этого предлагается использовать подход, основанный на настройке расчетной модели по задаче, для которой использовалось точное аналитическое решение для компонент напряжений и приближенное решение уравнения теплопроводности.

В качестве такой задачи была выбрана задача об определении напряженно-деформированного состояния, возникающего в длинном цилиндре в результате действия симметричного относительно центра поля температур. В этом случае ненулевыми являются только три компоненты напряжения: σ_r , σ_θ , σ_z которые при равной нулю осевой деформации определяются по выражениям [5]:

$$\sigma_r = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T r dr - p - \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right), \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T r dr - p + \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr - T \right), \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \left(\frac{2\nu}{R^2} \int_0^R T r dr - p - T \right), \quad (6)$$

где R – радиус цилиндра; p – давление на цилиндрической поверхности.

Покажем, как решения (4)-(6) могут быть использованы для настройки расчетной модели по определению термонапряженного состояния при детонационной очистке.

Для этого воспользуемся методом приближенного решения задач теплопроводности, предложенным в работе [6]. Привлечение данного метода связано с тем, что применение точных аналитических решений для распределения температуры даже в случае тел канонической формы приводит к сложным выражениям для определения компонент напряжений по зависимостям типа (4)-(6).

Согласно приближенному методу, изложенному в [6] нестационарное распределение температур в нагреваемом теле строится с привлечением понятия прогретого слоя. Процесс нагрева тела разделялся на две стадии: проникновение тепла в глубину тела и изменение температуры по всему его объему одновременно. Для детонационной очистки, характеризующейся крайне малым временем теплообмена обрабатываемых деталей с продуктами сгорания, процесс нагрева может быть ограничен только первой стадией. В этом случае действительная кривая распределения температуры в теле заменяется параболой n -го порядка:

$$T = (T_n - T_0) \left(\frac{y}{X} \right)^n + T_0, \quad (7)$$

где T_n, T_0 – температура поверхности и начальная температура тела; X – текущая глубина прогрева тела, для которой выполняется условие $T = T_0$; y – координата, от точки, находящейся на глубине X (рис. 1).

При помощи граничного условия (3) можно исключить разность температур из выражения (7) с учетом того, что координата y при этом совпадает с направлением нормали к поверхности:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Pi} = \lambda n \frac{T_{\Pi} - T_0}{X},$$

с учетом чего (7) преобразуется к виду

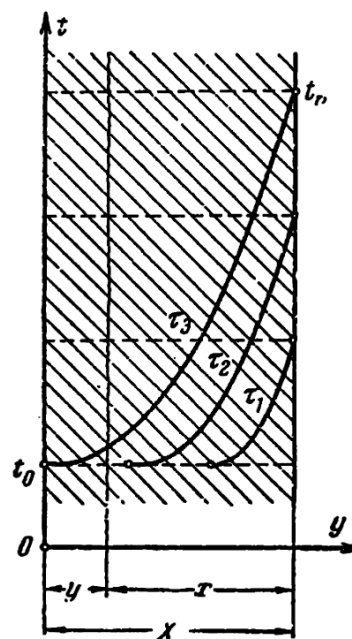


Рис. 1. Приближенное распределение температуры в сечении прогретого слоя в различные моменты времени $\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$ [6]

$$T = \frac{1}{n} \frac{q}{\lambda} \frac{y^n}{X^{n-1}} + T_0.$$

Для случая цилиндра радиусом R последнее выражение может быть преобразовано к виду

$$T = \frac{1}{n} \frac{q}{\lambda} \frac{(X - R + r)^n}{X^{n-1}} + T_0. \quad (8)$$

Выражение (8) по способу построения описывает распределение температуры только в прогревом слое, для того, чтобы доопределить его во всей остальной части цилиндра его можно записать в виде:

$$T = \frac{1}{n} \frac{q}{\lambda} \frac{(X - R + r)^n}{X^{n-1}} H(H(r - R + X) - 0.25) + T_0, \quad (9)$$

где H – функция Хевисайда.

Из условия баланса тепла для определения относительной величины прогреваемого слоя $\Delta = X / R$ может быть получено уравнение [6]:

$$Fo = \frac{1}{n(n+1)} \left(1 - \frac{1}{n+2} \Delta \right) \Delta^2, \quad (10)$$

где $Fo \equiv a\tau / R^2$ – критерий подобия Фурье.

В работе [6] для показателя степени в уравнении (7) рекомендовано значение $n=2$. Такое значение было получено для теплообмена с низкими и средними величинами теплового потока. Для случая детонационной очистки величины удельных тепловых потоков обычно имеют порядок 10^7 Вт/м², а иногда могут достигать величин порядка 10^8 Вт/м². Поэтому в настоящей работе для установления величины показателя степени в приближенном решении для поля температур при детонационной очистке решалась дополнительная задача теплопроводности для бесконечно длинного цилиндра, на поверхность которого действует равномерно распределенный тепловой поток заданной интенсивности. Задача решалась для ряда материалов, используемых для изготовления деталей агрегатов военной техники и вооружений. На рис. 2 показаны сетка конечных элементов и типичное распределение температур, получаемое в ходе решения задачи нестационарного нагрева цилиндра.

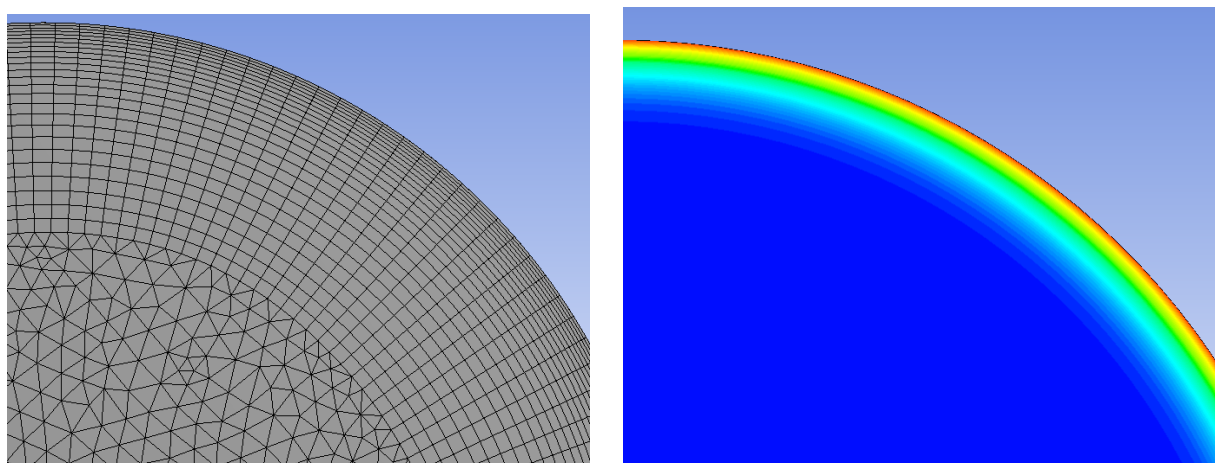


Рис. 2. Расчетная сетка (слева) и распределения температур (справа) в неограниченном цилиндре при нагреве равномерно распределенным потоком

На рис. 3 сплошной линией показаны типичные графики распределения температуры в поверхностном слое для одного из исследованных материалов для разных значений удельного теплового потока. Для сравнения маркерами показано распределение температур в прогретом слое, полученные по зависимости (8). При построении графиков по данной зависимости использованы значения теплофизических характеристик алюминиевых сплавов [7] и некоторых сталей [8], используемых для производства агрегатов военной техники и деталей вооружений. Результаты определения степени параболы для приближенной зависимости температуры в прогретом слое для этих материалов приведены в табл. 1. Данные таблицы показывают, что принятое в работе [6] значение степени $n=2$ для исследованной группы материалов является заниженным. Более точной оценкой величины этой степени является значение 4,43 (получено как величина математического ожидания для показателей степени, приведенных в табл. 1). Полученные значения в дальнейшем использовались для определения толщины прогретого слоя по заданной величине критерия Фурье по зависимости (10). Расчет производился по методу Ньютона. Глубина прогретого слоя для характерного в случае детонационной очистки времени действия теплового потока 0,01 с составляла в среднем от 1 мм для сталей до 4,05 мм для алюминиевых сплавов, марки которых указаны в таблице. Полученное таким образом значение толщины прогретого слоя использовалось для задания величины приграничного слоя при построении расчетных сеток для задач расчета термонапряженного состояния. Величина конечного элемента в прогретом слое выбиралась из условия, чтобы в слое располагалось, по крайней мере, 25 элементов.

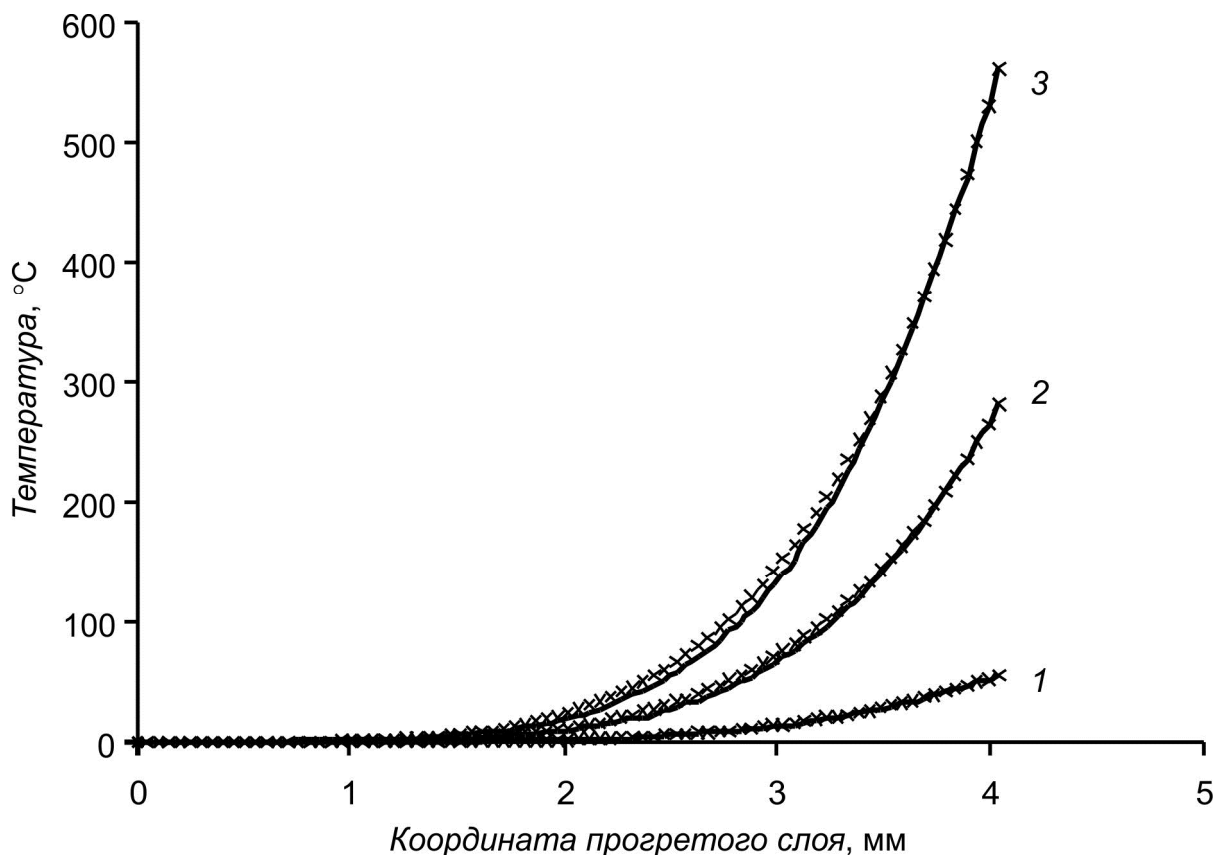


Рис. 3. Зависимость температуры по глубине прогретого слоя ($t = 0,01$ с, мат. Ал9):
 1 – $q = 10^7$ Вт/м²; 2 – $q = 5 \cdot 10^7$ Вт/м²; 3 – $q = 10^8$ Вт/м²

Таблица 1.

Результаты определения степени параболы для приближенной зависимости температуры в прогретом слое для некоторых материалов, применяемых для изготовления агрегатов военной техники

Материал	λ , Вт/м·К	c , Дж/кг·К	ρ , кг/м ³	n
AK9ч (Ал4)	105,0	962,3	2770,0	4,207
AK5M (Ал5)	155,6	962,3	2711,8	4,431
AK7ч (Ал9)	159,1	962,3	2684,6	4,515
AK10M2H	160,0	960,0	2685,0	4,450
15X23H18Л	16,0	503,0	8025,0	4,530
12X18H9ТЛ	16,0	510,0	7830,0	4,505
14X17H2Л	18,3	460,2	7752,7	4,362

Заклучение

Проверочный численный расчет значений компонент термоупругих напряжений, вызванных действием равномерно распределенного по поверхности цилиндра теплового потока и полем температур, а также сравнение его с аналитическими решениями (4), (5), (6) при таком выборе размера элементов показало, что максимальная погрешность численного моделирования не превышает 3,7%. Это позволяет сделать вывод о том, что предложенный подход к определению размера элементов в поверхностном слое деталей может быть использован при расчете термических напряжений, возникающих при детонационной очистке.

Список литературы

1. Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии [Текст]: монография / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, А.О. Гарин [и др.]. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 189 с.
2. Аналіз термічних напружень в деталях агрегатів літальних апаратів при термоімпульсній обробці [Текст] / О.В. Шипуль, В.Б. Минтюк, Д.А. Брега, С.О. Крицкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Харьков, 2016. – Вып. 72. – С. 77 – 90.
3. Колодко, А.Я. Разрушение твердых тел при поверхностном нагреве [Текст]: дис. ... канд. ф.-м. наук : 05.02.04 : защищена 17.12.1984 : утв. 14.02.1984 / Колодко Александр Яковлевич. – Новосибирск, 1984. – 142 с.
4. Коваленко, Д.А. Основы термоупругости [Текст] / Д.А. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 307 с.
5. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст]: пер. с англ. / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1978. – 560 с.
6. Вейник, А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности [Текст] / А.И. Вейник. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 183 с.
7. Белецкий, В.М. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение) [Текст]: справ. / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов ; под общей ред. И.Н. Фридляндера. – Киев: Коминтех, 2005. – 365 с.

8. Приданцев, М.В. Конструкционные стали [Текст]: справ. / М.В. Приданцев, Л.Н. Давыдова, И.А. Тамарина. – М.: Metallurgy, 1980. – 288 с.

Поступила в редакцию 20.09.2016

Математичне моделювання напруженого стану деталей військової техніки при детонаційній очистці

Однією з основних проблем визначення термонапруженого стану деталей військової техніки при детонаційній очистці є визначення розміру елементів розрахункової сітки, необхідних для отримання достатньо точного з практичної точки зору рішення. У даній роботі для цього був запропонований підхід, заснований на налаштуванні розрахункової моделі по задачі, для якої використовувався точний аналітичний розв'язок для компонент напружень і наближене рішення рівняння теплопровідності. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що запропонований підхід до визначення розміру елементів в поверхневому шарі деталей може бути використаний при розрахунку термічних напружень, що виникають при детонаційній очистці.

Ключові слова: детонаційна очистка, математичне моделювання, термічні напруження.

Mathematical Modeling of the Military Technique Parts Stress State During the Detonation Cleaning

One of the main problems of determining the thermal stress state of military technique parts during detonation cleaning is determine the size of the computational grid elements, which required obtaining a sufficiently accurate solution from a practical point of view. Approach based on configuring the computational model for the task which use the exact analytical solution for the stress components and an approximate solution of the heat equation was proposed in this paper. These results lead to the conclusion that the proposed approach to determining the size of the elements in the surface layer of parts can be used in the calculation of thermal stresses arising during the detonation cleaning.

Keywords: detonation cleaning, mathematical modeling, thermal stress.

Сведения об авторах:

Кузнецов Игорь Борисович – канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника института оперативного обеспечения и логистики, Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского, Украина.

Цегельник Евгений Владимирович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

Шипуль Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.