

УДК 621.7.044.3

doi: 10.32620/aktt.2018.4.09

С. И. ПЛАНКОВСКИЙ, О. В. ШИПУЛЬ, Е. В. ЦЕГЕЛЬНИК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина***АЛГОРИТМ НАЗНАЧЕНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ПРОЧНОСТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

*Анализ применимости финишной термоэнергетической и термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями к различным деталям определяет необходимость учёта разрушающих факторов, которые в свою очередь являются предметом исследования, при назначении режимов обработки. Целью статьи является разработка алгоритма назначения режимов термоимпульсной обработки деталей с учётом прочностных ограничений. В этой связи, в качестве задач исследования проанализированы существующие методики назначения режимов обработки, в том числе уточняющие подходы. Рассмотрены наиболее вероятные факторы, влияющие на возможное разрушение деталей под действием термоимпульсных нагрузок и определена необходимость их комплексного учёта. Получены следующие результаты. Оценка возможности искажения формы детали в местах с минимальной толщиной стенки должна производиться по условию не достижения в опасных зонах в процессе обработки пластических деформаций металла. При определении максимального времени термоимпульсного воздействия при условии наличия остаточных деформаций в поверхностном слое детали обязательным является учёт анизотропии коэффициента линейного теплового расширения и применение модели Джонсона-Кука, определяющей динамический предел текучести материала. Возможности разрушения материала при исчерпании ресурса пластичности необходимо оценивать по критерию использования ресурса пластичности – отношение накопленной степени деформации к предельно допустимой при определённой схеме напряжённого состояния. Для деталей, имеющих структурную неоднородность, предложено оценивать возможность развития трещин из зон внутренних пор, определяя значения коэффициента интенсивности напряжений или  $J$ -интеграла и сравнивая их с критическими значениями. Сформулированы следующие выводы. Разработан алгоритм назначения режимов термоимпульсной обработки. Предложенный подход предусматривает согласованное определение энергетических характеристик оборудования необходимых для обработки деталей с заданными квалитетическими показателями и достаточных с позиции прочностных требований. Стабильность качества обработки должна обеспечиваться системами наполнения смеси, поджога и выпуска продуктов сгорания автоматизированного термоимпульсного оборудования.*

**Ключевые слова:** режимы термоимпульсной обработки, алгоритм назначения режимов обработки, прочностные ограничения.

**Введение**

В процессе обработки продуктами сгорания детонирующих газовых смесей некоторых типов деталей могут возникать проблемы, приводящие к искажению их геометрии и даже появлению трещин на поверхности. Эта информация приводилась в ряде работ, посвящённых особенностям применения термоэнергетического метода [1, 2]. Подобного рода проблемы никогда не описывались в работах, посвящённых термоимпульсной обработке. Очевидно, что данная проблема может быть вызвана тем, что при термоэнергетической обработке из-за особенностей конструкции оборудования время контакта продуктов сгорания с обрабатываемыми деталями, по крайней мере, на порядок превосходит показатели, характерные для термоимпульсного оборудования. Это может приводить к перегреву поверхностного слоя обрабатываемых деталей и возникнове-

нию достаточно больших термических напряжений, которые могут стать причиной появления поверхностных трещин [3, 4].

При термоимпульсной обработке в зависимости от типа обрабатываемых деталей могут использоваться прочностные ограничения различного типа. Так, например, при обработке тонкостенных деталей с элементами типа пластин естественным ограничением является отсутствие искажений формы, вызванных действием давления во фронте ударной волны при одностороннем воздействии. В этом случае задача может быть сведена к расчёту НДС жёстко защемлённой по части контура пластине при динамическом нагружении равномерно распределённым по поверхности давлением. Ограничением в этом случае может являться достижение в заделке по всему сечению пластины напряжений, превышающих предел текучести.

Такие задачи рассматривались в большом количестве работ. В том числе известны работы, в которых учитывалось изменение механических свойств материала пластины при нестационарном нагреве [5, 6].

При термоимпульсной обработке могут быть также использованы другие типы прочностных ограничений, связанные с напряжениями в поверхностном слое деталей при совместном действии импульсного нагрева и давления. В этом случае в качестве ограничений может быть принято отсутствие остаточных деформаций в поверхностном слое или недопущение возникновения поверхностных трещин.

Учёт прочностных ограничений при определении режимов термоимпульсной обработки является неотъемлемой составляющей обеспечения качественной обработки. Подобного рода исследования являются актуальными в силу возможности усовершенствования методик и алгоритмов назначения режимов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями, которая в свою очередь является конкурентоспособной финишной технологией при изготовлении прецизионных деталей [7].

**Целью статьи** является разработка алгоритма назначения режимов термоимпульсной обработки деталей с учётом прочностных ограничений.

## **1. Существующие методики определения режимов термоимпульсной обработки**

Среди направлений исследований в области финишной обработки детонирующими газовыми смесями особое значение имеет разработка методов назначения режимов финишного удаления ликвидов. На сегодняшний день сформировались два основных направления решения данной задачи - экспериментальное и расчётное, использующее аналитические или численные решения задач, моделирующих различные процессы финишной отделки и очистки.

Процессы удаления ликвидов продуктами сгорания газовых смесей сложны для моделирования. Они связаны с теплообменом между высокотемпературными продуктами сгорания и деталями произвольно сложной формы. В случае возникновения ударных волн они требуют учёта нестационарных процессов термического и динамического характера. Такие задачи в строгой постановке могут решаться только численно, причём процесс решения требует серьёзных навыков работы с расчётными пакетами и больших вычислительных затрат. Такие особенности не соответствуют условиям промышленного

предприятия, поэтому естественной альтернативой, которую использовали многие исследователи, стало применение экспериментальных методов.

При использовании такого подхода режимы обработки назначают по эмпирическим зависимостям, полученным в ходе факторного эксперимента. Такой подход применялся как для термоэнергетического варианта процесса [8, 9], так и для термоимпульсного [10].

С учётом того, что при назначении режимов обработки приходится учитывать больше 10 факторов, такой подход требует проведения очень большого количества экспериментов. Попытки сократить их количество могут приводить к получению эмпирических зависимостей, не обеспечивающих требуемую достоверность назначения режимов обработки. Поэтому назначение режимов на основе факторного эксперимента оправдано в условиях крупносерийного производства, или при обработке деталей малой номенклатуры материалов.

Для назначения режимов термоимпульсной обработки в работе [11] был предложен подход, использующий аналитические решения задач нагрева заусенца в упрощённой постановке. Позднее он был также перенесён на случаи очистки поверхностей от микрочастиц [12] и отделки поверхностей [13].

Для обеспечения возможности аналитического решения задача рассматривалась как линейная нестационарная задача теплопроводности в двумерной постановке. Кроме того, были сделаны допущения о равномерности теплового потока по поверхности, форма и положение ликвидов считались неизменными, а величина теплового потока определялась исходя из упрощённой (и неочевидной) зависимости.

Тем не менее, такой подход оказался достаточно успешным. Благодаря его использованию удалось получить ряд зависимостей, связывающих геометрические и теплофизические характеристики ликвидов с энергетическими параметрами термоимпульсного оборудования, необходимыми для их удаления.

Однако данный метод не позволяет делать достаточно точные количественные оценки основных параметров процесса (величины тепловых потоков и времени обработки), особенно для прецизионных деталей из материалов с выраженной зависимостью теплофизических характеристик от температуры.

Решение данной задачи можно разделить на две простые задачи. Одна из них должна быть связана с определением состояния ликвида под воздействием теплового потока или ударной волны с известной интенсивностью. Вторая – с определением этих величин на основании моделирования горения в эквивалентной камере, позволяющей решать такие

задачи без учёта теплообмена продуктов сгорания с конкретными деталями. Эта задача решалась в работах [14 – 16].

В методиках, в том числе описанных в работах [17, 18], позволяющих усовершенствовать алгоритм назначения режимов термоимпульсной обработки за счёт учёта ряда уточняющих факторов, вопросы прочностного ограничения режимов подробно не рассматривались, в некоторых из них есть лишь указание на необходимость такого контроля, например, с позиции недеформируемости тонкостенного элемента.

## 2. Прочностные ограничения к режимам термоимпульсной зачистки с учётом технологической наследственности

Как отмечалось ранее, термоэнергетическая обработка деталей с твёрдостью более 42 HRC может приводить к образованию поверхностных трещин [1]. При термоимпульсной обработке такие последствия никогда не наблюдались. Поэтому очевидным объяснением такого факта является больший нагрев поверхности обрабатываемой детали из-за длительного контакта с продуктами сгорания. Появление трещин при термоэнергетической обработке закалённых деталей происходит из-за анизотропии свойств поверхностного слоя вследствие цементации, азотирования и др. Для таких видов обработки характерно существенное различие в концентрации углерода и азота по глубине поверхностного слоя, что существенно влияет на коэффициент линейного теплового расширения.

Решение тестовой задачи по предложенной в работах [19, 20] расчётной модели определения термонапряженного состояния, вызванного импульсными температурными нагрузками, показывает, что учёт изменения коэффициента линейного термического расширения в зависимости от концентрации углерода в поверхностном слое детали после цементации приводит к увеличению расчётных сжимающих напряжений более чем в 2 раза.

В работе [21] рассмотрена проблема трещинообразования под действием термоимпульсных нагрузок на примере корпусной детали авиационного агрегата из литого сплава. Для этого решена задача термоупругости металла при термоимпульсной обработке; рассчитаны внутренние напряжения и установлены зоны концентрации напряжений в детали. Проведено численное моделирование трещинообразования в зоне со структурной неоднородностью и наибольших концентраций напряжений, что позволило определить коэффициенты интенсивности напряжений для случая нормального отрыва,

поперечного и продольного сдвига и J-интеграл. Сравнение расчётных величин критериев хрупкого разрушения и их критических значений для исследуемого материала подтвердило возникновение дефекта в виде трещины. Проведенным исследованием подтверждена необходимость оценки возможного разрушения под действием термоимпульсных нагрузок в соответствии с баллом пористости отливки.

На основе анализа представлений о механизме поверхностного разрушения материалов при нестационарном нагреве в работе [22] определено кратное увеличение величины сжимающих окружных напряжений при учёте анизотропии коэффициента линейного теплового расширения и предложен подход для определения ограничений режимов термоимпульсной обработки при условии допустимости остаточных деформаций в поверхностном слое. Для этого подхода обосновано применение модели Джонсона-Кука при определении динамического предела текучести и расчёте максимального времени воздействия. Для учёта технологической наследственности на предыдущих операциях изготовления детали предложено применять критерий использования ресурса пластичности. Предельно допустимые режимы термоимпульсной обработки в этом случае должны определяться пересечением траектории деформирования точки с диаграммой предельной пластичности материала, определяя тем самым максимально использованный ресурс пластичности.

## 3. Укрупнённый алгоритм назначения режимов термоимпульсной обработки

С учётом полученных результатов укрупнённый алгоритм назначения технологических параметров термоимпульсной обработки можно представить в виде, приведенном на рис. 1. Исходными данными для расчёта режимов являются следующие несколько источников информации.

1. *Информация о детали из системы CAD и чертежей*: объем детали, площадь поверхности, минимальная толщина плоской и цилиндрической стенки; класс и квалиметрические показатели кромок; балл пористости (в случае применения литой заготовки).

2. *Информация о детали из системы САМ*: длина, толщина и радиус корня заусенца; пластические напряжения на предшествующих технологических операциях; интенсивность пластических деформаций на предшествующих технологических операциях.

3. *Информация об оборудовании и оснастке из системы CAD*: объем камеры и оснастки, площадь поверхности камеры и оснастки; компонентный

состав топливной смеси; расположение детали, оснастки и средств поджога смеси в рабочей камере.

4. База данных свойств материалов: теплофизические характеристики материала детали, оснастки и рабочей камеры; механические характеристики материала детали; характеристики разрушения материала детали.

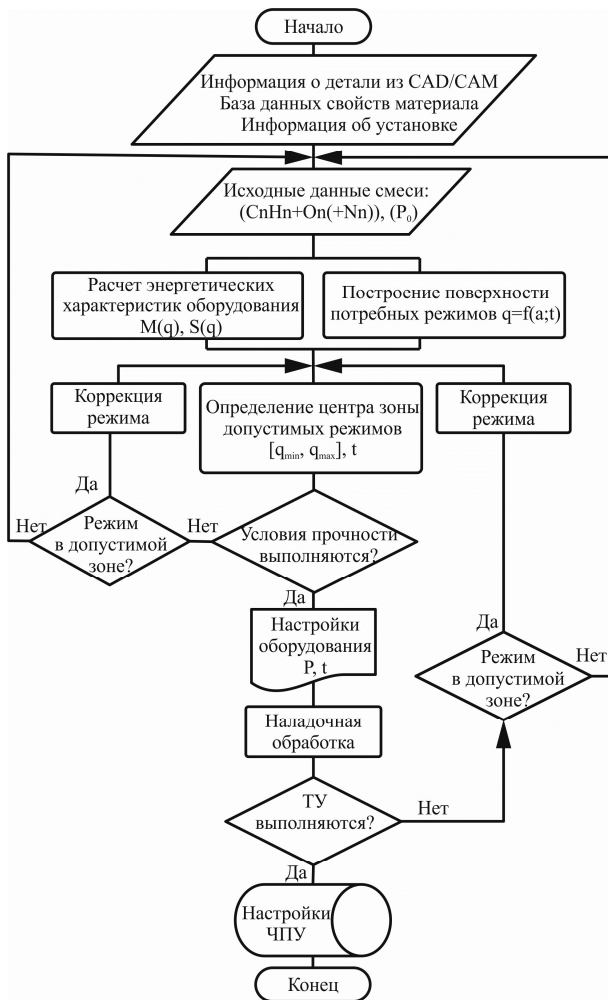


Рис. 1. Укрупнённая блок-схема назначения режимов термоимпульсной обработки

С использованием данной информации по указанным выше усовершенствованным методикам, описанным в работах [17, 18], производится расчёт энергетической характеристики оборудования – величины удельного теплового потока ( $q$ ) для произвольно выбранного начального давления смеси ( $P_0$ ). Алгоритм, представленный на рис. 2 позволяет определить энергетические параметры установки (удельный тепловой поток ( $q$ ) и время его действия ( $t$ )) для отработки заданной технологической задачи (входная информация) при конкретных условиях (рабочее давление ( $P_0$ ) и состав смеси). Время действия теплового потока определяется временем затухания ударных волн ( $\tau$ ) в камере. Временем затухания ударных волн считается момент, при

котором разница между максимальным и минимальным давлением в камере составляет 5%.

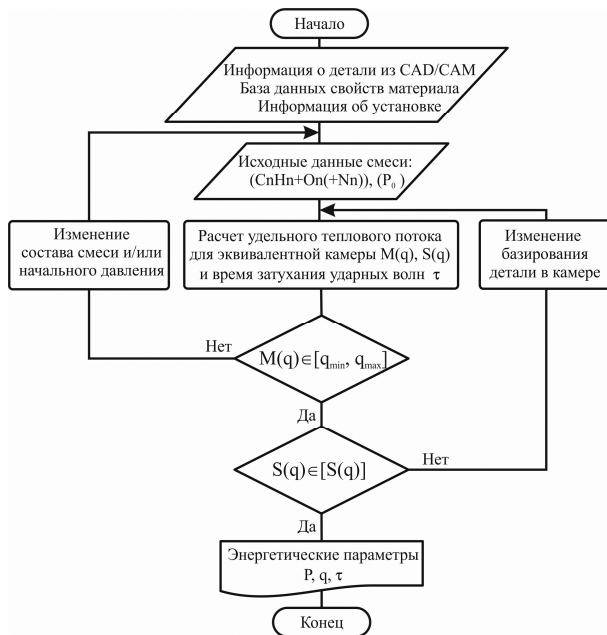


Рис. 2. Блок-схема расчёта энергетических параметров оборудования

Расчёт величины осреднённого удельного теплового потока по времени его действия для расчётных начальных условий в виде математического ожидания  $M(q)$  даёт возможность оценить его достаточность путём сравнения с рабочим диапазоном значений потребного теплового потока  $[q_{min}, q_{max}]$ .

Диапазон потребных режимов определяется с позиции гарантированного обеспечения квалиметрического показателя кромки ( $a$ ) в соответствии с приведенной на рис. 3 блок-схемой. В случае несоответствия реализуемой и потребной величин удельного теплового потока ( $M(q) \notin [q_{min}, q_{max}]$ ) регулировка режима возможна либо повышением начального давления, либо изменением состава топливной смеси.

Связь величины квалиметрического показателя кромки ( $a$ ) с осреднённым по поверхности удельным тепловым потоком ( $q$ ) и временем его действия ( $t$ ) определяется по поверхностям режимов, которые строятся путём численного эксперимента. Далее определяется диапазон рабочих режимов  $[q_{min}, q_{max}]$ , в котором может быть обеспечено заданное значение квалиметрического показателя кромки ( $a$ ). Алгоритм предусматривает два способа определения режимов - по квалиметрическому показателю кромки (металлические детали) и по максимальной температуре поверхности (например, детали из пластмасс).

Для режима, соответствующего середине определённого диапазона производится проверка по

прочностным ограничениям согласно техническим требованиям на обработку.



Рис. 3. Блок-схема расчёта диапазона потребных режимов

В случае, если условие прочности не выполняется, производится коррекция режимов внутри рабочего диапазона. При выполнении прочностных ограничений производится наладочная обработка детали. В случае, если квалитетические характеристики кромки после обработки соответствуют техническим условиям, режим заносится в память системы ЧПУ термоимпульсной установки. В противном случае производится дополнительная коррекция по начальному давлению смеси и времени обработки. При выходе параметров за пределы установленного рабочего диапазона производится коррекция состава топливной смеси.

Разработанный алгоритм отработки режима термоимпульсной обработки по прочностным ограничениям имеет вид, представленный на рис. 4.

С учётом изложенного в п.2 настоящей статьи, при оценке прочностных ограничений режимов термоимпульсной обработки, необходима комплексная оценка прочностных факторов:

- возможности искажения формы детали в местах с минимальной толщиной стенки;
- запаса прочности по критерию отсутствия остаточных деформаций в поверхностном слое;
- возможности разрушения при исчерпании ресурса пластичности;
- возможности разрушения при наличии структурных неоднородностей.

При прохождении прочностных условий без необходимости коррекции режима, расчётные значения удельного теплового потока и времени его действия передаются для наладки оборудования (в соответствии с алгоритмом рис. 1). В противном случае, расчётный режим работы оборудования подвергается коррекции: по возможности вариаций начального давления, иначе, изменению состава рабочей смеси.

Предложенный подход предусматривает согласованное определение энергетических характеристик оборудования необходимых для обработки деталей с заданными квалитетическими показателями и достаточных с позиции прочностных требований. Стабильность качества обработки должна обеспечиваться системами автоматизированного термоимпульсного оборудования.

## Заключение

Предложенный в работе алгоритм назначения режимов работы термоимпульсного оборудования имеет следующий ряд преимущественных отличий:

1. Расчёт энерговооруженности установки (удельные тепловые потоки, время затухания ударных волн, пр.) производится по уточнённым методикам, учитывающим теплопоглощение поверхностями детали и стенками камеры.
2. Расчёт диапазона потребных режимов обработки с учётом переменности теплофизических свойств обрабатываемых материалов, позиционирования детали в камере, и обеспечения требуемого квалитетического показателя кромки.
3. Согласованное определение необходимых режимов обработки с возможностью изменения состава смеси и/или пересчёта потребного давления в зависимости от его начального значения.
4. Учёт прочностных ограничений при назначении режимов обработки по наиболее вероятным факторам нарушения сплошности обрабатываемых деталей.

## Литература

1. Gillespie, L. *Deburring and edge finishing handbook [Text]* / L. Gillespie – New York : Industrial Press, 1999. – 404 p.
2. *Mechanical deburring and edge-finishing processes for aluminum parts – a review [Text]* / S. A. Niknam, B. Davoodi, J. P. Davim, V. Songmene // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 95, iss. 1-4. – P. 1101–1125. DOI: 10.1007/s00170-017-1288-8.
3. Riedel, H. *Fracture at high temperatures [Text]* / H. Riedel. – Berlin ; Tokyo ; New York : Springer-Verlag, 2014. – 417 p.

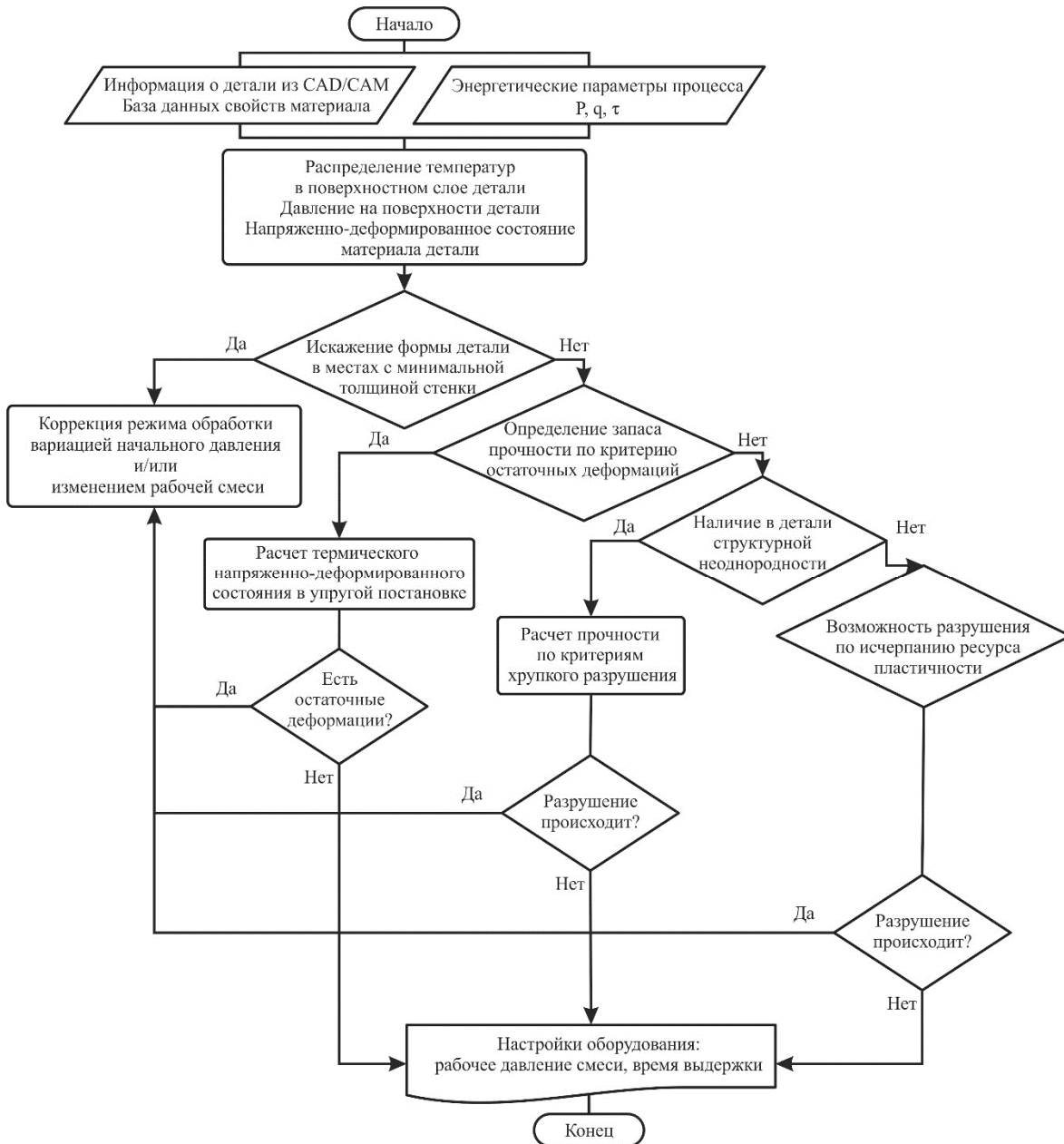


Рис. 4. Блок-схема расчёта прочностных ограничений режимов термоимпульсной обработки

4. *Theoretical analysis on the damages for tungsten plasma facing surface under superposition of steady-state and transient heat loads [Text] / C. Li, D. Zhu, B. Wang, J. Chen // Fusion Engineering and Design. – 2018. – Vol. 132. – P. 99–106. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.05.054.*

5. *Stress, vibration and buckling analyses of FGM plates – A state-of-the-art review [Text] / K. Swaminathan, D. T. Naveenkumar, A. M. Zenkour, E. Carrera // Composite Structures. – 2015. – Vol. 120. – P. 10–31. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.070.*

6. *Computational simulations of thermal shock cracking by the virtual crack closure technique in a functionally graded plate [Text] / V. N. Burlayenko, H. Altenbach, T. Sadowski, S. D. Dimitrova // Computational Materials Science. – 2016. – Vol. 116. – P. 11–21. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.08.038.*

7. *Trends in Precision Manufacturing Based on Intelligent Design and Advanced Metrology [Text] / M. N. Durakbasa, G. Bas, J. M. Bauer, G. Poszvek // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 581. – P. 417–422. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.417.*

8. *Kelley, D. G. Thermal Energy Deburring [Text] / D. G. Kelley, K. Schwarz // Technical paper MR91-136. – Dearborn : Society of Manufacturing Engineers, 1991. – 32 p.*

9. *Experimental analysis of thermal energy deburring process by design of experiment [Text] / A. Fritz, L. Sekol, J. Koroskenyi et al. // Proceedings of ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston, November 9–15, 2012. – ASME, 2012. – Vol. 3. – P. 2035–2041. DOI: 10.1115/IMECE2012-88411.*

10. Божко, В. П. Основы технологии зачистки деталей авиационного производства высокотемпературными газовыми импульсами [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.04; защищена 17.02.1993; утв. 21.06.1993 / Божко Валерий Павлович. – Х., 1993. – 314 с.

11. Лосев, А. В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08; защищена 14.05.1995; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.

12. Жданов, А. А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностей деталей агрегатов авиационных двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04; защищена 25.12.2003; утв. 15.02.2003 / Жданов Александр Андреевич. – Х., 2003. – 182 с.

13. Сломинская, Е. Н. Термоимпульсная отделка поверхностей деталей летательных аппаратов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04; защищена 9.04.1997; утв. 19.06.1997 / Сломинская Елена Николаевна. – М., 1997. – 165 с.

14. Козлов, В. Г. Повышение эффективности финишной очистки деталей гидравлических систем самолетов на базе термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02; защищена 20.09.2013; утв. 6.12.2013 / Козлов Владислав Григорьевич. – Х., 2013. – 176 с.

15. Трифонов, О. В. Метод назначения режимов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями в интегрированных CAD/CAE-системах [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07; защищена 20.09.2013; утв. 6.12.2013 / Трифонов Олег Валерьевич. – Х., 2013. – 152 с.

16. Малащенко, В. Л. Совершенствование технологии зачистной обработки деталей из термопластов на базе термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07; защищена 17.10.2014; утв. 16.12.2014 / Малащенко Владимир Львович. – Х., 2014. – 163 с.

17. 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 «ХАИ», 2013. – 189 с.

18. Шипуль, О. В. Методика назначения режимов термоимпульсной отделки с учетом требований к качеству кромки [Текст] / О. В. Шипуль, И. Б. Кузнецов, Е. С. Палазюк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 5 (122). – С. 11–26.

19. Аналіз термічних напружень деталі під дією термоімпульсного навантаження [Текст] / О. В. Шипуль, В. Б. Минтюк, Д. А. Брега, С. О. Крицький // Открытые информационные и компьютерные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2016. – Вып. 72. – С. 77–90.

20. Кузнецов, И. Б. Математическое моделирование напряженного состояния деталей военной

техники при детонационной очистке [Текст] / И. Б. Кузнецов, Е. В. Цегельник, О. В. Шипуль // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2016. – Вып. 73. – С. 44–51.

21. Дослідження тріщиностійкості деталі під дією термоімпульсного навантаження [Текст] / О. В. Шипуль, І. Б. Кузнецов, Г. С. Тевзадзе, Р. О. Ходак // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 1 (136). – С. 67–72.

22. Планковский, С. И. Выбор системы определяющих уравнений и критерия поверхностного разрушения для анализа напряженного состояния деталей при термоимпульсной обработке [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, Р. А. Ходак // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2017. – Вып. 2 (90). – С. 78–88.

## References

1. Gillespie, L. *Deburring and edge finishing handbook*. New York, Industrial Press Publ., 1999. 404 p.

2. Niknam, S. A., Davoodi, B., Davim, J. P., Songmene, V. Mechanical deburring and edge-finishing processes for aluminum parts – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, iss. 1-4, pp. 1101–1125. DOI: 10.1007/s00170-017-1288-8.

3. Riedel, H. *Fracture at high temperatures*. Berlin, Tokyo, New York, Springer-Verlag Publ., 2014. 417 p.

4. Li, C., Zhu, D., Wang, B., Chen, J. Theoretical analysis on the damages for tungsten plasma facing surface under superposition of steady-state and transient heat loads. *Fusion Engineering and Design*, 2018, vol. 132, pp. 99–106. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.05.054.

5. Swaminathan, K., Naveenkumar, D. T., Zenkour, A. M., Carrera, E. Stress, vibration and buckling analyses of FGM plates – A state-of-the-art review. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 10–31. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.070.

6. Burlayenko, V. N., Altenbach, H., Sadowski, T., Dimitrova, S. D. Computational simulations of thermal shock cracking by the virtual crack closure technique in a functionally graded plate. *Computational Materials Science*, 2016, vol. 116, pp. 11–21. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.08.038.

7. Durakbasa, M. N., Bas, G., Bauer, J. M., Poszvek, G. Trends in Precision Manufacturing Based on Intelligent Design and Advanced Metrology. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 581, pp. 417–422. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.417.

8. Kelley, D. G., Schwarz, K. *Thermal Energy Deburring*. Technical paper MR91-136. Dearborn, SME, 1991. 32 p.

9. Fritz, A., Sekol, L., Koroskenyi, J., Walch, B., Minear, J., Fernandez, V., Liu, L. Experimental Analysis of Thermal Energy Deburring Process by Design of Experiment. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. ASME, 2012, pp. 2035–2041. DOI: 10.1115/IMECE2012-88411.

10. Bozhko, V. P. *Osnovy tehnologii zachistki detalej aviacionnogo proizvodstva vysokotemperaturnymi gazovymi impul'sami*. Dis. doct. tekhn. nauk [Fundamentals of technology of aviation production parts cleaning with high-temperature gas impulses. Dr. eng. sci. diss.]. Kharkov, 1993. 314 p.

11. Losev, A. V. *Povyshenie jeffektivnosti zachistki detalej pnevmaticheskikh i gidrotoplivnykh sistem pri ispol'zovanii termoimpul'snogo metoda*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of cleaning of pneumatic and hydro-fuel systems parts using thermal pulse method. PhD diss.]. Kharkov, 1995. 210 p.

12. Zhdanov, A. A. *Termoimpul'snye tehnologii ochistki poverkhnostei detalei agregatov aviatsionnykh dvigatelei*. Diss. kand. tekhn. nauk [Thermal pulse technology of aircraft engines components surface cleaning. PhD diss.]. Kharkov, 2003. 182 p.

13. Slominskaja, E. N. *Termoimpul'snaja otdelka poverkhnostej detalej letatel'nykh apparatov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Thermal pulse finish cleaning of aircraft parts surfaces. PhD diss.]. Moscow, 1997. 165 p.

14. Kozlov, V. G. *Povyshenie effektivnosti finishnoi ochistki detalei gidravlicheskih sistem samoletov na baze termoimpul'snogo metoda*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving of finish cleaning of aircraft's hydraulic systems parts based thermal-pulse method. PhD diss.]. Kharkov, 2013. 176 p.

15. Trifonov, O. V. *Metod naznachenija rezhimov termoimpul'snoj obrabotki detonirujushchimi gazovymi smes'jami v integrirovannykh CAD/CAE-sistemah* [The method of regime setting for the thermal pulse processing by detonable gaseous mixtures using integrated CAD/CAE-systems. PhD diss.]. Kharkov, 2013. 152 p.

16. Malashenko, V. L. *Sovershenstvovanie tehnologii zachistnoj obrabotki detalej iz termoplastov na baze termoimpul'snogo metoda* [Improving of deflashing technology of thermoplastics parts based thermal pulse method. PhD diss.]. Kharkov, 2014. 163 p.

17. Shipul', O. V., Tsegel'nik, E. V., Garin, A. O., Garin, V. O., Trifonov, O. V. *Sovremennye metody finishnoi ochistki intensivnymi potokami energii* [The modern methods of final cleaning by intense energy flux]. Kharkov, KHAIPubl., 2013. 189 p.

18. Shipul', O. V., Kuznecov, I. B., Palazjuk, E. S. *Metodika naznachenija rezhimov termoimpul'snoj otdelki s uchedom trebovanij k kachestvu kromki* [Method of the mode setting during thermal pulse treatment with the requirements for edge quality]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 11–26.

19. Shypul', O. V., Myntyuk, V. B., Breha, D. A., Kryts'kyj, S. O. *Analiz termichnykh napruzhen' detali pid diyeyu termoimpul'snoho navantazhennja* [Analysis of internal stresses in parts under the thermal pulse loading]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii – Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2016, iss. 72, pp. 77–90.

20. Kuznecov, I. B., Tsegel'nik, E. V., Shipul', O. V. *Matematicheskoe modelirovanie naprjazhennogo sostojanija detalej voennoj tehniki pri detonacionnoj ochistke* [Mathematical modeling of the military technique parts stress state during the detonation cleaning]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii – Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2016, iss. 73, pp. 44–51.

21. Shypul', O. V., Kuznecov, I. B., Tevzadze, G. S., Hodak, R. O. *Doslidzhennja trishhy'nostijkosti detali pid diyeyu termoimpul'snogo navantazhennja* [The study of part fracture toughness under the thermal pulse loading]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2017, no. 1 (136), pp. 67–72.

22. Plankovskij, S. I., Shipul', O. V., Hodak R. A. *Vybor sistemy opredel'jajushchih uravnenij i kriterija poverkhnostnogo razrushenija dlja analiza naprjazhennogo sostojanija detalej pri termoimpul'snoj obrabotke* [The choice of the determining equations system and the criterion of surface failure for analyzing the stressed state of parts in thermal pulse processing]. *Voprosy proektirovanija i proizvodstva letatel'nykh apparatov – Issues of design and manufacture of flying vehicles*, 2017, iss. 2 (90), pp. 78–88.

Поступила в редакцию 25.07.2018, рассмотрена на редколлегии 7.08.2018

## АЛГОРИТМ ПРИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕРМОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ З УРАХУВАННЯМ МІЦНІСНИХ ОБМЕЖЕНЬ

С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник

Аналіз застосовності фінішної термоенергетичної й термоімпульсної обробки детонуючими газовими сумішами до різних деталей визначає необхідність врахування руйнівних факторів, які в свою чергу є **предметом дослідження**, при призначенні режимів обробки. **Метою** статті є розробка алгоритму призначення режимів термоімпульсної обробки деталей з урахуванням міцнісних обмежень. У зв'язку з цим, в якості **завдань дослідження** проаналізовані існуючі методики призначення режимів обробки, в тому числі уточнюючі підходи. Розглянуто найбільш ймовірні фактори, що впливають на можливе руйнування деталей під дією термоімпульсних навантажень і визначено необхідність їх комплексного обліку. Отримані наступні **результати**. Оцінка можливості спотворення форми деталі в місцях з мінімальною товщиною стінки повинна проводитися за умовою недосягнення в небезпечних зонах в процесі обробки пластичних деформацій



металу. При визначенні максимального часу термоімпульсного впливу за умов наявності залишкових деформацій в поверхневому шарі деталі обов'язковим є врахування анізотропії коефіцієнта лінійного теплового розширення і використання моделі Джонсона-Кука, яка визначає динамічну межу плинності матеріалу. Можливість руйнування матеріалу при вичерпанні ресурсу пластичності необхідно оцінювати за критерієм використання ресурсу плинності - відношення накопиченого ступеня деформації до гранично припустимої при певній схемі напруженого стану. Для деталей, що мають структурну неоднорідність, запропоновано оцінювати можливість розвитку тріщин із зон внутрішніх пір, визначаючи значення коефіцієнта інтенсивності напружень або J-інтеграла і порівнюючи їх з критичними значеннями. Сформульовано наступні **висновки**. Розроблено алгоритм призначення режимів термоімпульсної обробки. Запропонований підхід передбачає узгоджене визначення енергетичних характеристик обладнання необхідних для обробки деталей з заданими кваліметричними показниками і достатніх з позиції міцнісних вимог. Стабільність якості обробки повинна забезпечуватися системами наповнення суміші, підпалу та випуску продуктів згоряння автоматизованого термоімпульсного обладнання.

**Ключові слова:** режими термоімпульсної обробки, алгоритм призначення режимів обробки, міцнісні обмеження.

#### ALGORITHM OF REGIME SETTINGS FOR THERMAL PULSE TREATMENT TAKING INTO ACCOUNT STRENGTH CONSTRAINTS

*S. I. Plankovskyy, O. V. Shypul, Ye. V. Tsegelnyk*

The analysis of the applicability of the finish thermal energy and thermal pulse treatment by detonable gas mixtures to various parts determine the need to take into consideration the strength constraints, which in turn is the subject matter of investigation when treatment settings are determined. The goal of the article is to develop an algorithm of settings assigning for thermal pulse finishing taking into account strength constraints of a part. In this regard, as the research tasks, existing methods for designating treatment regimes, including clarifying approaches, have been analyzed. The most probable factors affecting the possible destruction of parts under the action of thermal pulse loads are considered and the need for their comprehensive accounting is determined. The following results are obtained. Evaluation of the distortion possibility of the part shape in places with a minimal wall thickness should be performed by follow condition: plastic deformations in metal must not be reached in the dangerous zones during processing. When the maximum time of thermal pulse action is determined, provided that the residual deformations in the workpiece surface layer are present, it is necessary to amount the anisotropy of the linear thermal expansion coefficient and to apply the Johnson-Cook model, which calculates the dynamic yield strength of the material. Subject to the plasticity resource is exhausted, the possibility of the material destruction must be evaluated according to the criterion of the plasticity resource using as the ratio of the accumulated deformation degree to the maximum allowable state under a certain scheme. For parts with structural heterogeneity, it is suggested to define the possibility of developing cracks from internal pore zones, by determining the values of the stress intensity factor or the J-integral and comparing them with critical values. The following conclusions are formulated. An algorithm for assigning settings for thermal pulse finishing has been developed. The proposed approach ensures to determine agreed settings of the necessary energy of equipment to treat parts with specified quality parameters and the sufficient one from the standpoint of strength requirements. Stability of processing quality should be provided by systems for filling the mixture, burning and releasing the products of combustion of automated thermal pulse equipment.

**Keywords:** modes of thermoimpulse processing, algorithm for designating processing regimes, strength constraints.

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

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

**Цегельник Евгений Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: y.tsegelnyk@khai.edu.

**Plankovskyy Sergiy Igorevych** – Doctor of Techn. Sci., Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: s.plank@khai.edu.

**Shypul Olga Volodymyrivna** – PhD, associate professor, associate professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: o.shipul@khai.edu.

**Tsegelnyk Yevgen Volodymyrovych** – PhD, associate professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: y.tsegelnyk@khai.edu.