

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-36-41

УДК 621.9.068



05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

## ИМПУЛЬСНО-УДАРНАЯ ОБРАБОТКА СУЖАЮЩИХСЯ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ

✉<sup>1</sup>**Некрылов Андрей Михайлович**  
ведущий инженер-конструктор Конструкторского бюро химавтоматики (Россия), e-mail: anekrylov@mail.ru

**Коденцев Сергей Николаевич**  
к.т.н., доцент

**Родионов Александр Олегович**  
к.т.н., начальник группы ООО «Сименс Трансформаторы»

### Аннотация.

Создана методика и технологическое обеспечение заданных показателей поверхности узкого сужающегося канала с закруткой по радиусу и регламент проектирования операций комбинированного импульсно-силового упрочнения, разработан новый патентоспособный технологический процесс упрочнения узких сужающихся криволинейных каналов комбинированным импульсно-ударным воздействием с продвижением свободного инструмента (шарообразных гранул) в условиях низкочастотных колебаний.

**Ключевые слова:** ИМПУЛЬСНО-УДАРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ, КОМБИНИРОВАННОЕ УПРОЧНЕНИЕ, НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ, РЕЖИМЫ УПРОЧНЕНИЯ, ПОКРЫТИЕ, МЕЖЛОПАТОЧНЫЙ КАНАЛ.

<sup>1</sup>*Автор для ведения переписки*

## PULSE-SHOCK TREATMENT OF NARROWING INTER-PUMP CHANNELS

✉<sup>1</sup>**Nekrylov Andrey Mihailovich**  
leading design engineer,  
Design Bureau of Chemical Automation (Russia), e-mail: anekrylov@mail.ru

**Kodentsev Sergei Nikolaevich**  
cand. of tech. sc.,

**Rodionov Alexander Olegovich**  
cand. of tech. sc., Group Leader Siemens Transformers

### Annotation.

The methodology and technological support of the specified parameters of the surface of a narrow narrowing channel with a twist along the radius and the regulations for the design of combined pulse-force hardening operations have been created, a new patentable technological process for strengthening narrow narrowing curved channels by combined pulse-shock action with the promotion of a free tool (spherical granules) in low-frequency oscillation conditions has been developed.

**Keywords:** PULSE-SHOCK HARDENING, COMBINED HARDENING, LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS, HARDENING MODES, COATING, INTER-BLADE CHANNEL.

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Упрочняющая и финишная операции поверхностей узких сужающихся каналов представляет сложную технологическую проблему [1-5].

Предметом исследования явились закономерности изменения параметров в технологической системе комбинированных импульсно-ударных воздействий на поверхность узких сужающихся каналов, методы расчета режимов обработки, расчет прогнозируемых показате-

лей качества упрочнения и технологические рекомендации по их обеспечению.

Новые научные результаты состоят в том, что [1, 3, 4]:

– выявлен механизм взаимного влияния импульсно-ударного воздействия незакрепленного обрабатывающего инструмента на получение заданной величины стабильной степени наклепа и граничные условия реализации технологии упрочнения в условиях узкого сужающегося канала криволинейной формы;

– определены закономерности взаимного влияния элементов технологической схемы «гранулы – контактный участок поверхности канала – продольный профиль канала» при последовательном продвижении вдоль поверхности с неравномерными физико-механическими свойствами, исключающие блокировку инструмента в технологически закрытом сужающемся канале;

– установлены условия формирования равномерного по всему межлопаточному каналу упрочненного слоя материала, соотнесенные с технологическими параметрами комбинированных воздействий, позволяющие адаптировать режимы импульсно-ударного упрочнения для обеспечения эксплуатационно-ориентированных показателей качества;

– предложена методика проектирования технологии комбинированной обработки, обеспечивающей стабильность физико-механических свойств по сечению канала на основе оптимизации используемых комбинированных воздействий с учётом конструктивных особенностей детали сложного профиля и характера эксплуатационных нагрузок.

## 2 Материалы и методы

Комплексный анализ объекта исследований определяет, что детали с узкими сужающимися криволинейными каналами (рис. 1) целесообразнее всего обрабатывать в паре стьюкая их последовательно [6]. Такое расположение дает возможность удвоить импульс удара большей массой порции шариков, и в моменты совпадения скоростей импульсно-силового соударения и низкочастотного колебания встряской технологической системы разрыхлять упаковку сферических гранул, предотвращая их заклинивание в канале.

На основании сформулированных положений спроектирован способ комбинированного импульсно-ударного упрочнения поверхностей узких криволинейных каналов токопроводящими стальными шариками [7, 8].

Предложенный способ позволяет организовать комбинированное воздействие постоянно и равномерно (не менее 95 % сплошности покрытия) за счет импульсно-ударного перемещения шариков вдоль канала, которое поэтапно упрочняет все участки поверхности, создавая равномерный наклеп, поддерживая эффективное ударное взаимодействие в зоне обработки за счет интенсивного контактного истирания от предыдущих соударений и электрохимического растворения продуктов обработки (истирания материала детали).

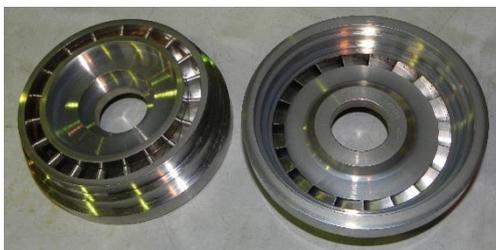


Рисунок 1 – Типовые детали с узкими каналами

Предлагаемый способ направлен на получение равномерной степени наклепа и устранения микродефектов по всей обрабатываемой поверхности за счет непрерывного импульсно-ударного продвижения обрабатывающей среды по каналам лопаточной детали в условиях низкочастотной вибрации. Это достигается тем, что для обеспечения постоянного импульс-

но-ударного режима контактирования, а также для регулярного встряхивания и разрыхления обрабатываемой среды процесс упрочнения ведут на постоянном режиме при частоте не менее 30 Гц периодами не более 5 минут, при этом после каждого такого периода постоянно и циклически снижается частота колебаний контейнера на промежуток времени 5-10 сек до 20 Гц. Также во время снижения частоты вибрации до 20 Гц в контейнер подают электрически слабопроводящую техническую воду. На рисунке 2 показано, как в закрепленный на вибростоле 1 корпус 2 контейнера в электроизолированной оснастке 3 устанавливают две одинаковые лопаточные детали 4.

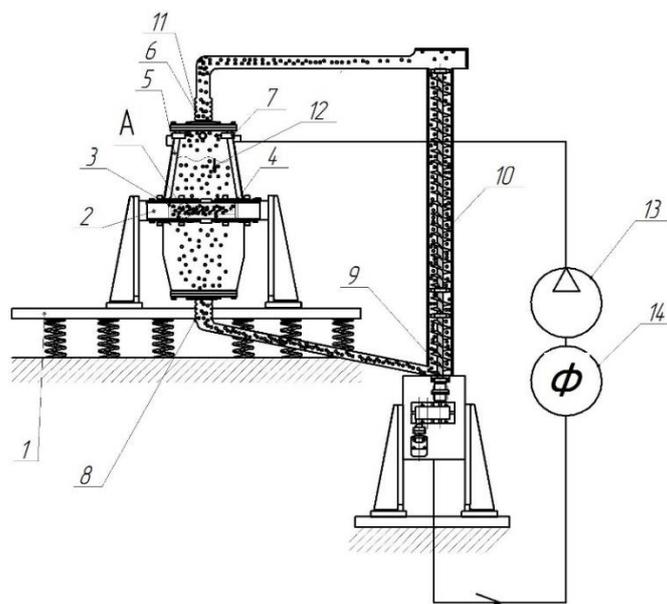


Рисунок 2 – Схема импульсно-ударного упрочнения каналов

Детали обращены к друг другу тонким кромкам лопаток (рис. 3).

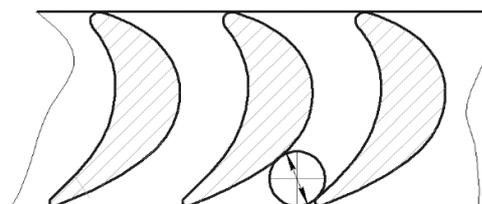


Рисунок 3 – Схема канала лопаточной детали

Такое расположение деталей вызвано необходимостью более интенсивной обработки труднодоступных наиболее узких сечений канала и оберегания от повреждений кромок лопаток. Через отверстие в крышке 5 над деталью 2 подают токопроводящие гранулы 6, заполняя внутреннюю полость под крышкой 5 на 0,75 объема. На деталь 2 через токоподводы в оснастке 3 подают положительное напряжение, на токопроводящие гранулы 6 через крышку 5 подают отрицательное напряжение, обеспечивая этим электрохимическое растворение и удаление продуктов обработки с поверхности каналов детали в момент ударов с гранул через жидкостную пленку.

Обработку проводят постоянно при частоте не менее 30 Гц, при этом через 5 минут процесс замедляется и останавливается из-за заклинивания гранул в направлении сужения канала. Затем через штуцеры 7 подают слабопроводящую техническую воду 12 с периодичностью в 5 минут в течение 5-10 с. За это время частоту контейнера снижают до 20 Гц. В

этот незначительно малый период времени анодного растворения материала не происходит вследствие постоянной, а не дискретной проводимости в обрабатываемой среде, но гранулы *б* при этом не слипаются и разрыхляются, и совершают импульсно-поступательное продвижение по каналу в условиях низкочастотной вибрации около 20 Гц, перемещаясь по каналам детали под действием силы тяжести и виброколебаний, вследствие чего происходит обработка канала. Такие циклы повторяются весь период обработки. Циркуляция в устройстве технической воды осуществляется насосом *13*, очистку воды от продуктов обработки выполняет фильтр *14*.

Далее гранулы *б*, пройдя каналы деталей просыпаются в нижнюю часть контейнера *2*, через эластичный рукав *8* (например, сильфонного типа), который не передает контактную вибрацию за пределы вибромашины *1*, попадают в бункер *9*. Для обеспечения непрерывной и бесперебойной подачи гранул *б* в каналы деталей из бункера *9* гранулы *б* посредством транспортера *10* (например, шнекового типа с обрезиненными лопастями) через эластичный рукав *11* (аналогичному рукаву *8*) подаются в полость под крышкой *5* во время всего цикла импульсно-ударного упрочнения. После импульсно-ударного упрочнения каналов спаренных деталей с одной стороны отключается вращение шнека *12*, затем, после просыпания всех оставшихся над деталями шариков, вибростол *1* останавливают, снимают крышку *5*, производят переустановку пары деталей *4* (нижняя ставится наверх). Затем крышка устанавливается на свое место и цикл повторяется в той же последовательности, и на тех же режимах для обработки каналов в том же направлении. Таким образом, на обе детали оказывается одинаковое упрочняющее воздействие, в сумме процесс проходит на 15 % быстрее.

При предложенном способе обработки сужающихся криволинейных каналов шарики за счет импульсно-ударного механического воздействия создают стабильный микрорельеф без зон с микротрещинами, формируют в поверхностном слое материала детали остаточные напряжения отрицательного знака, обеспечивают равномерный наклеп и совмещая упрочнение с электрохимическим воздействием формируют заданную шероховатость по всем поверхностям лопатки. Режимы и длительность упрочнения обработки перед обработкой новой партии деталей корректируются по прогибу контрольных пластин.

### 3 Результаты исследований

Экспериментальные исследования технологических параметров импульсно-ударного упрочнения на показатели качества обработки выполнялись с использованием специального приспособления, имитирующего сужающийся межлопаточный канал (рис. 4) [9].

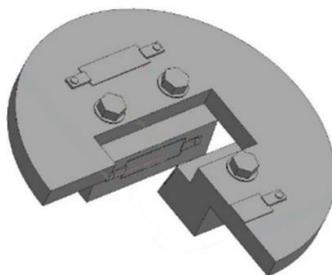


Рисунок 4 – Имитатор межлопаточного канала

Основным элементом этого устройства являются установленные в корпусе две вставки со скошенными боковыми поверхностями. Пространство между вставками представляет собой сквозной сужающийся канал, поверхности которого плоские. Чтобы корректировать ширину и углы схождения канала, вставки конструктивно выполнены съемными. К наружному торцу приспособления, скошенным к плоским поверхностям полости, имитирующей канал, прикрепляются плоские контрольные пластины исследуемых материалов. Поставленная цель: установление соотношений показателей качества импульсно-ударной обработки

узких сужающихся межлопаточных каналов криволинейного профиля (значения степени наклепа, остаточных напряжений отрицательного знака, их равномерности и зоны распространения, шероховатости на наружных и внутренних поверхностях канала, от режимов и времени комбинированного упрочнения, с учетом исходных физико-механических свойств материала и наследованной шероховатости).

Создана методика и технологическое обеспечение заданных показателей поверхности узкого сужающегося канала с закруткой по радиусу и регламент проектирования операций комбинированного импульсно-силового упрочнения, разработан новый патентоспособный технологический процесс упрочнения узких сужающихся криволинейных каналов комбинированным импульсно-ударным воздействием с продвижением свободного инструмента (ша-рообразных гранул) в условиях низкочастотных колебаний.

#### 4 Обсуждение и заключение

Определены закономерности взаимного влияния элементов технологической схемы «гранулы – контактный участок поверхности канала – продольный профиль канала» при последовательном продвижении вдоль поверхности с неравномерными физико-механическими свойствами, исключая заклинивание незакрепленного инструмента в технологически закрытом сужающемся канале.

Технология импульсно-ударного упрочнения апробирована в производственных условиях при создании новых образцов лопастных машин. Разработаны мероприятия по расширению сферы применения полученных результатов исследований.

#### Список литературы

1 Некрылов, А. М. Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы / А. М. Некрылов, Г. А. Сухочев, А. О. Родионов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Том 15. – № 9 (177). – С. 421 – 426.

2 Усов, С. В. Металлофизические аспекты повышения эксплуатационного ресурса деталей машин с помощью комбинированных физико-технических методов / С. В. Усов, И. П. Точилин, А. М. Некрылов, А. О. Родионов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – № 1(16). – С. 19-22.

3 Сухочев, Г. А. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей / Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов, В. Н. Сокольников // Научно-технические исследования в машиностроении. – 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.

4 Influence of Contact Efforts on the Surface Quality of Difficult Profile under Finishing Hardening Machining / Gennady A. Sukhochev, Vasilij N. Sokolnikov, Andrey M. Nekrylov // "Solid State Phenomena", vol. 316, 2021. – Режим доступа : <https://www.scientific.net/SSP.316.738>.

5 Некрылов, А. М. Formation of quality of a complex surface after combination processing / А. М. Некрылов, Г. А. Сухочев // Антропометрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности : мат-лы VI-ой междуна. науч.-практ. конф., 21-22 марта 2018 г. : в 2-х частях, ч. 1. Воронеж : ВГТУ, 2018. – С. 313-314.

6 Сухочев, Г. А. Параметры технологического процесса получения качественного поверхностного слоя деталей роторной группы / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, А. М. Некрылов // Современные технологии производства в машиностроении : сб. науч. тр., Воронеж : ФГБОУ ВПО ВГТУ, Вып. 12, 2019. – С. 83-86.

7 Патент № 2709072 Российская Федерация, В23Н 5/06, В24В 39/00. Способ упрочняющей обработки локальных участков поверхностей деталей роторов / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, А. М. Некрылов ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2019123080, заявл. 17.07.2019 ; опубл.

13.12.2019, Бюл. №35. – 8с.

8 Некрылов, А. М. Способ виброобработки межлопаточных каналов турбин с экструдированием гранул под действием низкочастотной вибрации / А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, Г. А. Сухочев, А. В. Норман // Научная опора Воронежской области : сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2019. – С. 402-404.

9 Сокольников, В. Н. Повышение работоспособности высокооборотных роторов в местах доводки комбинированными методами / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, А. В. Норман // Научная опора Воронежской области : сб. тр. победителей конкурса научно-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2019. С. – 229-232.

### References

1 Nekrylov, A. M. *Investigation of modes of hardening treatment of interscapular channels of rotor group parts* / A. M. Nekrylov, G. A. Sukhochev, A. O. Rodionov // *Strengthening technologies and coatings*. 2019. Vol. 15. № 9 (177). S. 421-426.

2 Usov, S. V. *Metallophysical aspects of increasing the operational life of machine parts using combined physical and technical methods* / S. V. Usov, I. P. Tochilin, A. M. Nekrylov, A. O. Rodionov // *Strengthening technologies and coatings*. – 2020. – №. 1 (16). – S. 19-22.

3 Sukhochev, G. A. *Strengthening and finishing treatment of technological hard-to-reach flow channels of parts* / G. A. Sukhochev, A. M. Nekrylov, A. Yu Grymzin, S. N. Podgornov, V. N. Sokolnikov // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. – 2020. – №. 7 (109). S. 20-23.

4 *Influence of Contact Efforts on the Surface Quality of Difficult Profile under Finishing Hardening Machining* / [Gennady A. Sukhochev](#), [Vasily N. Sokolnikov](#), [Andrey M. Nekrylov](#) // "Solid State Phenomena", vol. 316, 2021. – Режим доступа: <https://www.scientific.net/SSP.316.738>.

5 Nekrylov, A. M. *Formation of quality of a complex surface after combination processing* / A. M. Nekrylov, G. A. Sukhochev // *Anthropometric sciences: an innovative view of education and personal development: materials of the VI-th international. scientific-practical Conf., March 21-22, 2018* : in 2 parts, part 1. Voronezh : VSTU, 2018. – pp. 313-314.

6 Sukhochev, G. A. *Parameters of the technological process of obtaining a high-quality surface layer of parts of the rotor group* / G. A. Sukhochev, V. N. Sokolnikov, A. M. Nekrylov // *Modern production technologies in mechanical engineering : collection of articles. scientific. tr., Voronezh : FGBOU VPO VGTU, Issue. 12, 2019. - S. 83-86.*

7 Patent №. 2709072 Russian Federation, B23H 5/06, B24B 39/00. Method of hardening treatment of local areas of surfaces of rotor parts / G. A. Sukhochev, V. N. Sokolnikov, A. M. Nekrylov ; applicant and patentee Voronezh State Technical University. – №. 2019123080, app. 07.17.2019 ; publ. 13.12.2019, Bul. №. 35. – 8p.

8 Nekrylov, A. M. *Method of vibration treatment of turbine blade channels with extrusion of granules under the influence of low-frequency vibration* / A. M. Nekrylov, A. Yu. Grymzin, G. A. Sukhochev, A. V. Norman // *Scientific support of the Voronezh region: collection of articles. tr. winners of the competition of research papers of students and postgraduates of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2019. S. – 402-404.*

9 Sokolnikov, V. N. *Improving the efficiency of high-speed rotors in the areas of fine-tuning by combined methods* / V. N. Sokolnikov, G. A. Sukhochev, A. M. Nekrylov, A. Yu. Grymzin, A. V. Norman // *Scientific support of the Voronezh region : collection of articles. tr. the winners of the scientific research competition. works of students and postgraduates of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2019. S. – 229-232.*