

УДК 621

А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, проф., **А. В. Анастасьев**¹, аспирант,
Н. С. Пичко², д-р филол. наук, проф.

¹ Донецкий национальный технический университет,

² Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинск

Тел./Факс: +79493497428; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛОПАТОК ГТД И ПАРОВЫХ ТУРБИН

В статье представлены результаты проверки разработанного экспериментального устройства для поверхностно-пластического упрочнения при обработке сложных пространственных поверхностей, на примере заготовки, эквивалентной профилю лопатки турбины ГТД, а также лопатки паровой турбины. Описано применяемое при проведении эксперимента оборудование, методика измерения. Приведены результаты замеров твердости поверхностного слоя исходных заготовок, и в процессе упрочнения. По полученным данным построены графики зависимости твердости поверхностного слоя от времени. На основе полученных экспериментальных данных были сделаны выводы о адекватности применения разработанного экспериментального устройства при упрочнении деталей сложной пространственной формы. При этом были выявлены определенные особенности, требующие как дальнейших изменений в конструкции самого устройства, так и касательно получения зависимостей прочности от времени обработки. На основании полученных данных была рассмотрена методика процесса синтеза вариантов рабочей части устройства для ППУ и приведены возможные варианты компоновок.

Ключевые слова: перо, профиль, лопатка, упрочнение, твердость.

A. N. Mikhaylov, A. V. Anastasyev, N. S. Pichko

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE EFFECTIVENESS OF USING A DEVICE FOR SURFACE-PLASTIC HARDENING WHEN PROCESSING GTE AND STEAM TURBINE BLADES

The article presents the results of testing the developed experimental device for surface-plastic hardening when processing complex spatial surfaces, using the example of a workpiece equivalent to the profile of a gas turbine turbine blade, as well as a steam turbine blade. The equipment used in the experiment and the measurement technique are described. The results of measurements of the hardness of the surface layer of the initial workpieces and during the hardening process are presented. Based on the data obtained, graphs of the dependence of the hardness of the surface layer on time were constructed. Based on the experimental data obtained, conclusions were drawn about the adequacy of using the developed experimental device for strengthening parts of complex spatial shape. At the same time, certain features were identified that required both further changes in the design of the device itself, and regarding obtaining dependences of strength on processing time. Based on the data presented, the methodology for the process of synthesizing variants of the working parts of a device for polyurethane foam is considered and variants of possible components are given.

Keywords: vane, profile, blade, hardening, hardness.

1. Введение

Одним из способов повышения эксплуатационных характеристик лопаток ГТД являются методы поверхностно-пластического деформирования (ППД). Такие методы упрочняющих технологий включают в себя: раскатывающие методы чистовой обработки, вибрационные, пневмо- и гидродробеструйные, обкатка роликами, алмазное выглаживание, дорнование, а также другие методы чистовой обработки поверхности деталей [1, 2, 3]. Применение таких методов позволяет достичь следующих характеристик: устранение неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений, наведенных при механической обработке, создание благоприятного микрорельефа поверхности при со-

хранении или уменьшении параметров шероховатости поверхности, стабилизацию степени наклепа и т.д. [4, 5, 6].

При этом, ряд методов ППД, в силу их технологических особенностей, имеет определенные ограничения на применение [7], с точки зрения функционально-ориентированных технологий.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности и эффективности применения устройства для поверхностно-пластического упрочнения при зональной обработке деталей сложной пространственной формы.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: разработать методику проведения эксперимента, провести экспериментальное исследование согласно разработанной методики, провести анализ полученных результатов, разработать рекомендации на основании полученных данных. Эти задачи решаются в данной работе.

2. Основное содержание и результаты работы

Профиль лопатки турбины имеет сложную пространственную геометрию, обусловленную особенностями работы лопаточного аппарата, а именно: переменными нагрузками, высокими температурами рабочего газа, наличием высокоскоростного газового потока, содержащего мельчайшие твердые частицы [8]. Исходя из указанных особенностей конфигурации профиля пера, было спроектировано экспериментальное портативное устройство для поверхностно-пластического упрочнения, с возможностью адаптивирования функциональных воздействий под особенности геометрии профиля пе-

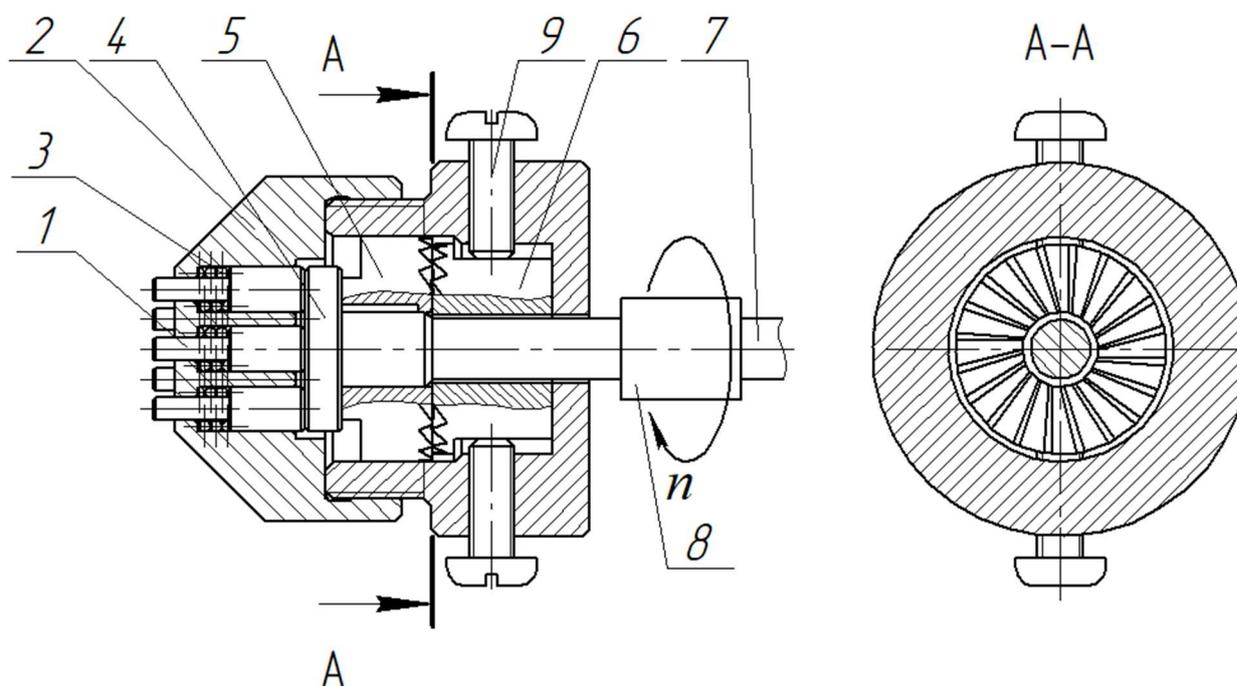


Рисунок 1. Схема устройства для поверхностно-пластического упрочнения:
1) ударник; 2) корпус; 3) пружина; 4) толкатель; 5) подвижный торцевой кулачек; 6) неподвижный торцевой кулачек; 7) вал электропривода; 8) компенсирующая муфта; 9) винт-фиксатор торцевого кулачка.

ра. Схема указанного устройства представлена на рисунке 1.

Так, рассматриваемое устройство включает в себя 7 ударников 1, установленных в разборном корпусе 2 и приводимых в рабочее положение пружинами 3. Рабочие элементы приводятся в действие пятой вала 4, на котором закреплен подвижный торцевой кулачек 5, который, при вхождении в зацепление с неподвижным торцевым кулачком 6, зафиксированным от проворота в корпусе 2 с помощью винтов 9, обеспечивает его рабочий ход. Вал 4 приводится в движение от вала электропривода 7, соединенного через компенсирующую муфту 8. Регулировка амплитуды действия ударников регулируется за счет изменения частоты оборотов электропривода 7.

Общий вид экспериментальной портативной установки для поверхностно-пластического упрочнения (ППУ) приведен на рисунке 2. Приведенная установка спроектирована таким образом, что имеет ход ударников 2 мм, с возможностью изменения частоты воздействий в широком диапазоне, за счет регулирования частоты вращения электропривода, а максимальный диаметр упрочняемой зоны без перемещения установки составляет 19 мм.



Рисунок 2. Общий вид экспериментальной портативной установки для поверхностно-пластического упрочнения

В качестве заготовки в ходе эксперимента использовались стальные образцы, конфигурация которых эквивалента упрощенным моделям лопатки [9] и лопатка паровой турбины (883А), общий вид которой представлен на рисунке 3. Исходя из особенностей конструкции рассматриваемой лопатки, а именно её габаритов, было принято решение выделить на ней 2 характерные зоны для проведения испытаний – хвостовик и спинку лопатки.

Для оценки эффективности действия экспериментальной установки для ППУ были проведены измерения твердости поверхностного слоя заготовок с помощью портативного твердомера ТЭМП-4, представленного на рисунке 4. Результаты измерений до процесса упрочнения приведены в таблице 1.



Рисунок 3. Общий вид используемой заготовки

Таблица 1. Значения твердости исследуемых образцов до процесса упрочнения

№ п/п	Наименование образца	Твердость, НВ			
		Измерение			Среднее значение
		№1	№2	№3	
1	Образец №1	151	146	148	148
2	Образец №2	156	153	155	155
3	Образец №3	148	142	147	146
4	Хвостовик лопатки А66 883А	409	414	410	411
5	Спинка лопатки А66 883А	289	286	288	288

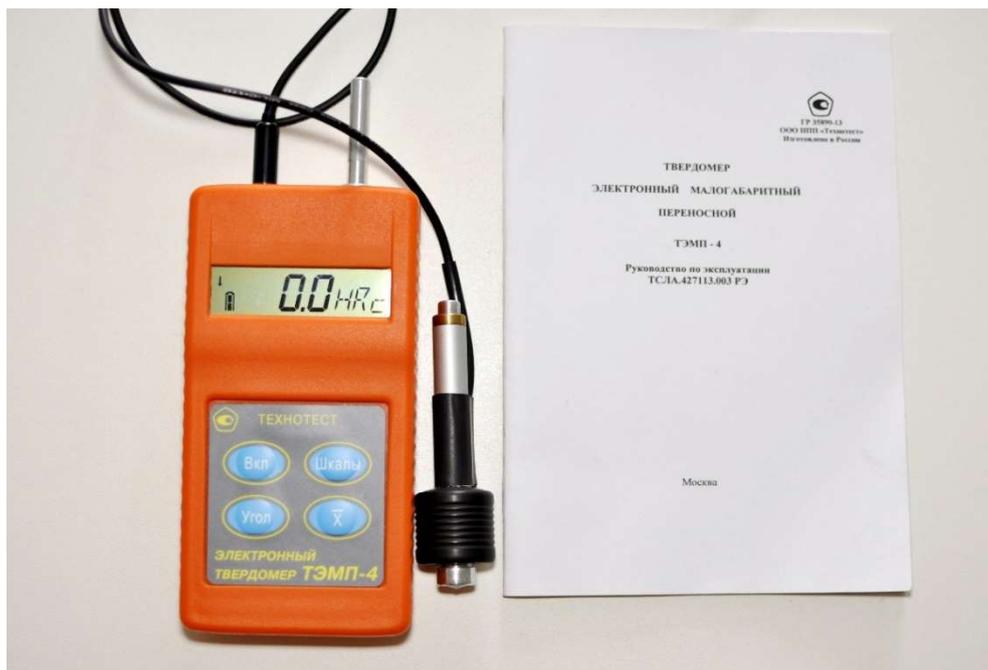


Рисунок 4. Портативный твердомер ТЭМП-4

Процесс упрочнения производили следующим образом. Опорную поверхность экспериментальной портативной установки прижимал вручную к обрабатываемой заготовке и включаем электропривод. При этом, при вращении оси толкателя 4 и перемещения подвижного торцевого кулачка 5, относительно неподвижного торцевого кулачка 6, происходит ускоренное перемещение ударников 1, и их последующее соударение с упрочняемой поверхностью, после чего, под действием пружин 3, происходит их возврат в исходное положение. Зона контакта устройства ППУ и обрабатываемого образца

представлена на рисунке 5.



Рисунок 5. Зона контакта устройства ППУ и контрольного образца

представлена на рисунке 5. Методика проведения эксперимента была построена следующим образом. На каждой из заготовок была обозначена зона, эквивалентная по конфигурации зоне максимальных эксплуатационных воздействий [10, 11], которая циклично подвергалась воздействию устройства ППУ на протяжении равных интервалов времени, равных 30 секундам. Аналогичным образом, на лопатке компрессора были выделены две характерные зоны, которые подвергались

упрочнению на протяжении равных интервалов. После каждого цикла упрочнения проводился визуальный контроль и контроль параметров твердости поверхностного слоя заготовок, с занесением в соответствующий протокол. Данная процедура проводилась последовательно для всех трех упрощенных моделей рассматриваемых образцов, и двух зон на лопатке компрессора. Упрочненная зона на спинке лопатки представлена



Рисунок 6. Упрочненная зона на контрольной заготовке:
1 – упрочненная зона; 2 – следы от измерений портативным твердомером.

на рисунке 6, а характеристики её поверхностного слоя в процессе упрочнения – представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения твердости исследуемых образцов в процессе упрочнения

№ п/п	Наименование	Средние значения параметров твердости для каждого интервала времени, НВ					
		30 с	60 с	90 с	120 с	150 с	180 с
1	Образец №1	167	166	169	168	177	173
2	Образец №2	161	165	162	166	172	169
3	Образец №3	162	162	166	169	175	168
4	Хвостовик лопатки А66 883А	414	419	432	426	430	425
5	Спинка лопатки А66 883А	291	294	294	303	297	291

Изменение твердости каждого из образцов в зависимости от времени, приведены в виде графиков на рисунках 7 и 8 соответственно.

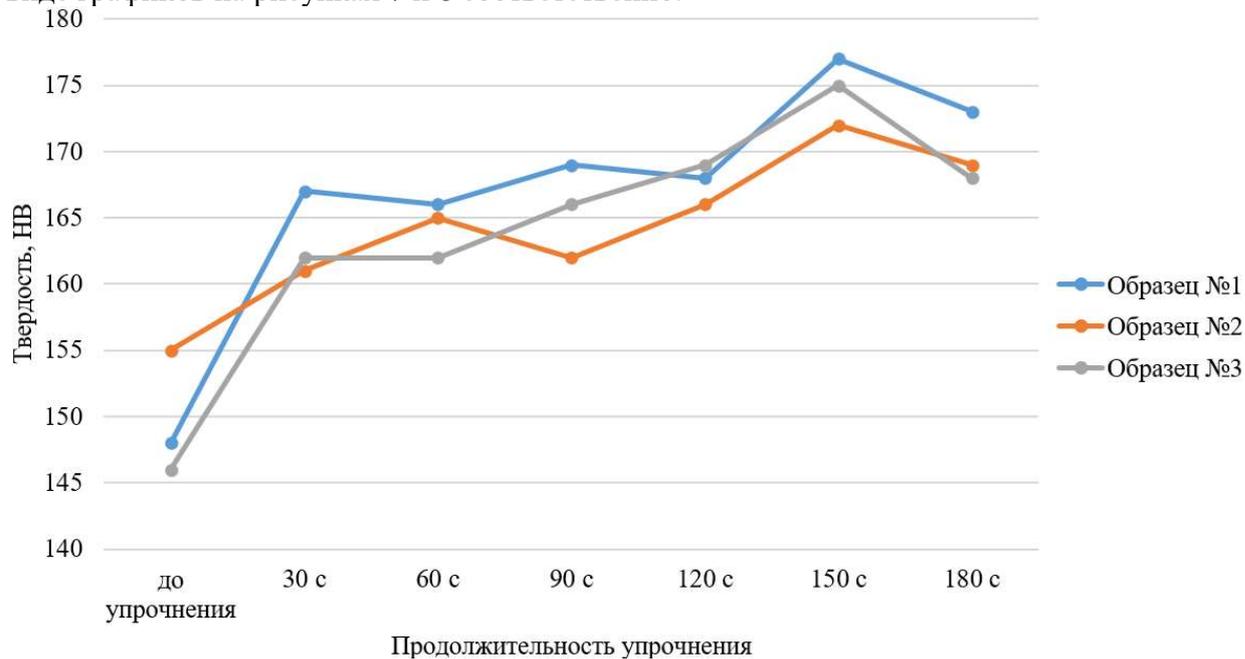


Рисунок 7. График изменения твердости поверхности обрабатываемого образца в зависимости от продолжительности упрочнения

Следует отметить, что при измерении твердости поверхностного слоя спинки лопатки А66 883А могли быть незначительные погрешности, вызванные особенностями измерения тонких заготовок сложного профиля, с применением имеющегося портативного твердомера, а именно – изготовлением шаблона, повторяющего профиль корытца лопатки. При этом, все измерения спинки выполнялись в одинаковых условиях.

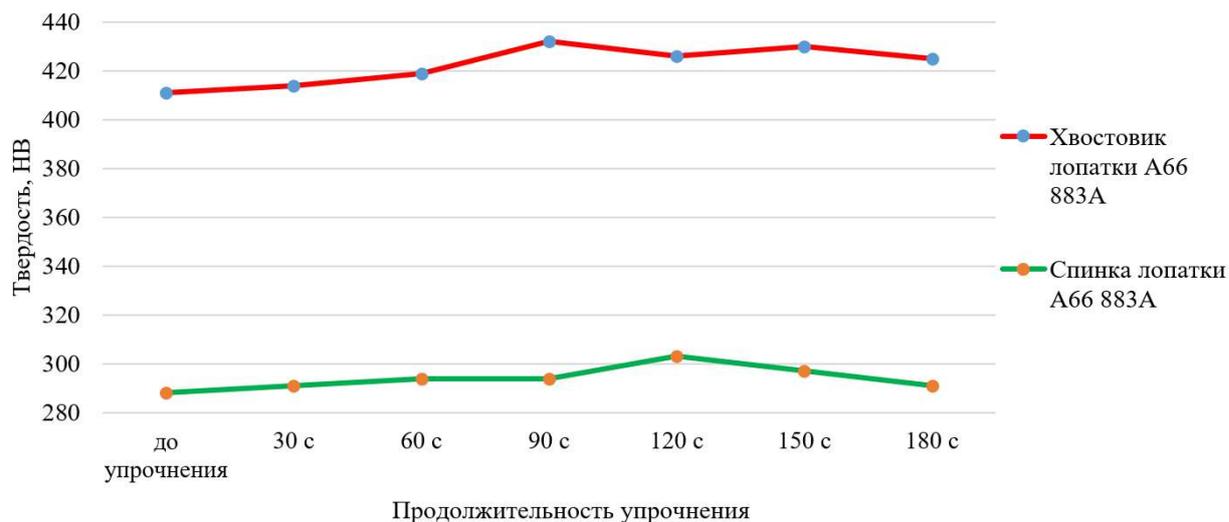


Рисунок 8. График изменения твердости поверхности обрабатываемого образца в зависимости от продолжительности упрочнения

Следует отметить, что несмотря на экспериментально доказанную эффективность разработанного устройства для поверхностно-пластического упрочнения, применение вышеуказанного устройства затруднительно, а применительно к определенным участкам – невозможно. Для этого, необходимо провести синтез вариантов функционально-ориентированного технологического обеспечения (ФОТО), учитывающего все особенности сложного пространственного профиля.

Для решения поставленной задачи необходимо выделить основные конструктивные зоны, на теле пера лопатки, определить методы формирования технологических воздействий и конструктивные особенности их реализации. Так, с учетом опыта применения рассматриваемого в данной статье устройства для ударного упрочнения, можно выделить ряд характерных зон, которые требуют соответствующей формы ударников, таких как:

- замок;
- спинка;
- бандажная полка;
- радиус сопряжения тела пера с хвостовиком и бандажной полкой;
- входная кромка.

Обработка выходной кромки может быть затруднена особенностями её конструкции, а именно очень малой толщиной, которая может затруднять процесс упрочнения рассматриваемым методом.

Синтез ФОТО проведем на основе морфологического анализа, позволяющего получить множество различных вариантов структуры технологического обеспечения. Для начала процесса синтеза необходимо задаться исходными и требуемыми характеристиками, каждой из которых, в свою очередь, будет назначена определенная кодировка, приведенная в таблице 3.

Таблица 3. Основные соотношения при определении характеристик контакта

№ п/п	Базовая характеристика	Вариант реализации	Предполагаемый обрабатываемый элемент	Код
1	Геометрический параметры упрочняемой зоны	Свободные	Спинка	A1
		Условно ограниченные	Корытце	A2
		Существенно ограниченные	Сопряжения пера	A3
		Жестко ограниченные	Замок	A4
2	Форма рабочих элементов устройства	Цилиндрическая	Спинка, корытце	B1
		Овальная	Сопряжения пера	B2
		Специального профиля	Замок	B3
3	Количество рабочих элементов устройства	Единичное	Сопряжения пера	C1
		Парное	Замок	C2
		Множественное	Спинка, корытце	C3
4	Исполнение	Вертикальное	Замок, спинка, корытце	D1
		Горизонтальное	Замок	D2
		Свободное	Спинка, корытце, сопряжения пера	D3

Задавшись приведенными базовыми характеристиками, процесс синтеза можно представить в виде структурного кода (1) и графа (рисунок 9):

$$W_x \rightarrow A_i - B_j - C_k - D_h \tag{1}$$

где, A_i, B_j, C_k, D_h – базовые характеристики;
 i, j, k, h – варианты реализации базовых характеристик в соответствии с кодировкой, представленной в таблице 1.

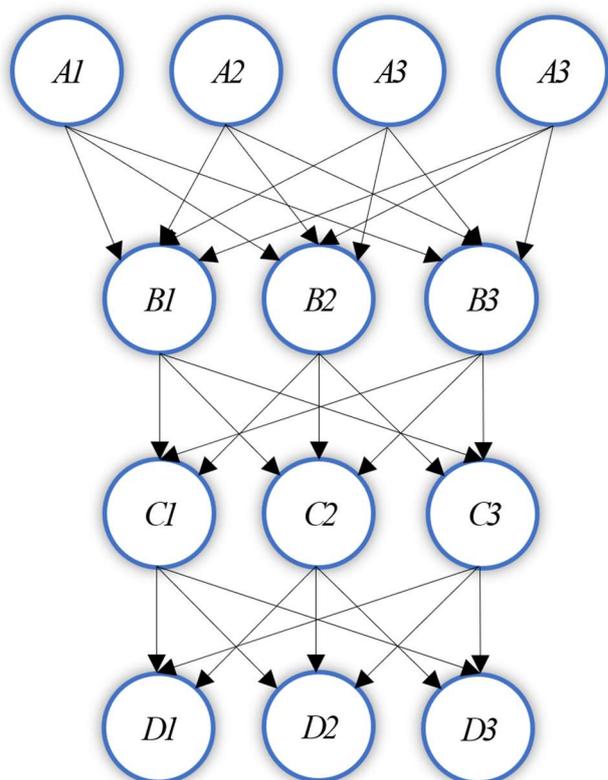


Рисунок 9. Граф процесса синтеза нескольких или всех элементов замка одновременно (рис. 10, в) с одной стороны, или с двух сторон соответственно (рис. 10, б, г).

Форма и количество рабочих элементов устройства, с учетом выделенных выше характерных зон, могут быть выполнены в виде цилиндрических ударников с плоским торцом, со сферической поверхностью ударника, а также с профилем – повторяющим геометрию замка. При этом, вне зависимости от их формы, количество может быть различным. Так на рисунке 10 приведены возможные конструктивные решения, для упрочнения замка ударниками специального профиля единичного (рис. 10, а), парного (рис. 10, б), множественного (рис. 10, в) и множественного парного (рис. 10, г) горизонтального исполнения. Приведенные варианты позволяют проводить как последовательную обработку каждого функционального элемента замка последовательно с каждой стороны (рис. 10, а), так и комплексную обработку нескольких или всех элементов замка одновременно (рис. 10, в) с одной стороны, или с двух сторон соответственно (рис. 10, б, г).

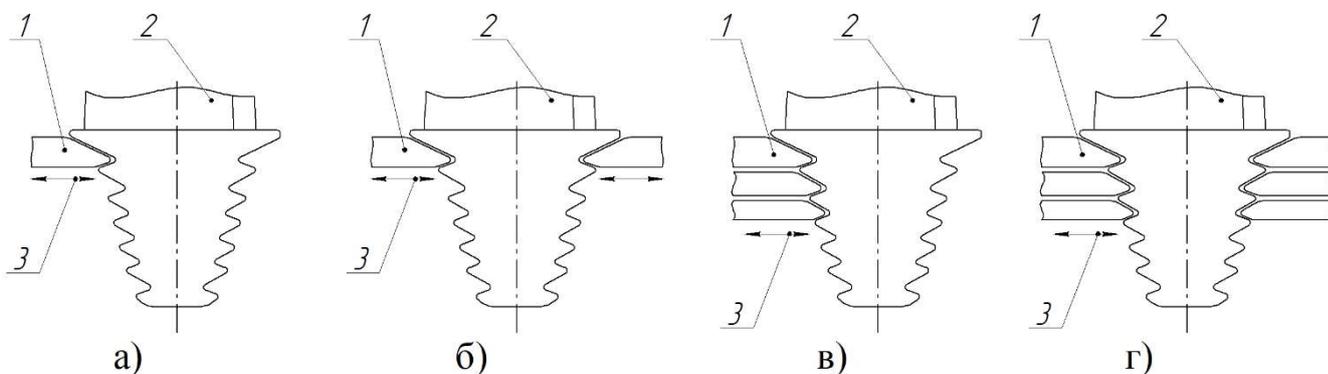


Рисунок 10. Варианты конструктивного решения

Аналогичным образом может варьироваться длина или диаметр ударников, в зависимости от геометрии обрабатываемого участка и максимальных прилагаемых усилий к нему, в том числе ограниченных как силовыми характеристиками привода, так и особенностями конструкции обрабатываемой лопатки.

3. Заключение

На основании полученных в результате экспериментальных исследований данных можно сделать ряд следующих выводов:

– спроектированное устройство для поверхностно-пластического упрочнения можно применять для упрочнения сложных пространственных поверхностей, однако требуется адаптация рабочего органа к обрабатываемому профилю;

– величина упрочнения зависит как от обрабатываемого материала, так и от длительности обработки;

– при обработке заготовок с более высокой исходной твердостью наблюдается существенно меньшее изменение шероховатости обрабатываемой поверхности.

Таким образом, на основании приведенных выше результатов и выводом можно сделать заключение, что применение подобного устройства для упрочняющей обработки лопаток актуально, однако требует дальнейших усовершенствований как конструкции устройства, так и проведения дополнительных испытаний при обработке различных материалов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Федорченко, Д. Г. Технологические методы повышения надёжности деталей ГТД / Д. Г. Федорченко, Д. К. Новиков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 1(67). – С. 62-66. – EDN TPNUGV.

2. Повышение эксплуатационной надёжности ГПА развитием конвертированных авиационных технологий / С. Д. Медведев [и др.]. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – 370 с. – ISBN 978-5-93424-376-1. – EDN QNVTJV.

3. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей / А. Г. Бойцов, А. П. Ковалев, А. С. Новиков [и др.]. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2007. – 584 с. – ISBN 978-5-7038-3044-4. – EDN ZCLDPD.

4. Кротинов, Н. Б. Поверхностное пластическое упрочнение лопаток газотурбинных двигателей / Н. Б. Кротинов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 3, № 1(76). – С. 68-71. – EDN TGNFKL.

5. Кротинов, Н. Б. Перспективы термопластического упрочнения лопаток авиационных газотурбинных двигателей / Н. Б. Кротинов // Самолетостроение России. Проблемы и перспективы: Симпозиум с международным участием, Самара, 02–05 июля 2012 года / Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), 2012. – С. 236-237. – EDN VJDOGB.

6. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – Минск: «Наука и техника», 1976. – 328 с.

7. Макаров, В. Ф. Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД / В. Ф. Макаров, В. А. Жукотский, Е. Н. Бычина //

Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 52-55. – EDN WLXUTT.

8. Налимов, Ю. С. Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей / Ю. С. Налимов // *Металл и литье Украины*. — 2014. — № 12. — С. 17-22.

9. Михайлов, А. Н. Построение упрощенного профиля пера лопатки турбины ГТД / А. Н. Михайлов, А. В. Анастасьев, Н. С. Пичко // *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю. А. Лагуновой. Оргкомитет: Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 305-308. – EDN НКНМАУ.*

10. Михайлов, А. Н. Основы синтеза механизма повышения ресурса лопаток турбины газотурбинного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / А. Н. Михайлов, А. В. Анастасьев, Н. С. Пичко // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. – 2022. – № 4(79). – С. 35-43. – EDN LGNZXZ.

11. *Наукоемкие технологии в машиностроении / А. Г. Суслов, Б. М. Базров, В. Ф. Безъязычный и др.; под ред. А. Г. Суслова. – Москва: Машиностроение, – 2012. – 528 с. ISBN 978-5-94275-619-2.*

Поступила в редколлегию 26.01.2024 г.