

ВЫБОР СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ И КРИТЕРИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

Термоимпульсная обработка по производительности и возможностям автоматизации существенно превосходит остальные методы финишной очистки и отделки поверхностей и кромок высокоточных деталей сложной формы [1]. Особенно ярко преимущества данной технологии проявляются в случае обработки корпусов агрегатов авиационных двигателей. В этом случае при выполнении одной операции удается совместить задачи отделки кромок и очистки внутренних полостей от микрочастиц.

Вместе с тем ряд зарубежных исследователей указывает, что при термоэнергетической обработке, в которой так же, как и в термоимпульсной, в качестве инструмента используются продукты сгорания газовых смесей, возможно образование поверхностных трещин. Это относится как к деталям, получаемым из литых заготовок, так и к закаленным стальным деталям с твердостью более 40 HRC [1 – 3].

До настоящего времени вопросы прочностных ограничений режимов термоимпульсной и термоэнергетической обработки системным образом не рассматривались. В то же время отмеченные преимущества таких методов обработки и связанные с этим перспективы их промышленного использования делают данную задачу актуальной.

Задачи моделирования поверхностного разрушения тел при импульсном нагреве исследовались в ряде работ, посвященных исследованию процессов закалки, лазерной обработки хрупких материалов, разрушения горных пород (например, [4 – 6]). Во всех таких работах эти задачи рассматриваются в упрощенной постановке, предполагающей принятие ряда допущений.

Чаще всего задача рассматривается в упругой постановке, при этом принимается допущение об однородности и изотропности материала. Теплофизические коэффициенты считаются независимыми от температуры или эта зависимость принимается в виде, допускающем аналитическое решение задачи теплопроводности. В подавляющем большинстве случаев рассматривается несвязанная задача расчета термонапряженного состояния, что позволяет разделить решения задач теплопроводности и расчета НДС.

Целью настоящей работы являлась оценка применимости данных допущений для случая термоимпульсной обработки и построение на этой основе математической модели для определения прочностных

ограничений ее режимов по условию отсутствия поверхностных разрушений.

1. Обоснование выбора системы определяющих уравнений

Для расчета напряженного состояния деталей при термоимпульсной обработке необходимо выбрать вид системы уравнений, которые будут использоваться в качестве определяющих.

В настоящее время в задачах о расчете напряжений, вызванных нестационарным поверхностным нагревом в условиях отсутствия объемных сил и источников тепла, они используются в четырех постановках [7]:

- связанная динамическая задача

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0) - \\ - \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0; \\ \nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{(3\lambda + 2\mu) \alpha_T T_0}{\lambda} \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \vec{u} = 0; \end{aligned} \right\} (1)$$

- связанная квазистатическая задача

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0) = 0; \\ \nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{(3\lambda + 2\mu) \alpha_T T_0}{\lambda} \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \vec{u} = 0; \end{aligned} \right\} (2)$$

- несвязанная динамическая задача

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0) - \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0; \\ \nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0; \end{aligned} \right\} (3)$$

- несвязанная квазистатическая задача

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0) = 0; \\ \nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0; \end{aligned} \right\}, (4)$$

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

Выбранная для расчета система уравнений замыкается начальными условиями: нулевыми значениями для компонент вектора перемещения и скорости, а также начальными значениями напряжений и температуры.

Для обоснования выбора системы уравнений методом конечных элементов решена тестовая задача определения напряженного состояния в бесконечном цилиндре под действием равномерно распределенного по поверхности теплового потока. Такой выбор был сделан из-за того, что для данной задачи в упругой постановке известны аналитические решения, позволяющие оценить достоверность полученных результатов [7].

Задача решалась для четверти тонкого диска, представляющего собой часть бесконечного цилиндра с толщиной, равной величине тетраэдрического конечного элемента. На внешней поверхности при построении сетки создавались слои из призматических элементов. Их суммарная толщина выбиралась приблизительно равной глубине прогретого слоя цилиндра. Радиальный размер элемента выбирался таким, чтобы по глубине прогретого слоя располагалось не менее 15 элементов.

Для достоверной оценки термонапряженного состояния не менее важным, чем обоснованный выбор определяющих уравнений, является выбор модели материала. Для этого следует учесть, что динамический характер нагружения и нагрев являются существенными факторами, игнорирование которых может привести к ошибочным выводам при оценке возникающих напряжений и деформаций при термоимпульсной обработке. Влияние этих факторов на поведение материала является разнонаправленным: при динамическом нагружении предел текучести возрастает, а при нагреве, наоборот, падает. Поэтому модели, описывающие поведение материала при термоимпульсной обработке, должны учитывать оба эти явления.

Наиболее популярными моделями, применяющимися для исследования процессов нестационарного нагружения, являются: уравнения билинейного упрочнения, Купер – Саймондс, Джонсон – Кук и Зерилли – Армстронг (табл. 1).

Наиболее простым из этого перечня является уравнение билинейного упрочнения, которое в базовой формулировке не учитывает ни влияния скорости деформации на предел текучести, ни температурные эффекты. Учет влияния температуры при численной реализации может быть произведен путем задания предела текучести в табличном виде для заданных ее значений. В этом случае значения предела текучести

для промежуточных значений температуры могут быть получены путем интерполяции.

Такой способ учета влияния температуры является несколько искусственным, однако в какой-то мере позволяет учесть данный фактор. С учетом такой возможности в сравнительной табл. 1 для модели билинейного упрочнения поставлена промежуточная оценка возможности учета температурных эффектов (\pm).

Таблица 1 – Определяющие уравнения модели материала

Тип модели	Определяющее уравнение	Константы материала	Возможности учета	
			Скорости деформации	Температура
Билинейного упрочнения	$\sigma = \sigma_S + \Pi \varepsilon$	σ_S, Π	–	\pm
Купер – Саймондс	$\sigma = \sigma_S \left(1 + \left(\dot{\varepsilon} / D \right)^{1/p} \right)$	σ_S, D, p	+	\pm
Джонсон – Кука	$\sigma = \left(\sigma_S + B \varepsilon^n \right) \times \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon} \right) \left(1 - T^* m \right)$	σ_S, B, n, C, m	+	+
Зерилли – Армстронг	$\sigma = \sigma_S + C_1 \varepsilon^n \times \exp \left(-C_2 T + C_3 T \ln \dot{\varepsilon} \right)$	$\sigma_S, C_1, C_2, C_3, n$	+	+

Этот же прием может быть использован в случае применения модели Купера – Саймондса. Зависимость предела текучести от скорости деформации в этой модели учитывается в явной форме, а недостатком модели является то, что её коэффициенты принимают различные значения при разных напряжениях, что затрудняет ее практическое применение.

Модели Джонсона – Кука и Зерилли – Армстронга учитывают и скоростной и температурный факторы, значимые при определении НДС при термоимпульсной обработке. Однако модель Джонсона – Кука имеет меньше параметров, для определения которых требуется проведение экспериментальных исследований. Такие исследования проведены для большого числа материалов, применяемых в производстве прецизион-

ных деталей. Эти результаты общедоступны и могут быть легко интегрированы в современные пакеты расчетов методом конечных элементов.

Для решения тестовой задачи применялся пакет ANSYS Workbench 17.1. В его базовой версии достаточно легко реализуются расчеты для случая несвязанной квазистационарной задачи термоупругости. Проект представлял собой последовательность двух задач – нестационарной теплопроводности при действии равномерно распределенного по поверхности цилиндра удельного теплового потока $q = 1 \cdot 10^7$ Вт/м² в течение 0,1 с и стационарной задачи механики. Конечное распределение температуры в теле, соответствующее моменту окончания нагрева, передавалось в модуль расчета НДС в качестве начальных условий.

Численная реализация других систем уравнений в базовой версии пакета связана с существенными трудностями. Поэтому для решения указанных задач использовались расширения ANSYS ACT. Для реализации динамической несвязанной задачи использовалось расширение FSI Transient [8], а для квазистационарной связанной задачи – Coupled field [9]. При использовании расширения FSI Transient для расчета НДС применялся модуль Transient Structural, в который из модуля расчета задачи нестационарной теплопроводности по временным шагам передавались распределения температуры в цилиндре (в тестовой задаче использовалось 50 временных шагов).

В результате выполнения расчетов было установлено, что для принятой тепловой нагрузки решения во всех приведенных выше постановках дают практически одинаковые результаты – разница в значениях напряжений составляет менее 2%. В то же время решения задач в динамических и связанных постановках потребовало в десятки раз больше времени. Это позволяет рекомендовать для расчета НДС деталей при термоимпульсной обработке модель несвязанной квазистационарной механики деформируемого твердого тела.

Важность адекватного выбора модели материала для расчета термонапряженного состояния иллюстрируют результаты расчетов эквивалентных напряжений, полученные при использовании двух моделей – билинейного упрочнения и Джонсона-Кука (рис. 1). Результаты получены при последовательном решении двух задач: нагрева диска равномерно распределенным удельным тепловым потоком интенсивностью $1 \cdot 10^7$ Вт/м² в течение 0,1 с и расчета полей напряжений, вызванного полученным в результате нагрева неравномерным полем температур. Значения напряжений даны в точках, расположенных на радиусе цилиндра по глубине прогретого слоя. Начало координат располагается в точке, находящейся на расстоянии 5 мм от нагреваемой поверхности.

Результаты моделирования показали, что игнорирование влияния скорости деформации на величину предела текучести материала может

привести к существенным погрешностям при оценке термонапряженного состояния. Так, например, результаты, полученные для материала Д16 при использовании модели билинейного упрочнения, позволяют сделать вывод о том, что при заданных условиях нагрева в цилиндре в поверхностном слое толщиной до 0,7 мм возникают напряжения текучести. При использовании модели Джонсона – Кука превышение предела текучести не наблюдалось (рис. 1), что соответствует многочисленным экспериментальным данным по термоимпульсной обработке деталей из алюминиевых сплавов.

Таким образом, учет зависимости предела текучести материала от скорости деформации и температуры является условием достоверности результатов расчета НДС детали при термоимпульсной обработке.

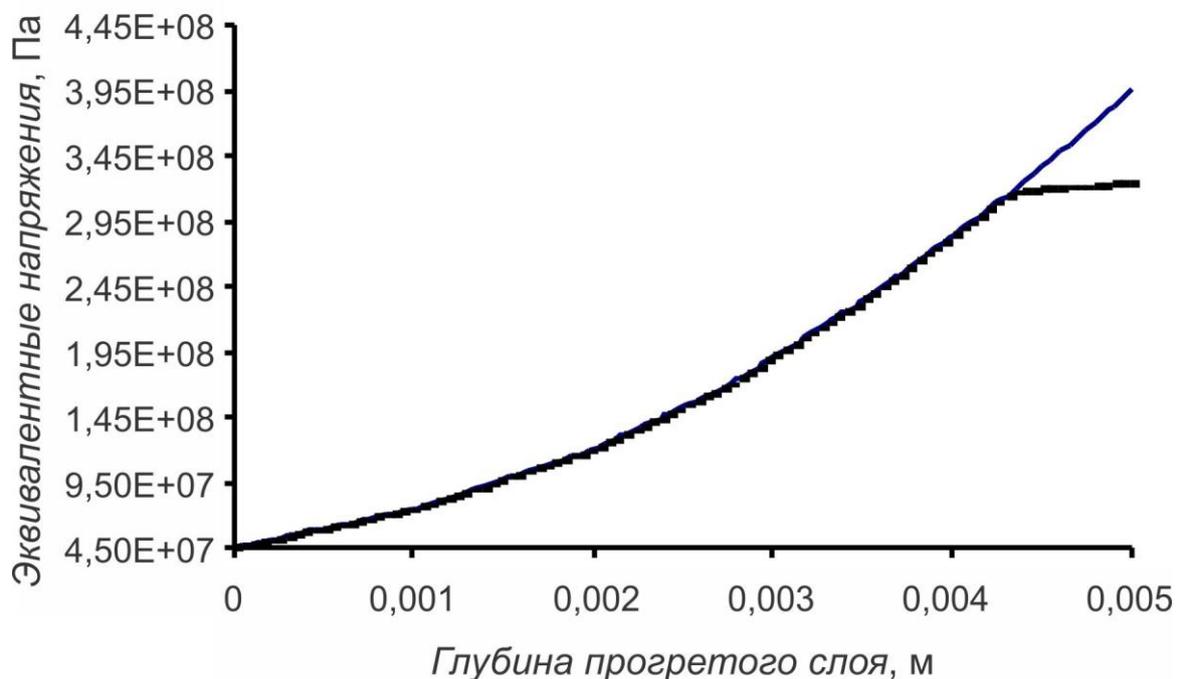


Рисунок 1 – Распределение эквивалентных напряжений по глубине прогретого слоя при использовании различных моделей материала

2. Выбор критерия поверхностного разрушения

В работах, посвященных исследованию разрушения при неравномерном поверхностном нагреве причины этого явления сводятся к трем гипотезам [4]:

- разрушение начинается с нагреваемой поверхности согласно теориям прочности Кулона – Мора по нормальным сжимающим или максимальным касательным напряжениям;
- разрушение начинается внутри тела за счет действия нормальных растягивающих напряжений;
- разрушение начинается за счет растягивающих напряжений, а

на заключительном этапе происходит потеря устойчивости сжатого поверхностного слоя.

Указанные подходы не учитывают того, что при термоимпульсной обработке в поверхностном слое возникает сложное НДС. В таких случаях для определения возможности разрушения металла в качестве критерия разрушения целесообразно использовать функцию, введенную В.Л. Колмогоровым – степень использования ресурса пластичности.

Аналитическое определение степени использования ресурса пластичности при определенной схеме напряженного состояния материала как отношения значения накопленной деформации в точке деформируемого объема к значению предельной деформации, предшествующей разрушению заготовки в соответствующий момент времени, является решением задачи анализа предельного формоизменения.

Согласно теории В.Л. Колмогорова способность тела выдерживать необходимое формоизменение без разрушения оценивается с помощью параметра

$$\Psi(\Omega) = \frac{\varepsilon_j(\Omega, t, \Pi_\sigma)}{\varepsilon_p(\Pi_\sigma)}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_j = \int_0^t d\varepsilon_j$ – накопленная в точке интенсивность пластической деформации; ε_p – предельная деформация, которую способен выдержать материал; Ω – деформируемый объем металла; Π_σ – показатель схемы напряженного состояния.

При этом используют предположение о существовании единой при определенной температуре и для различных напряженных состояний диаграммы пластичности сплава + зависимость предельной характеристики материала заготовки ε_p от показателя схемы напряженно-деформированного состояния. В качестве показателя схемы напряженно-деформированного состояния в каждой точке тела из области Ω может быть принята величина $\Pi_\sigma(\Omega)$, определяемая отношением:

$$\Pi_\sigma(\Omega) = \frac{I_1(T_\sigma(\Omega))}{\sqrt{3I_2(D_\sigma(\Omega))}} = \frac{\sigma_1(\Omega) + \sigma_2(\Omega) + \sigma_3(\Omega)}{\sigma_j(\Omega)}, \quad (6)$$

где $I_1(T_\sigma)$ – первый инвариант тензора напряжений, представляющий собой гидростатическое давление, оказывающее существенное влияние на пластичность; $I_2(D_\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений, учитывающий интенсивность касательных напряжений, определяющих

пластическое течение материала.

Условие разрушения в каждой точке тела может быть представлено в виде равенства $\varepsilon_i(\Omega, t, \Pi_\sigma) = \varepsilon_p(\Pi_\sigma)$ или с учетом соотношения (5) в виде

$$\Psi(\Omega) = 1. \quad (7)$$

При использовании данного условия для оценки возможности поверхностного разрушения при термоимпульсной обработке необходимо иметь данные о степени использования ресурса пластичности на предыдущих технологических операциях изготовления детали.

Степень истощения ресурса пластичности на предшествующих этапах изготовления детали может быть существенной. На рис. 2 приведены пути деформации точек с наибольшими значениями $\Psi(\Omega)$, полученными в [10] при сравнении различных вариантов изготовления фланца из алюминиевого сплава.

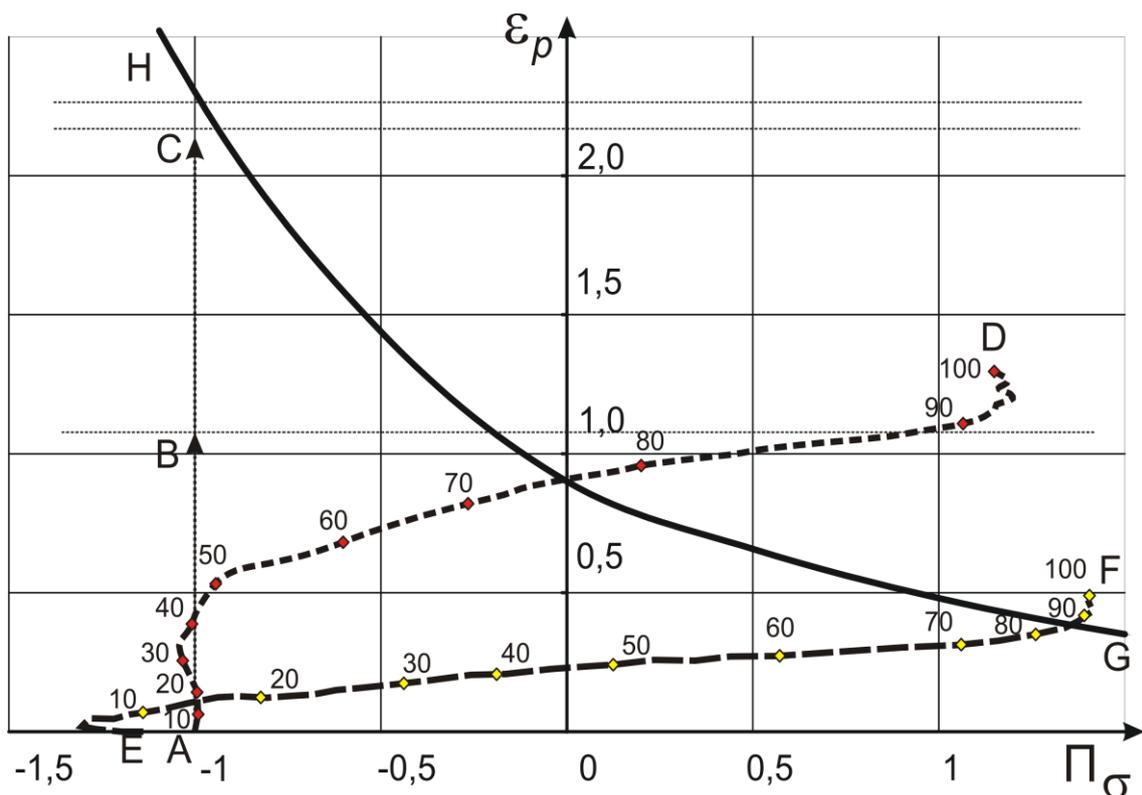


Рисунок 2 – Диаграмма пластичности сплава АК4-1 (HG) и пути деформации точек из областей разрушения поковок фланца, полученных поперечным (AD) и комбинированным (EF) выдавливаем

Из анализа подобного рода данных следует, что попытка максимального использования ресурса пластичности материала при изготовлении заготовок методом объемной штамповки может привести к ситуа-

ции, когда поверхностные слои будут находиться в состоянии близком к условию разрушения (7).

Последующая механообработка (фрезерование, сверление и т.п.) приведет к дополнительным пластическим деформациям поверхностного слоя. Напряжения и деформации, возникающие при механообработке, могут быть рассчитаны по многочисленным полуэмпирическим методикам, учитывающим параметры процессов резания, применяемые инструменты и другие параметры технологического процесса [11, 12 и др.].

Таким образом, для того чтобы использовать условие исчерпания ресурса пластичности при назначении режимов термоимпульсной обработки необходимо для каждого предшествующего этапа технологического процесса:

- определить напряженное состояние металла (главные напряжения и интенсивность напряжений);
- вычислить показатель схемы напряженного состояния $\Pi_{\sigma}(\Omega)$;
- определить интенсивность деформаций $\varepsilon_j(\Omega, t, \Pi_{\sigma})$;
- по имеющейся диаграмме пластичности материала детали определить степень использования ресурса пластичности $\Psi(\Omega)_{max}$.

На каждом из последующих этапов изготовления детали, связанным с пластическим деформированием поверхностного слоя должен рассчитываться путь деформации точки, для которой на предыдущем этапе достигнуто значение $\Psi(\Omega)_{max}$. Тогда расчет прочностных ограничений для термоимпульсной обработки будет производиться для точек поверхностного слоя с максимальным значением использования ресурса пластичности за всю цепочку изготовления детали.

В этом случае должны оцениваться исключительно пластические составляющие напряжений и деформаций. Это возможно только при использовании численного моделирования в среде пакетов МКЭ с учетом влияния скорости деформации и температуры на механические характеристики материала детали. Предельно допустимые режимы в этом случае определяются точкой пересечения траектории деформирования частицы металла в опасной зоне с диаграммой предельной пластичности сплава в системе координат $(\varepsilon - \Pi_{\sigma})$.

Выводы

1. На основе анализа результатов решения тестовых задач показано, что расчет НДС поверхностного слоя детали при термоимпульсной обработке может рассматриваться как несвязанная квазистационарная задача. При этом необходимо использовать модели материала, учиты-

вающие влияние скорости деформации и температуры на величину напряжения текучести.

2. Предложен подход для определения ограничений режимов термоимпульсной обработки при условии допустимости остаточных деформаций в поверхностном слое. Для учета технологической наследственности на предыдущих операциях изготовления детали предложено применять критерий использования ресурса пластичности. Предельно допустимые режимы термоимпульсной обработки в этом случае должны определяться точкой пересечения траектории деформирования точки с максимально использованным ресурсом пластичности $\Psi(\Omega)_{max}$ с диаграммой предельной пластичности материала в системе координат $(\varepsilon - \Pi_{\sigma})$.

Список использованных источников

1. Gillespie, L.K. Deburring and edge finishing handbook [Text] / L.K. Gillespie. – New York City: Industrial Press, 1999. – 404 p.
2. Kelley, D.G. Thermal Energy Deburring [Text] / D.G. Kelley, K. Schwarz. – Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1991. – 32 p. – Technical paper MR91-136.
3. Sonogo, R. Advances in TEM Technology [Text] / R. Sonogo. – Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1993. – 9 p. – Technical paper MR93-322.
4. Колодко, А.Я. Разрушение твердых тел при поверхностном нагреве [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.04 : защищена 17.12.1984 : утв. 14.02.1984 / Колодко Александр Яковлевич. – Новосибирск, 1984. – 142 с.
5. Краснова, П.А. Аналитическая модель разрушения хрупких материалов при интенсивном локальном нагреве [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.04 : защищена 17.06.2011 : утв. 14.10.2011 / Краснова Полина Андреевна. – Москва, 2011 – 110 с.
6. Юмашев, М.В. Задачи терморазрушения при быстром нагреве [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.04 : защищена 19.04.1985 : утв. 17.06.1985 / Юмашев Михаил Владиславович. – Москва, 1985. – 114 с.
7. Коваленко, Д.А. Основы термоупругости [Текст] / Д.А. Коваленко. – Киев: Наук. думка, 1970. – 307 с.
8. Gustafsson, M. FSI Transient documentation [Electronic resource] / M. Gustafsson. – Режим доступа: https://support.ansys.com/AnsysCustomerPortal/en_us/Downloads/Application+Library. – 15.03.2017.
9. Roche, D. Coupled field documentation [Electronic resource] / D. Roche, M. Senousy. – Режим доступа: https://support.ansys.com/AnsysCustomerPotal/en_us/Downloads/Application+Library. – 15.03.2017.
10. Шипуль, О.В. Технология многoperеходной закрытой штамповки

авиационных деталей из алюминиевых сплавов с оценкой ресурса пластичности [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 : защищена 25.01.2008 : утв. 17.04.2008 / Шипуль Ольга Владимировна. – Харьков, 2008. – 160 с.

11. Лебедев, В.Г. Некоторые соображения о механизме образования шлифовочных напряжений и трещин [Текст] / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка : зб. наук. пр. / Харків нац. техн. ун-т сільського госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків, 2011. – Вип. 115. – С. 218 – 225.

12. Инженерия поверхности деталей [Текст] / Колл. авт. ; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

Поступила в редакцию 03.04.2017.

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