

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-3-3-3-18](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-3-3-3-18)



УДК 621

UDC 621

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЬНОЛИТЫХ ТУРБИН С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

## INCREASING THE TECHNOLOGICAL PROCESSING OF WHOLE-LIT TURBINES, TAKING INTO ACCOUNT CONSTRUCTIVE TECHNOLOGICAL FEATURES

✉<sup>1</sup> Сухочев Геннадий Алексеевич, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [suhotchev@mail.ru](mailto:suhotchev@mail.ru)

✉<sup>1</sup> Sukhochev Gennady Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: [suhotchev@mail.ru](mailto:suhotchev@mail.ru)

Грымзин Андрей Юрьевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [sask222@mail.ru](mailto:sask222@mail.ru)

Grymzin Andrey Yurievich, Postgraduate student of the Department "Technology of Machine Building", Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: [sask222@mail.ru](mailto:sask222@mail.ru)

**Аннотация.** Объектами исследования в данной работе являются комплексные технологические процессы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей межлопаточного канала цельных литых турбин с кривизной второго порядка и закруткой по радиусу, для повышения их технологичности и достижения заданных конструктивных параметров.

**Annotation.** The objects of study in this work are complex technological processes of combined finishing and hardening treatment of the surfaces of the interblade channel of solid cast turbines with a second-order curvature and a twist along the radius, to improve their manufacturability and achieve the specified design parameters.

**Ключевые слова:** МЕЖЛОПАТОЧНЫЙ КАНАЛ, ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ, ТУРБИНА, НАКЛЕП, ШЕРОХОВАТОСТЬ.

**Keywords:** INTERBLADE CHANNEL, MANUFACTURABILITY, TURBINE, HARDENING, ROUGHNESS.

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

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Лопаточные детали, типовыми представителями которых являются цельные колеса турбин, входят в конструкцию основных видов энергетических машин, двигательных установок авиационно-космической техники и других базовых отраслей машиностроения. Высокая степень сложности пространственной конструкции лопаток, жесткие режимы эксплуатации и постоянно обновляющаяся номенклатура изделий накладывают ограничения на стандартизацию и унификацию конструктивных элементов турбин. Поэтому отработка на технологичность таких деталей смещается в сторону улучшения производственно-технологических показателей по материалоемкости и трудоемкости изготовления. Наиболее нетехнологичны турбины закрытого типа с неразъ-

емным бандажом, имеющие криволинейные участки сужающихся или расходящихся стенок межлопаточного пространства [1]. В этом случае каналы не имеют сквозного просвета и получение заготовок турбин технологически большей частью ограничено методами литья в оболочковые формы с последующей высокотемпературной газостатической обработкой. Межлопаточные пространства в заготовках формируются литейными формами в условиях трудно прогнозируемой кристаллизации жаропрочных сплавов и усадочных явлений, способствующих образованию корок с трещинами и пористостью. Такие заготовки передают на последующие операции технологии изготовления наследованный поверхностный слой на лопатках с недопустимыми для эксплуатации дефектами. Широко известные отечественные научные школы (ИМАШ РАН, НИАТ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, СГАУ им. С.П. Королёва, г. Самара, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, ВГТУ г. Воронеж и др.) для обработки литых поверхностей отдают предпочтение традиционным эффективным, но непроизводительным вибротехнологиям [2]. Попытки применения традиционной дробеструйной обработки приводили к повреждению тонких кромок лопаток. В технологически «закрытых» зонах межлопаточного пространства, где все известные технологии неэффективны, практикуется ручная неравномерная и трудоемкая зачистка. Большой частью технологически наследованные дефекты литья полностью не устраняют и после дополнительной трудоемкой доводки и нескольких длительных параметрических испытаний с переборками агрегатов изделия допускают до эксплуатации [3]. Это снижает уровень прогнозируемой разработчиком технологичности в разы. Применительно к новым изделиям ситуация с механизированными технологиями отделки и упрочнения межлопаточных поверхностей изделий по степени научного обоснования и оснащённости не обеспечивает требуемых параметров качества и не способствует повышению их производственной технологичности. Остаются актуальными задачи теоретического описания оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки цельных турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности межлопаточного пространства при минимизации затрат. Решение этого научно-технического вопроса предлагается на основе обоснованной методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей выбором средств и режимов формообразования поверхностей межлопаточных каналов по конструктивно-технологическим признакам. Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и научным направлением ВГТУ в рамках ГБ НИР № 2018.15 «Разработка, исследование и практическое использование нетрадиционных методов и средств проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности аэрокосмической техники нового поколения». Целью работы является разработка теоретических основ и методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей выбором средств формообразования поверхностей межлопаточных каналов по конструктивно-технологическим признакам.

Задачи исследования:

1. Разработать теоретические основы процесса выбора оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки цельных литых турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности межлопаточного пространства при минимизации затрат и заданном уровне качества.

2. Исследовать физическую модель технологической системы последовательного применения различных методов упрочняющих и отделочных воздействий на одной и той же лопатке, исходя из отличия конструкционного строения отдельных участков межлопаточного канала, сформированного литьем.

3. Установить область влияния технологических параметров и режимов процесса комплексного последовательного воздействия различных методов обработки на стабильность показателей качества согласно технической документации.

4. По результатам экспериментальных сравнительных исследований процессов снижения шероховатости и упрочнения установить максимально производительные технологические операции обработки для участков межлопаточных каналов, значительно различающихся по конструктивно-технологическим признакам.

5. Сформулировать регламент выбора наиболее технологичных отделочно-упрочняющих операций комбинированного технологического процесса обработки лопаток в соответствии с особенностями геометрии криволинейных каналов и требований к качеству их обработки в цельных литых турбинах.

6. Научно обосновать и предложить комплексный производительный технологический процесс комбинированной обработки узких межлопаточных криволинейных каналов цельных турбин с патентованием основных технических решений.

Решение этих задач позволит теоретически и методически обосновать порядок оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей путем выбора по конструктивно-технологическим признакам средств формообразования каналов цельных турбин [4, 5]. Результаты исследований дополняют достигнутый задел в области научно обоснованных методов и средств повышения производственной технологичности при изготовлении лопаточных деталей высокой конструктивно-технологической сложности.

## 2 Материалы и методы

Объектами исследования являлись комплексные технологические процессы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей межлопаточного канала цельных литых турбин с кривизной второго порядка и закруткой по радиусу.

Методы исследования. Исследования теоретической направленности основаны на научной базе технологии машиностроения, технологии физико-технической обработки, технической механики, математико-физического моделирования на современных программных продуктах. Экспериментальные исследования проводились на специализированном оборудовании и приборах с высокой точностью измерений, с планированием экспериментальных работ по методикам оценки эффективности технологического процесса упрочнения, разработанной автором.

Предметом исследования явился механизм взаимного влияния параметров технологической схемы обработки с направленными комбинированными воздействиями в условиях разной степени доступности обрабатываемых криволинейных поверхностей межлопаточного пространства, а также проблемно-ориентированное повышение технологичности производства с учетом конструкции цельных турбин.

Достоверность результатов определяется конкретностью в выборе задач, проведением расчетов по научно обоснованным зависимостям, корректностью в применении математического моделирования, тщательным анализом результатов эксперимента, подтверждением сходности и достаточным соответствием теоретических разработок с данными эксперимента.

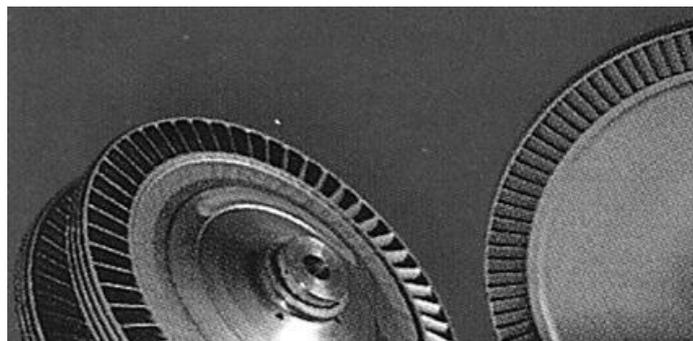
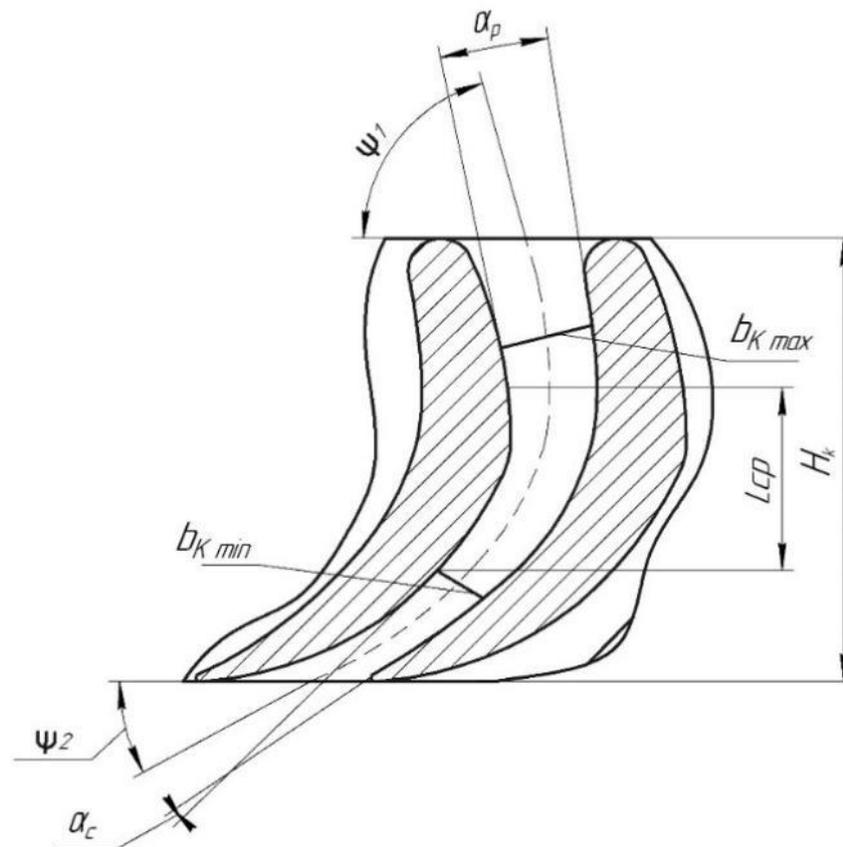


Рисунок 1 – Фрагменты турбины с цельным бандажом и ее заготовки

### 3 Результаты исследований

Исходные положения, гипотезы:

1. Межлопаточный канал цельной литой турбины, исходя из возможности подвода обрабатывающего инструмента, по уровню снижения технологичности можно условно разделить на три части в следующей последовательности: входной (1), выходной (2) и срединный (3), где в наиболее труднодоступных сечениях значения угла между касательными к стенкам канала и радиальной плоскости детали на входе и выходе канала, обозначенный как угол раскрытия  $\Psi_i$ , составляет от  $20^\circ$  до  $70^\circ$  (рис. 2).



$b_{K\ min}$  и  $b_{K\ max}$  – минимальная и максимальная ширина;  $\alpha_c$ ,  $\alpha_p$  – углы сужения и расширения относительно центральной зоны канала;  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – углы наклона продольной оси межлопаточной полости к радиальной плоскости детали на входе и выходе канала;

$\Delta\Psi_{max}$  – наибольший угол искривления продольной оси;  $H_k$  – глубина канала

Рисунок 2 – Схема межлопаточного пространства цельной турбины в продольном сечении

2. Упрочненное состояние по всей поверхности межлопаточного пространства, выраженное через степень наклепа, возможно обеспечивать равномерно, регулируя энергетические составляющие деформационных процессов при различных технологических схемах подачи обрабатывающей среды (потока сферических инденторов) в канал цельной турбины.

3. Механическое ударное воздействие на лопатки придает во время деформации материалу эффект уплотнения по глубине. Основными технологическими факторами, влияющими на пока-

затели упрочнения являются скорость соударения и угол встречи потока инструмента с поверхностью; формирование шероховатости в большей степени зависит от размеров отпечатков при ударе и их плотности на единицу площади обработки [6].

4. Ожидается, что после реализации основных операций комплексной технологии обработки трех условных частей канала (входного, выходного и срединного) по различным технологическим схемам (гранулами, дробью, шариками разной формы и, из различных материалов, фазовых составов и фракций) возможно появление на узких полосках переходных участков мест избыточного наклепа и шелушения.

5. Привлечение смеси сжатого воздуха со слабопроводящей жидкостью и потока гранул (шариков), диспергирующей газожидкостную среду в состояние капельной фракции, обеспечивает минимально необходимой энергией процессы микросоударения микрошариков с вершинами микровыступов на значениях, способствующих выравниванию микрогеометрии на переходных участках.

6. Малая энергия потока гранул с токопроводящей жидкостью, разбиваемой сжатым воздухом до фракции в 0,5-0,8 мм за счет параллельного отскока от стенок позволяет им проникать, с несколько убывающей степенью воздействия, вглубь канала и распространять эффект комбинированного выравнивания вершин выступов микрорельефа в местах перехода деформационных ударных воздействий на границах участков с различным исходным и текущим состоянием по обрабатываемости [7]. На решение поставленных задач направлен проект комплексного технологического процесса, основанного на проблемно-ориентированных конструктивно-технологических решениях. Сквозной маршрут обработки каналов включает взаимно влияющие технологические операции, которые схематично показаны на рисунках 3 и 4.

Экспериментальные исследования:

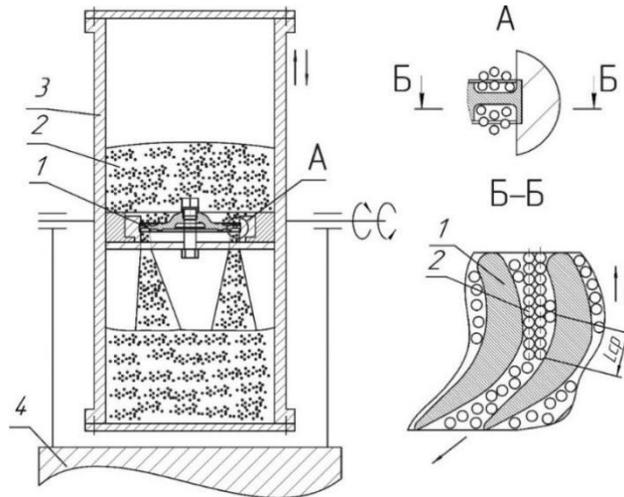
Проведение предварительного эксперимента для апробации выбранного технологического решения реализовано на типовой цельнолитой турбине с  $b_{к\ min}$  в 5,3 мм [8]. На первой операции проводилась виброударная обработка (рис. 3) под действием вибрации частотой 20-24 Гц при амплитуде колебаний около 4 мм. Инструментом служил насыпной объем двухмиллиметровых закаленных стальных шариков (рис. 4). В процессе обработки обеспечивалось циклическое перемещение шариков вдоль оси межлопаточного пространства путем экструдирования их насыпного объема под действием вибрации и силы тяжести сквозь каналы турбины в обоих направлениях. Направление перемещения менялось за счет периодического вертикального переворота корпуса экспериментального устройства. Обработка в направлении схождения (расхождения) стенок канала, выполнялась по 30 мин., штучное время обработки одной турбины составляло 80 мин. На второй операции поток дроби подавался на входные и выходные части канала (рис. 5) одновременно в устройстве с двумя сопловыми аппаратами (рис. 6). Операция дробеструйной обработки проводилась по штатной технологии подачей потоком сжатого воздуха давлением до 0,6 МПа дробью диаметром 1,6-2,2 мм со скоростью 60 м/с. Угол наклона потока к обрабатываемой поверхности 60-90°, общее машинное время обработки лопаток турбины составило 9 мин. Предварительный эксперимент показал следующее (рис. 7):

– глубина наклепа на срединных участках межлопаточного канала, ограниченного примерно сечениями в точках  $b_{\min}$  и  $b_{\max}$ , составила 0,04-0,06 мм, шероховатость 0,8-1,2 мкм;

– глубина наклепа на входных и выходных участках канала до сечений  $b_{\min}$  и  $b_{\max}$ , составила 0,2-0,3 мм с явлениями сдвига и перенаклепа, шероховатость 1,4-1,7 мкм;

– глубина наклепа на переходных участках межлопаточного канала, за сечениями  $b_{\min}$  и  $b_{\max}$  до середины канала, составила 0,05-0,16 мм, шероховатость 0,9-1,6 мкм.

Анализ результатов эксперимента определил характер исследований в направлении поиска оптимальных энергетических составляющих процесса обработки всего профиля канала с сокращением трудоемкости за счет выбора средств технологического оснащения и режимов в соответствии с конструктивно-технологическими особенностями цельнолитой турбины [9].



1 – турбина, 2 – насыпной объем шариков, 3 – контейнер, 4 – вибростенд

Рисунок 3 – Схема обработки каналов турбины виброударным методом

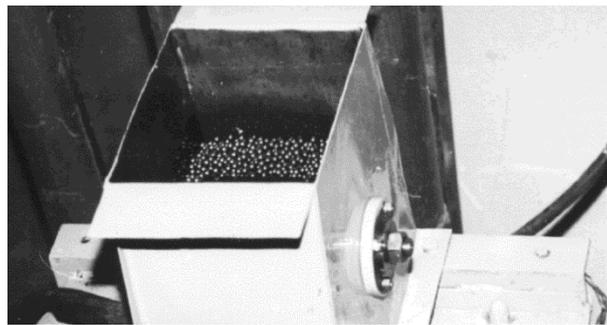
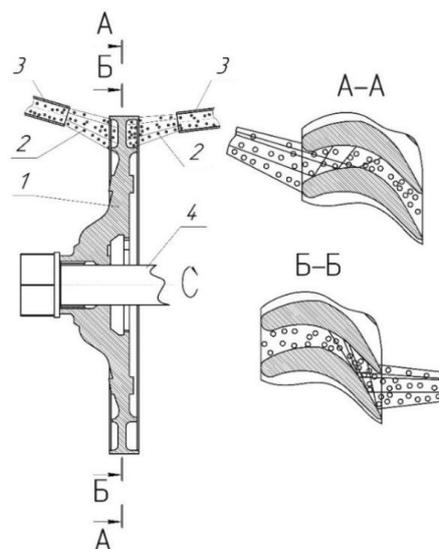


Рисунок 4 – Вибростенд с насыпным объемом шариков



1 – турбина, 2 – поток шариков, 3 – сопло, 4 – вал дробеструйного устройства

Рисунок 5 – Схема обработки каналов турбины дробеударным методом

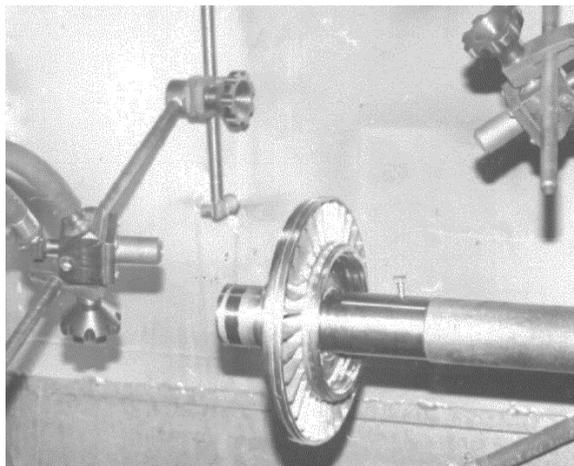
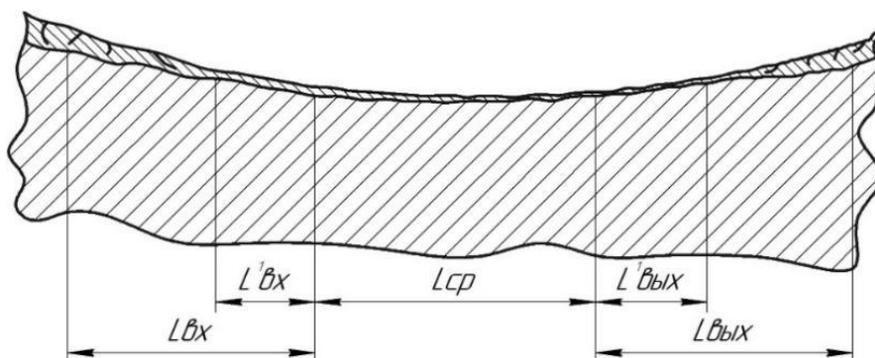


Рисунок 6 – Технологическая наладка обработки двумя сопловыми аппаратами



$L_{ср}$  – поверхность, упрочненная преимущественно виброударным методом;  $L_{вх}$  и  $L_{вых}$  – участки поверхности, упрочненные преимущественно дробью, с технологическими дефектами;  $L'_{вх}$  и  $L'_{вых}$  – зоны нестабильного наклепа после совместного упрочнения указанными способами; верхний слой – наклепанный слой материала

Рисунок 7 – Характер распределения наклепанного слоя материала по сечению канала после обработки шариками различными методами

Далее исследования проводились на основе выдвинутых гипотез, механизма равномерной обработки всей поверхности межлопаточного пространства с кривизной второго порядка, в котором воздействия различных методов и инструментов рассматриваются как обобщенный комплексный процесс формирования требуемых стабильных показателей технологической системы применительно к цельнолитой турбине. В целом проблема повышения технологичности при обеспечении равномерной обработки каналов в цельной турбине заключается в том, что перенаклеп, неравномерная шероховатость и несплошность обработки появляются на поверхности в местах взаимного перекрытия участков воздействия различных методов поверхностного пластического деформирования (рис. 8) из-за несовпадения энергий струйных и вибрационных ударов сфероидных инденторов (шариков). Это показало, что требуется дополнительное трудоемкое устранение дефектов и при этом неравномерность физико-механического состояния материала на поверхности не гарантируется [10]. Для производительного выравнивания физико-механического состояния поверхностного слоя на лопатках цельнолитой турбины необходимо учитывать:

- одинаковые по размерам шарики воздействуют на поверхность с различной по значению энергией вследствие различной скорости контактирования и угла соударения, исходя из конструктивно-технологических особенностей турбины;

- обеспечить равномерный наклеп по всему профилю канала возможно при поддержании одинаковых значений усилия контактирования шаров с поверхностью лопатки за счет выбора режимов обработки по различным технологическим схемам, но с соизмеримыми энергетическими возможностями;

- при наложении низковольтного напряжения вода в газожидкостной среде со стальными шарами, обладая устойчивой слабой проводимостью, будет способствовать выравниванию микрорельефа, ускоренно растворяя вершины микровыступов, образовавшихся при пластическом деформировании поверхности.

Результаты предварительного эксперимента показали результаты формального технологического использования предполагаемых средств обработки. Так на рис. 8 показаны контрольные пластины после виброобработки и обработки дробью. Обработка дробью показала резкое увеличение пластических отпечатков со сдвигом материала по углу подачи потока дроби.

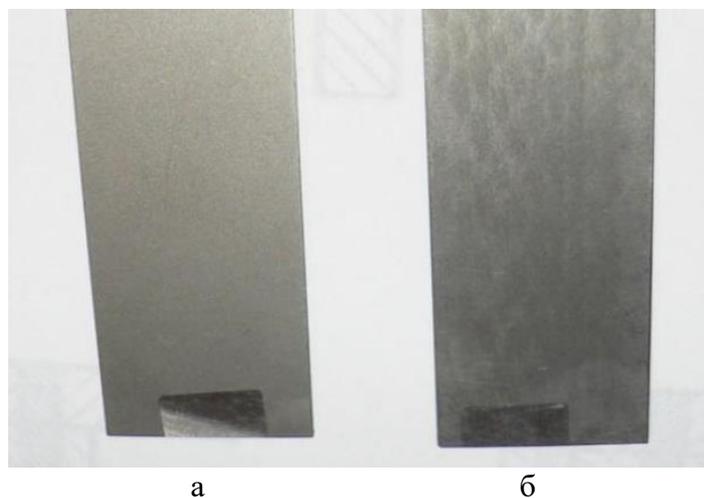


Рисунок 8 – Пластины после виброобработки (а) и обработки интенсивным потоком дроби (б)

Налицо энергетическое несоответствие этих видов воздействий, которое необходимо упорядочивать. Учитывая, что характер виброударной обработки в узком канале технологически отличается от классической вибротехнологии, кинетическая энергия  $E_{квш}$  шарика в срединной части для  $s$  соударений со стенками в ограниченном пространстве [11] составляет:

$$E_{квш} = m_{ш}(V_{вш}^2/2 + N_y B_p g) \cos \Psi, \quad (1)$$

где  $V_{вш}$  – виброскорость шарика при единичном соударении,  $V_{вш} = A_{вк} \cdot \pi \cdot f_{вк} / 5$ ;  $A_{вк}$  – амплитуда колебаний (перемещений под действием вибрации);  $f_{вк}$  – частота виброколебаний в технологической системе;  $m_{ш}$  – масса одного шарика,  $m_{ш} = \rho_{ш} \cdot D_{ш}^3 / 6$ ;  $\rho_{ш}$  – плотность металла используемых шариков (дроби);  $N_y$  – среднее количество шариков, образующих вертикальный ряд по ширине бандажа турбины без учета вышерасположенного насыпного объема;  $B_p$  – число вертикальных рядов шариков по сечению срединного участка,  $B_p = (b_{кmin} + b_{кmax}) / 2D_{ш}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $D_{ш}$  – диаметр шарика;  $\Psi$  – усредненный угол искривления оси канала (для входного участка  $\Psi_{вх}$ , для выходного –  $\Psi_{вых}$ ).

Уравнение кинетической энергии для потокового шарика  $E_{кпш}$  на входном (выходном) участке канала для случая соударений под действием потока дроби определится выражением:

$$E_{KIII} = 0,5m_D(V_D \cdot \cos \alpha_{II} + K_{\sin \psi} \cdot V_o \cdot \cos \alpha_o), \quad (2)$$

где  $V_D$  – скорость единичного шарика (дробин) при соударении;  $V_o$  – скорость отскока от противоположной стенки канала (около 28-30 % от  $V_D$ );  $m_D$  – масса одного шарика (дробины);  $K_{\sin \psi}$  – коэффициент, учитывающий ослабление удара от отскока по глубине канала из-за кривизны (на периферии  $\approx 1$ , на срединном участке равен 0,95-0,8);  $\beta_{II}$  – угол падения дробин на поверхность (90-60°);  $\beta_o$  – угол отскока дробин от стенки (60-90°), т. е. соизмерим с  $\beta_{II}$ .

Уравнение баланса кинетической энергии при обработке всего канала составлено исходя из уравнивания виброударного и струйно-ударного воздействий, основным ограничением которого является примерное равенство размеров пластических отпечатков на поверхности лопатки, что формирует соизмеримые величины шероховатости и глубины наклепа [12]. Поэтому, после приведения фракций шариков и дробин к одному типоразмеру  $D_{III}$  с одинаковой массой  $m_{III}$  получаем:

$$E_{KBIII} = E_{KIII};$$

$$m_{III}(V_{BIII}^2 / 2 + N_y B_p g) \cos \psi = 0,5m_D(V_D^2 \cos \alpha_{II} + K_{\sin \psi} 0,3V_D \cos \alpha_o). \quad (3)$$

После преобразований получаем выражение расчетной скорости дробин, соотнесенной с установленными режимами виброобработки и геометрией канала:

$$V_D = \frac{A_{вк} \pi f_{вк}}{5} \sqrt{\frac{\cos \psi}{(1 + 0,3K_{\sin \psi}) \cos \alpha}} \left( 1 + \sqrt{\frac{N_y b_k g}{2D_{III}}} \right). \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что для обеспечения равномерности обработки на стыке воздействий различными методами поверхностно-пластической деформации (ППД) определяющее значение при выборе режимов имеет геометрия канала и технологические возможности обработки его срединной части. Первенство виброударных режимов перед дробеструйными определено тем, что технологические параметры виброобработки могут быть рассчитаны и являются управляемыми.

Скорость потока дробин для оценки интенсивности обработки можно рассчитать по формуле:

$$V_D = V_{сж} 0,8 \sqrt{K_\rho \frac{B}{D_{III}}}, \quad (5)$$

где  $V_{сж}$  – скорость потока сжатого воздуха;  $K_\rho$  – коэффициент соотношения плотностей,  $K_\rho = \rho_{сж} / \rho_{III}$ ;  $\rho_{сж}$  – плотность сжатого воздуха в потоке;  $B$  – усредненное значение расстояния от сопла до лопатки. Тогда расчет скорости потока можно регулировать, с учетом (4) и (5)

$$V_{сж} = \frac{A_{вк} \pi f_{вк}}{4} \sqrt{\frac{D_{III} \cos \psi}{(1 + 0,3K_{\sin \psi}) K_\rho B \cos \alpha}} \left( 1 + \sqrt{\frac{N_y b_k g}{2D_{III}}} \right). \quad (6)$$

Уточняя известные формулы, можем спрогнозировать глубину упрочнения  $H_y$ :  
- для расширяющейся части канала:

$$H_{yp} = \sqrt{\frac{m_{ш} \cdot V_d \sin \beta_n \cdot \cos \beta_0}{2\sigma_T t_1} K_{\sin\psi} K_{\alpha_p}} ; \quad (7)$$

- для сужающейся части канала:

$$H_{yc} = \sqrt{\frac{m_{ш} \cdot V_d \sin \beta_n \cdot \cos \beta_0}{2\sigma_T t_1} K_{\sin\psi} K_{\alpha_c}} , \quad (8)$$

где  $\beta_{II}$  – угол падения дроби на поверхность лопатки (90-60°);  $\beta_O$  – угол отскока дроби от стенки канала (60-90°), т. е. реально соизмерим с  $\beta_{II}$ ;  $K_{\alpha_c}$  ( $K_{\alpha_p}$ ) – коэффициент, учитывающий влияния на усилие деформирования угла схождения (расхождения) стенок межлопаточной полости турбины от срединной части к входным и выходным кромкам лопаток,  $K_{\alpha_c}=0,7-0,85$ ,  $K_{\alpha_p}=0,9-1,0$ .

Шероховатость литой обработанной поверхности характеризуется исходной, не устраняемой технологически, волнистостью и размером пластических отпечатков. Прогнозные расчеты в данном случае слишком сложны и недостоверны. Окончательно подтвердить достижимые параметры обработки можно методом направленного контроля наклепа и шероховатости плоскостей настроечных образцов типа пластин Альмена, фиксирующих своим прогибом полученную степень наклепа. Для выравнивания шероховатости по профилю канала приходим к использованию эффекта анодного растворения материала лопатки [13]. Основным технологическим параметром производительности является удельный расход обрабатывающей среды  $Q_{жс}$  при использовании жидкостно-газового проводящего потока с шариками:

$$Q_{жс} = k_{жс} F_{п} V_{сжс} , \quad (9)$$

где  $k_{жс}$  – коэффициент концентрации жидкостной фазы, снижающей скорость потока (0,9-0,95);  $F_{п}$  – площадь сечения газожидкостного потока.

Экспериментальная проверка теоретических результатов и выбор технологических параметров комплексной обработки поверхностей лопаток цельнолитых турбин

Эксперименты по поиску и исследованию наиболее производительной и малозатратной технологии комплексной комбинированной обработки поверхностей лопаток в условиях узких каналов проводили на специализированных установках (рис. 4 и 6). При настройке режимов и технологических схем обработки использовали плоскости контрольных образцов типа пластин Альмена из закалённой высокоуглеродистой стали толщиной 1,2 мм размером 20 на 70 мм в плане. Образцы получали из стали У8А и жаропрочных литейных сплавов ЖСЗДК и ВЖЛ14 для цельных турбин с бандажом. В качестве инструмента служили стальные закаленные шарики диаметром 2 мм. Сопло струйного аппарата имело с внутреннее отверстие диаметром 12 мм. Расстояние от среза соплового насадка до обрабатываемых поверхностей составляло в среднем 250 мм. [14]. Величина стрелы прогиба контрольных пластинок являлась объективным параметром экспериментального определения эффективности поверхностного упрочнения лопаток, так как отражала достигнутую степень наклепа и уровень остаточных напряжений отрицательного направления. Степень упрочнения (наклепа) устанавливалась по снижению микротвердости от поверхности к середине толщины пластинки замерами на скошенном шлифе с помощью микротвердомера. Анализ полученных в эксперименте данных (рис. 9) с целью исключения перенаклепа (рис. 7 и 8) и повышения производственной технологичности показал возможность снижения времени виброобработки каналов турбины в обоих направлениях до 50 мин, а обдувку дробью всех лопаток турбины - до 6 мин.

Окончательная обработка по выравниванию микрошероховатости (без учета волнистости) проводилась дробеструйным методом сферическими шариками описанного диаметра в 2 мм с газообразным воздушно-жидкостным потоком и наложением напряжения 5-7 В. Режимы отличаются от предыдущей операции только углом соударения шариков с поверхностью около 60° для более глубокого проникновения дроби в межлопаточное пространство. Расход жидкостной фазы среды составил 1,1–1,5 м³/мин. [15]. Выравнивающим инструментом служили сферические гранулы из жаропрочного никелевого сплава, аналогичного по составу материалу литой турбины. Необходимость этого приема состояла в исключении внедрения в поверхность лопатки углерода и прочих элементов стального закаленного шара. После обработки поверхности в течение трех минут шероховатость поверхности в канале разных турбин в партии составила 0,8-0,9 мкм с разбросом значений до 2,4 %, что показывает сходимость с расчетами и соответствует требованиям к эксплуатации (рис. 10). На рис. 11 показаны комплексно обработанные лопатки.

Обоснование режимов:

При обработке диаметр  $D_{ш}$  не должен быть кратным  $b_{кmin}$ . Величины задаваемых показателей по наклепу и шероховатости назначаем в соответствии с требованиями разработчика:

1. С учетом принятых размеров шариков и геометрических размеров канала, назначая амплитуду и частоту колебаний, по формуле (1) рассчитаем виброскорость для обработки срединной части межлопаточной полости. Затем с учетом выражений (4) и (5) по формуле (6) находим скорость потока для дробеударной обработки входного и выходного участков.

2. Достижимые значения по наклепу проверяем по формулам (7) и (8), при необходимости корректируем скорости соударений в предварительных расчетах. Окончательно скорость потока дроби утверждаем по стреле прогиба пластинок. Объем расходуемой жидкостно-газовой среды определяем по формуле (9).

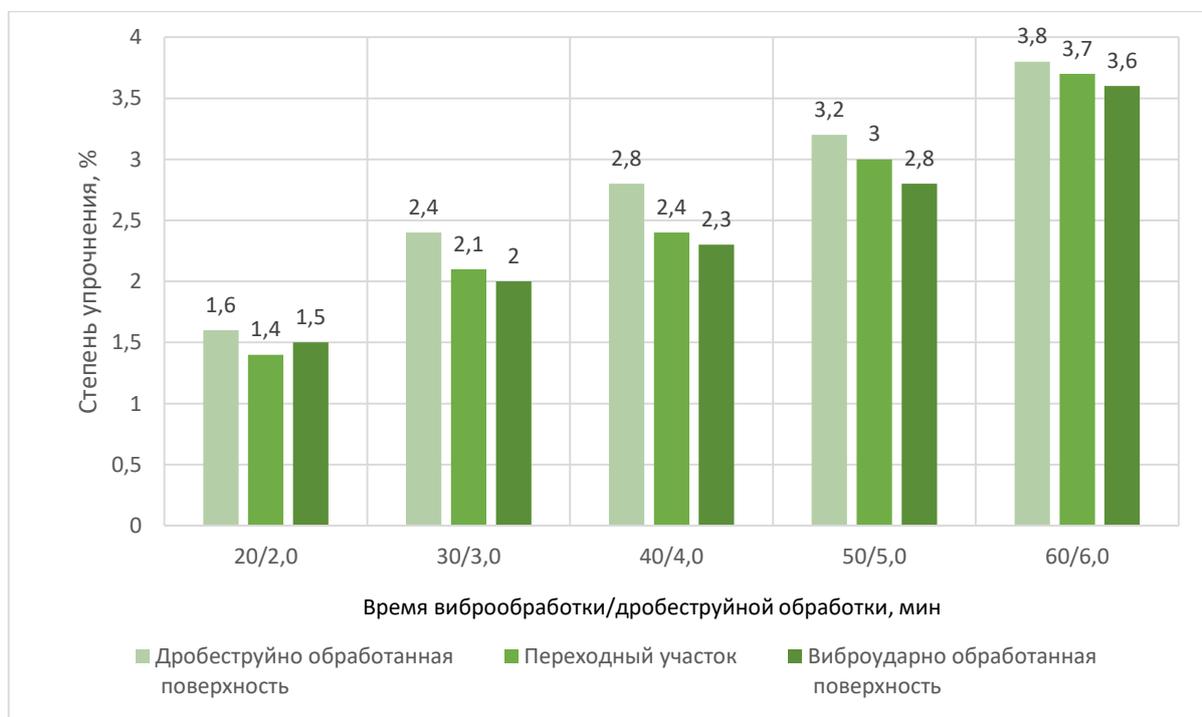


Рисунок 9 – График зависимостей степени упрочнения от времени обработки

3. Выбираем размер шариков по минимальному межлопаточному состоянию  $b_{кmin}$ :

$$D_{шmax} \leq 0,5b_{кmin}. \quad (10)$$

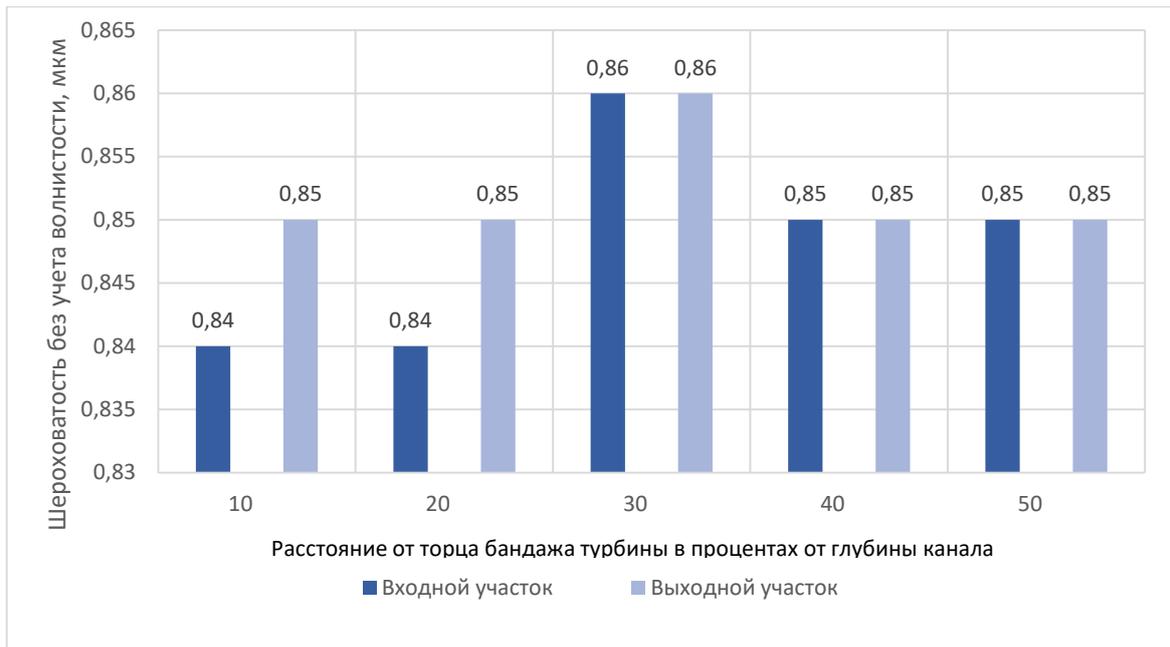


Рисунок 10 – Распределение значений шероховатости по глубине канала



Рисунок 11 – Лопатки после комплексной комбинированной обработки

4. Общее время комплексной обработки всех каналов цельнолитой турбины определяем по формуле:

$$T_{шт} = T_{шт} / n_{шт} + \frac{2100}{f_{вк}} \cdot \left[ \frac{0,5\sigma_T}{(1,2 + P_K) \cdot K_{пер}} - 1 \right] + \pi \frac{D_{лсп}}{D_p N_T} (1 + K_{эx}), \quad (11)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести металла турбины, МПа;  $P_K$  – давление в контакте, МПа;  $T_{шт}$  – время настройки режимов перед обработкой партии турбин (10-20 мин);  $n_{шт}$  – объем производственной партии лопаточных деталей, шт;  $D_{лсп}$  – средний диаметр расположения лопатки, равен  $(D_{ст} + D_{б}) / 2$ , мм;  $D_{ст}$  и  $D_{б}$  – диаметры ступицы и бандажа литой турбины, соответственно, мм;  $D_p$  – диаметр пятна от распыливания потока по поверхности турбины, мм;  $N_T$  – число оборотов турбины при дробеструйной обработке, мин<sup>-1</sup>;  $K_{пер}$  – переводной коэффициент между прогибами контрольной пластинки из углеродистой стали и материала турбины (определяется экспериментально);  $K_{эx}$  – уточняющий коэффициент для времени перехода обдувки дробью при электрохимическом выравнивании шероховатости по сечению канала (0,4-0,6).

Оперативный выбор оборотов турбины при обдувке дробью:  $N_T = \pi D_{лср} / t_{np} D_p n_p$ , где  $n_p$  – число пятен распыла укладываемых по  $D_{лср}$  напротив соплового аппарата;  $t_{np}$  – время обработки одного пятна распыла (определяется экспериментально) [15].

Проектирование комплексной высокотехнологичной комбинированной обработки поверхностей межлопаточных каналов цельнолитых турбин с бандажом:

1. Проектирование технологических операций:

- обработка на технологичность конструкции каналов турбины на возможность реализации наиболее производительных методов обработки турбины с бандажом;
- для технологического оснащения операций комплексной комбинированной обработки проводят выбор из стандартного ряда или осуществляют проектирование специальной оснастки в соответствии с конструктивно-технологическими признаками межлопаточных полостей цельнолитой турбины:  $b_{кmin}$ ,  $b_{кmax}$ ,  $\alpha_c$ ,  $\alpha_p$ ,  $\Psi_{вх}$ ,  $\Psi_{вых}$ ,  $V_{ВШ}$ ,  $V_{сж}$ ,  $\beta_{П}$ ,  $\beta_{O}$ . Если указанные углы более  $45^\circ$ , то для этого участка выбирается дробеударный метод, если наоборот – то виброударный;
- установление режимов для выбранных операций прибегая к базе данных конструкторско-технологических решений по обработке каналов цельнолитых турбин;
- аттестация готовности, проверка штатного функционирования оборудования;
- корректировка расчетных технологических режимов после обработки контрольных настроенных пластин на спецоснастке, имитирующей условия в канале;
- контроль полученных показателей обработки первой штатной турбины;
- окончательное оформление и передача комплекта технологической документации для обработки установочной партии межлопаточных полостей турбин.

2. Производственное внедрение:

- установочная обработка первой турбины из партии по опытной технологической документации, контроль параметров качества на плоских поверхностях контрольных пластин;
- обработка межлопаточных полостей установочной партии штатных турбин;
- корректирование опытной технологической документации в части режимов;
- введение в состав штатной документации режимов обработки, скорректированных по результатам контроля качества установочной партии литых турбин;
- выпуск акта освоения технологического процесса (операций) комбинированной обработки каналов турбин после проверки в производственных условиях;
- оформление технологических инструкций, типовых технологических процессов и операций по комплексной комбинированной обработке каналов турбин

#### 4 Обсуждение и заключение

Был спроектирован производительный процесс комплексной малозатратной обработки поверхностей межлопаточных каналов цельнолитой турбины с повышенным уровнем технологичности за счет выбора методов и средств для его реализации по конструктивно-технологическим признакам. Разработанная методика выбора технологической схемы и режимов позволяет осуществлять комплексный комбинированный процесс для обработки лопаток литых турбин с минимизацией затрат относительно базовой технологии.

Также можно сделать следующие выводы:

1. Научно обоснованы методы и средства повышения производственной технологичности цельнолитых турбин за счет оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки межлопаточных каналов, что обеспечило параметры заданного физико-механического состояния поверхностей межлопаточного пространства при минимизации затрат.

2. Объяснен механизм взаимного влияния технологических и конструктивных параметров поверхностей в межлопаточном пространстве цельнолитых турбин, что позволило предложить оптимальные сочетания различных методов (виброударного и дробеструйного) для

входных, выходных, срединных участков и переходных зон межлопаточного пространства с кривизной поверхностей второго порядка.

3. Разработана методика высокопроизводительного технологического обеспечения равномерных значений по шероховатости и степени наклепа (разброс значений до 2 %), что дает возможность равномерной и производительной обработки без использования немеханизированной трудоемкой доводки лопаточных агрегатов.

4. Рассчитаны режимы обработки, позволяющие снизить трудоемкость: общее машинное время поэтапной обработки всех каналов различными методами не более 60-65 мин; угол соударения шариков с поверхностью лопатки  $\beta = 60^\circ \pm 30^\circ$ ; виброскорость в насыпном объеме шариков 0,6 м/с; скорость потока сжатого воздуха с дробью 40-50 м/с; инструмент – закаленные шарики фракции 2 мм, на последнем этапе – в потоке газообразной жидкости под напряжением 5–7 В. Технологически обеспеченные значения:  $R_a = 0,84-0,086$  мкм, разброс степени наклепа  $\pm 2$  %. Интервалы показателей обработки менее полученных ранее на 70 %.

5. Оптимизирована технология комплексного поверхностного упрочнения и отделки лопаток цельнолитых турбин, состоящая в основе из операций виброударной и дробеструйной обработки с дополнением комбинированным воздействием по выравниванию шероховатости по всему сечению межлопаточного канала с помощью анодного растворения материала. Часть технических решений запатентована.

6. Спроектированные операции и комплексный технологический процесс проходили промышленную апробацию на цельнолитых турбинах и показали высокий уровень производственной технологичности. Трудоемкость обработки каналов литых турбин снизилась на 9 % а трудозатраты и энергопотребление при доводке лопаточных машин уменьшены на 14 %, что подтверждает результаты работы автора.

### Список литературы

1 Некрылов, А.М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей/А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев//Научно-технические вестники Воронежского государственного технического университета. 2020. № 7 (109). С. 20-23.

2 Некрылов, А.М. Повышение производственной технологичности рабочих поверхностей нагруженных деталей применением упрочняющей комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, В.Г. Грицюк // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Том Т. 16. № 4 (184). С. 182-186.

3 Грымзин, А. Ю. Технологические методы для комбинированного упрочнения поверхностей при создании сложнопрофильных изделий / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 2 (39). С. 73-78.

4 Грымзин, А. Ю. Технологичность и показатели качества проточных поверхностей после комбинированной обработки / А.Ю. Грымзин, С.Н. Коденцев, Г.А. Сухочев // Воронежский научно-технический вестник. 2022. № 4 (42). С. 22-28.

5 Грымзин, А.Ю. Технологическое обеспечение показателей качества поверхностей проточных каналов / А.Ю. Грымзин, Г.А. Сухочев, О.Н. Кириллов // Насосы. Турбины. Системы. 2022. № 1 (42). С. 31-37.

6 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTME 2020». 2021. pp. 1943-1945.

7 Некрылов, А. М. Повышение ресурса лопаточных деталей насосного оборудования применением комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2019. С. 233-235.

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 Некрылов, А. М. Повышение эксплуатационных показателей комбинированными физико-техническими методами / А.М. Некрылов, Г.А. Сухочев, А.Ю. Грымзин, Е.В. Паничев // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, в. 13, 2020. С. 102-105.

10 Сухочев, Г.А. Технологические методы комбинированного упрочнения поверхностей сложного профиля при создании наукоемких изделий / Г.А. Сухочев, А.Ю. Грымзин, А.М. Некрылов, С.Н. Подгорнов, С.Н. Коденцев // Материалы XI Междун. науч.-практ. конф. «Инновации в Машиностроении» (ИнМаш-2020), Бийск, 22-23 октября 2020 г. С. 54-60.

11 Грымзин, А. Ю. Применение упрочняющей комбинированной обработки нагруженных деталей для повышения производственной технологичности / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2020. С. 199-201.

12 Грымзин, А. Ю. Применение комбинированной обработки для увеличения показателей качества лопаточных деталей / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2021. С. 167-170.

13 Грымзин, А. Ю. Комбинированная отделочно-упрочняющая обработка проточных поверхностей деталей с каналами / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приор. напр. развит. науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2022. С. 87-89.

14 Патент №2788444 Российская Федерация, В23Н 5/06, В23В 09/00. Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Д. В. Силаев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. - 8с.

15 Грымзин, А. Ю. [Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы](#) / А.Ю. Грымзин, А.М. Некрылов, А.О. Родионов, Г.А. Сухочев // Сб. докл. XII Всерос. конф. Молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» 25-28 сентября 2019 г. Москва. С. 123-131.

## References

1 Nekrylov A.M. Hardening and finishing processing of technologically hard-to-reach flow channels of parts / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev//High technologies in mechanical engineering. 2020. No. 7 (109). pp. 20-23.

2 Nekrylov A.M. Improving the production manufacturability of working surfaces of loaded parts using hardening combined processing / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, V.G. Gritsyuk // Strengthening technologies and coatings. 2020. Vol. T. 16. No. 4 (184). pp. 182-186.

3 Grymzin A.Yu. Technological methods for combined hardening of surfaces when creating complex profile products / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Pumps. Turbines. Systems. 2021. No. 2 (39). pp. 73-78.

4 Grymzin A.Yu. Manufacturability and quality indicators of flow surfaces after combined processing / A.Yu. Grymzin, S.N. Kodentsev, G.A. Sukhochev // Voronezhsky Scientific and Technical Bulletin. 2022. No. 4 (42). pp. 22-28.

5 Grymzin A.Yu. Technological support of indicators of quality of surfaces of flow channels / A.Yu. Grymzin, G.A. Sukhochev, O.N. Kirillov // Pumps. Turbines. Systems. 2022. No. 1 (42). pp. 31-37.

6 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, IC-MTMTE 2020". 2021.pp. 1943-1945.

7 Nekrylov A.M. Increasing the resource of blade parts of pumping equipment using combined processing / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of scientific research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development. Voronezh, VSTU, 2019. S. 233-235.

8 Nekrylov A.M. The method of vibrotreatment of the interblade channels of turbines with the extrusion of granules under the action of low-frequency vibration / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, G.A. Sukhochev, A.V. Norman // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2019. S. 402-404.

9 Nekrylov A.M. Improvement of operational indicators by combined physical and technical methods / A.M. Nekrylov, G.A. Sukhochev, A.Yu. Grymzin, E.V. Panichev // Modern production technologies in mechanical engineering: Sat. scientific tr., Voronezh: VSTU, v. 13, 2020. S. 102-105.

10 Sukhochev G.A. Technological methods of combined hardening of surfaces of a complex profile when creating science-intensive products / G.A. Sukhochev, A.Yu. Grymzin, A.M. Nekrylov, S.N. Podgornov, S.N. Kodentsev // Proceedings of the XI Intern. scientific-practical. conf. "Innovations in Mechanical Engineering" (InMash-2020), Biysk, October 22-23, 2020, pp. 54-60.

11 Grymzin A.Yu. Application of hardening combined processing of loaded parts to improve production manufacturability / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2020. S. 199-201.

12 Grymzin A.Yu. The use of combined processing to increase the quality indicators of blade parts / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of scientific research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development. Voronezh, VSTU, 2021, pp. 167-170.

13 Grymzin A.Yu. Combined finishing and hardening treatment of flow surfaces of parts with channels / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the scientific research competition. works of students and graduate students of VSTU on prior. e.g. developed. science and technology. Voronezh, VSTU, 2022, pp. 87-89.

14 Patent No. 2788444 Russian Federation, B23H 5/06, B23B 09/00. The method of hardening the internal surfaces of the channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, D. V. Silaev; applicant and patentee Voronezh State Technical University. No. 2022100797, claim. May 25, 20219; publ. 01/19/2023, Bull. No. 2. - 8s.

15 Grymzin A.Yu. Investigation of the modes of hardening treatment of interblade channels of parts of the rotary group / A.Yu. Grymzin, A.M. Nekrylov, A.O. Rodionov, G.A. Sukhochev // Sat. report XII All-Russian. conf. Young scientists and specialists "The future of engineering Russia" September 25-28, 2019 Moscow. pp. 123-131.

© Сухочев Г.А., Грымзин А.Ю., 2023