

УДК 621.048.7

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ РОТОРОВ ИЗ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ****Андрей Артурович Таскинбаев¹****Геннадий Алексеевич Сухочев¹**, д-р техн. наук**Сергей Степанович Юхневич²**, кандидат техн. наук**Евгения Геннадьевна Смольяникова¹**, кандидат техн. наук¹Воронежский государственный технический университет, Россия²Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики», РоссияТел.: +7 (908) 141-71-80, E-mail: suhotchev@mail.ru

Аннотация. Представлен обзор технологических возможностей, используемых на предприятиях аэрокосмической промышленности при изготовлении особо ответственных деталей, работающих в агрессивных средах под действием знакопеременных нагрузок. Проблемно-ориентированное сравнение способов получения корпусов и деталей роторной группы из мелкодисперсных порошков с использованием элементов аддитивности. Проведен анализ особенностей формообразования и постобработки сложнопрофильных рабочих поверхностей. Выполнена оценка экономической целесообразности использования представленных методов формообразования. Предложены технологические решения упрочняющей обработки для обеспечения работоспособности деталей в экстремальных условиях агрессивных водородосодержащих сред.

Ключевые слова: эксплуатационный ресурс, роторная группа, аддитивность, двигательная энергоустановка, комбинированная обработка, токопроводящие гранулы, микрорельеф, равномерность показателей качества

**TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF MANUFACTURING HIGH-DURABILITY
ROTOR COMPONENTS FROM FINE POWDERS****Andrey A. Taskinbaev****Gennadiy A. Sukhochev****Sergey S. Yukhnevich****Evgeniya G. Smolyannikova**

Abstract. An overview of the technological capabilities used at aerospace industry enterprises in the manufacture of critical components operating in aggressive environments under alternating loads is presented. A problem-oriented comparison of methods for producing housings and rotor group components from fine powders using additive manufacturing elements is provided. An analysis of the features of shaping and post-processing of complex-profile working surfaces has been carried out. An assessment of the economic feasibility of using the presented shaping methods has been performed. Technological solutions for strengthening treatment are proposed to ensure the operability of components under extreme conditions of aggressive hydrogen-containing environments.

Keywords: service resource, rotor group, additivity, engine power unit, combined processing, hybrid machining, electrically conductive granules, surface micro topography, consistency of quality parameters.

Введение

Перспективное развитие авиационно-космического двигателестроения невозможно без создания изделий, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами в условиях сложных термодинамических нагрузок, при воздействиях агрессивной рабочей среды, и при этом показывающих высокие энергетические характеристики [1]. Это требует значительного повышения механических свойств материалов и снижения весовых характеристик нагруженных агрегатов, что весьма достижимо с использованием методов коркового литья с последующей высокотемпературной газостатической обработкой или горячего изостатического прессования (ГИП) заготовок из металлических гранул. При получении заготовок из жаропрочных сплавов использовались отдельные принципы аддитивности [2]. Технология ГИП обеспечивает получение жаропрочных сплавов с гарантированно высокими механическими характеристиками благодаря тому, что детали во всех сечениях обладают мелкозернистой изотропной структурой. Изготовление сложно профильных, в том числе лопаточных роторных деталей турбонасосных агрегатов (ТНА) современных двигателей, в которых рабочее колесо турбины при эксплуатации находится под воздействием температур (более 900°K), высокочастотных динамических знакопеременных нагрузок, требует поиска новых технологических решений. Традиционно лопаточные детали ротора, такие как колесо турбины, изготавливались методом литья по выплавляемым моделям из жаропрочного никелевого сплава ЖСЗ-ДК, затем турбина напрессовывается на вал из сложнолегированной никельсодержащей пластически упрочненной стали.

1. Основное содержание и результаты работы

В последнем варианте колесо турбины с валом изготавливают из заготовки, полученной ГИП в индивидуальной капсульной оснастке из гранул сплава ЭП741НП. После извлечения заготовки из оснастки проводится электроэрозионная обработка по формированию профиля лопаток, окончательная механическая обработка, нанесение покрытий и параметрические испытания. В результате функционально-стоимостного анализа сквозного технологического процесса было установлено, что самой трудоемкой и длительной являются операции электроэрозионного прошивания межлопаточных каналов в гранульной заготовке турбины. Трудоемкость данной операции составляет до 500 н/ч и длится более 30 календарных дней при полной загрузке низкопроизводительных дорогостоящих электроэрозионных станков с ЧПУ.

Для снижения трудоемкости и сокращения производственного цикла изготовления колеса турбины был предложен и апробирован метод, позволяющий формировать профиль лопаток роторной детали с помощью формообразующего закладного элемента. По результатам анализа профиля лопаток была скорректирована геометрия закладного элемента, формирующего лопатки, для получения гранульной заготовки с заданными свойствами. Контроль вновь изготовленной заготовки установил соответствие геометрии требованиям документации в пределах допуска. На сегодняшний день технология изготовления сложнопрофильных роторных деталей методом ГИП реализована в производстве энергоустановок и двигателей, в частности - для колеса турбины с валом турбонасосного агрегата. На рисунке 1 показана турбина с валом из гранульной заготовки после механической и физико-химической обработки по штатной технологии. Реализация технологии ГИП при изготовлении колес турбин позволяет изготавливать колесо турбины заодно целое с валом. При этом, исключается посадочный зазор между валом и колесом, что позволяет достичь более высоких эксплуатационных характеристик, что в свою очередь положительно сказывается на надежности двигатель-

ной установки в целом. К тому же технология изготовления сложнопрофильных роторных деталей методом металлургии гранул позволяет обеспечивать повышение механических характеристик материала до 5-10% в сравнении со способом получения заготовок литьем.

Очевидные преимущества реализованной технологии:

- ГИП исключает поверхностные и внутренние литейные дефекты;
- формирование профиля межлопаточных каналов колеса турбины с помощью закладного элемента позволяет исключить из сквозного технологического процесса изготовления операции электроэрозионного прошивания и последующей электрохимической обработки;
- такие решения повышают механические свойства материала за счет повышенной однородности структуры и изотропности свойств материала по всем сечениям;
- эксплуатационные характеристики колеса турбины с валом, изготовленного по новой технологической схеме, подтверждены разгонными испытаниями и металлографическими исследованиями;
- изготовление колеса турбины заедино с валом повышает надежность лопаточной детали, ТНА и двигателя в целом.



Рисунок 1. Турбина с валом после окончательной обработки

Анализ показывает серьезные издержки:

- неоправданно высокая трудоемкость изготовления и стоимость средств технологического оснащения, так как использование газостатического комплекса дает прирост накладных расходов более 300% к технологической себестоимости изделий в многономенклатурном производстве;
- невозможность оперативного корректирования режимов горячего изостатического прессования в процессе получения заготовки.

Исключение таких работ из технологического процесса сократило бы производственный цикл изготовления колеса турбины с валом на 20 календарных дней. Это значительный экономический эффект для каждого двигателя.

Комплексное совершенствование технологии получения заготовок и подготовки производства для обеспечения многократного ресурса перспективных жидкостных ракетных двигателей, возможно по нескольким направлениям:

- качественное проектирование и получение литых заготовок, новейших, в том числе аддитивных, технологий и высокотехнологичного оборудования;
- ускоренный запуск в производство качественных литых деталей за счет высокого уровня конструкторско-технологической подготовки производства;
- осознанные мероприятия по сокращению сроков технологической подготовки многономенклатурного производства новых изделий.

Самой сложной и трудоемкой частью изготовления отливок методом литья по выплавляемым (выжигаемым) моделям является проектирование, изготовление, обработка конструктивно сложных пресс-форм для формирования разовых моделей и литейных жаростойких форм для получения собственно отливок. Требуется привлечение квалифицированных проектировщиков, использование дорогостоящего оборудования, трудоемкой ручной доводки работниками высокой квалификации, что приводит к неоправданно большим затратам времени.

В настоящее время есть другая возможность быстро, качественно и недорого изготовить модели отливок – методом прямого цифрового изготовления (Direct Digital Manufacturing, DDM) литейных моделей и форм на установках быстрого прототипирования. Если еще сравнительно недавно эта технология ассоциировалась с лабораторными научными разработками и в основном использовалась для концептуального моделирования, сегодняшнее развитие средств оснащения и исходных материалов позволяет использовать оборудование DDM наравне с традиционной мелкосерийной металлообработкой на оборудовании с ЧПУ.

В двигателестроении для изготовления моделей отливок имеется успешный опыт использования технологии и оборудования компании Stratasys, т.к. модели, полученные с их помощью, отлично вписываются в уже используемую традиционную технологию и позволяют реально сократить сроки производства. Применение моделей, полученных методом DDM из ABS-пластика, в серийной технологии литья по выплавляемым моделям было успешно отработано на деталях «Корпус насоса» и «Корпус турбины». Тогда для получения отливки «Корпуса насоса» из стали ВНЛ-1 использовали ее модель из ABS-пластика (рисунок 2).



Рисунок 2. Модель отливки "Корпус насоса" из ABS-пластика.

Внедрение технологии прямого цифрового изготовления деталей позволило упростить следующие аспекты производства:

- применение модели, полученной методом DDM из ABS-пластика, успешно вписалось в ранее используемый технологический процесс изготовления отливок методом ЛВМ;

- срок освоения новой отливки сократился до трех раз за счет исключения из цикла подготовки производства проектирования и изготовления пресс-форм для запрессовки модельной массы;

- повысилось качество отливок, что выражалось в 100-процентной повторяемости геометрических размеров за счет высокой прочности модели из ABS-пластика по сравнению с модельной массой;

- сократилось влияние человеческого фактора на качество отливок за счет существенного снижения доли ручного труда при изготовлении модельного блока.

С момента ввода в эксплуатацию установки Dimension SST 1200es в состав практически всех перспективных двигательных установок теперь входят отливки, при изготовлении которых применяются модели, полученные методом прямого цифрового изготовления из ABS-пластика (рисунок 3). В настоящее время установка Dimension SST 1200es продолжает активно и успешно использоваться в производстве моделей отливок.

2. Общий алгоритм синтеза

Аддитивные технологии позволяют непосредственно получать штатные заготовки в процессе селективного лазерного спекания металлического порошка, с применением источника энергии слой за слоем изготавливается деталь [2]. Относительно традиционных методов изготовления, в которых требуемая геометрия достигается путем удаления лишнего материала, аддитивные технологии относятся к классу новых технологий, входят в состав шестого технологического уклада. Несмотря на неоспоримые преимущества использования аддитивных технологий в производственном процессе таких, как снижение трудоемкости, сокращение сроков изготовления, возможность проектирования изделий без учета самоограничений из-за традиционных технологий, уменьшения номенклатуры и объема средств специального технологического оснащения, себестоимость готовой продукции все еще остается очень высокой.



Рисунок 3. Примеры моделей отливок для деталей гидроагрегатов

Стоимость готовой продукции, изготовленной с использованием аддитивных технологий, в первую очередь обусловлена высокой стоимостью металлических порошков из коррозионно-жаростойких сплавов. АО КБХА имеет значительный опыт в области получения исходного сырья для гранульной металлургии. С 1980-х годов на предприятии организован полный цикл по изготовлению металлического порошка, включающий в себя выплавку электродов из исходных шихтовых материалов, распыление электродов на установке центробежного распыления, рассев, очистка и сепарация гранул. Широкий спектр исследовательского оборудования и высококвалифицированный персонал позволяют проводить контроль по всем требуемым параметрам в полном объеме и выполнять анализ полученных результатов. В настоящее время в качестве материала используется металлический порошок двух фракций (до 40 мкм и от 40 до 63 мкм) из 3 сплавов: жаропрочный никелевый сплав ХН58МБЮД-ЛС (ЭК61-ЛС), коррозионностойкая мартенситная сталь 03Х12Н10МТР-ЛС (ЭП810-ЛС) и титановый сплав ВТ6С-ЛС.

Очевидные преимущества технологии селективного лазерного спекания (СЛС) в некоторой мере обесцениваются при формообразовании точных конструкций, так как обеспечивают нежелательно высокие значения получаемой шероховатости поверхностей до 30-40 мкм при, соответственно, невысокой точности геометрических размеров. Такой технологический аспект значительно сдерживает область использования селективного лазерного спекания, а в промышленных условиях аддитивное СЛС позволяет получать только заготовки, на которых надо дополнительно обрабатывать все поверхности, в том числе и неответственные/нерабочие, для устранения нежелательной технологической наследственности от аддитивного процесса. В этом случае актуальный вопрос о технико-экономической эффективности СЛС упирается в снижение дополнительных производственных затрат. Успешный поиск технико-экономически приемлемых методов и средств оснащения по уменьшению шероховатости посредством последующей обработки в основном базируется на учете механизмов формирования микропрофиля с дефектами поверхности при сплавлении микрогранул материала. Проведение систематизированных теоретических и экспериментальных исследований по закономерностям формирования профиля шероховатости поверхности в процессе СЛС, позволяет оптимизировать припуски на поstadдитивную обработку, величины которых нормируют трудоемкость и дополнительных ресурсные траты.

При реализации технологии послойного синтеза на поверхности детали образуется многофазная неорганизованная, зачастую ячеисто-слоистая структура. Физико-математическое моделирование и анализ реальных механизмов выстраивания микрогеометрии макроповерхности на заготовке, формообразуемой методом СЛС, позволило спрогнозировать достижимые показатели качества поверхностного слоя, производительность используемых технологий и трудоемкость изготовления роторных деталей.

3. Цифровые модели

После изготовления деталей методом селективного лазерного спекания одной из ключевых задач становится обеспечение требуемого качества рабочих поверхностей [4]. Для наружных и внутренних участков сложной геометрии, не предъявляющих повышенных требований к точности, могут применяться различные способы механизированной финишной обработки. К ним относятся дробеструйная, струйно-динамическая, пескоструйная, гидроабразивная и вязкоабразивная обработки, а также локальная ручная зачистка. Использование указанных методов позволяет уменьшить высоту микронеровностей и подготовить поверхность к дальнейшей эксплуатации [5].

Для обработки внутренних поверхностей со сложной конфигурацией более эффективным является комбинированный способ, основанный на совместном воздействии токопроводящих микрогранул и электрического поля небольшой напряженности. В процессе обработки газожидкостная слабопроводящая среда переносит микрогранулы через внутренние каналы детали, благодаря чему обеспечивается практически равномерное воздействие на все участки поверхности. Такой подход способствует формированию однородного упрочненного слоя и снижению технологически обусловленной шероховатости [6].

Снижение шероховатости достигается сочетанием двух процессов. Первый связан с механическим деформированием поверхностного слоя при ударах микрогранул, а второй, с локальным электрохимическим растворением наиболее выступающих микронеровностей. Совместное действие этих факторов позволяет уменьшить высоту микропрофиля, повысить стабильность качества поверхности и обеспечить равномерность обработки по всей длине внутренних каналов детали.

Особое внимание уделяется устранению дефектов, характерных для изделий, полученных аддитивными технологиями. После селективного лазерного спекания на поверхности могут сохраняться микропоры, микротрещины, локальные неровности и отклонения формы, которые становятся концентраторами напряжений и ускоряют развитие усталостных повреждений в процессе эксплуатации [7]. Применение комбинированной обработки позволяет существенно уменьшить влияние подобных дефектов и повысить долговечность деталей, работающих при циклических нагрузках и в условиях интенсивного износа.

Физическая сущность предлагаемого метода заключается в одновременном протекании механического и электрохимического воздействий. Поток микрогранул, транспортируемых сжатым воздухом, непрерывно взаимодействует с поверхностью изделия, вызывая пластическую деформацию микровыступов [8, 9]. Одновременно тонкая пленка технической воды, обладающая слабой электропроводностью, обеспечивает прохождение электрического тока. В результате происходит локальное анодное растворение наиболее выступающих участков поверхности, что ускоряет их сглаживание без возникновения коротких замыканий между гранулами и материалом детали [10].

Предложенная технология сочетает механическое упрочнение поверхностного слоя с электрохимическим выравниванием микрорельефа. Комплексное воздействие позволяет одновременно уменьшить шероховатость, повысить равномерность наклепа, снизить вероятность образования микродефектов и обеспечить стабильные эксплуатационные характеристики деталей сложной формы, изготовленных с применением современных порошковых и аддитивных технологий.

На рисунке 4 показаны основные стадии предложенного способа комбинированной обработки. Получение равномерной степени наклепа и устранения микротрещин по всей обрабатываемой поверхности достигается тем, что обработка поверхностей по предлагаемому способу заключается в подаче на обрабатываемые поверхности сжатым воздухом газожидкостного потока микрошариков.

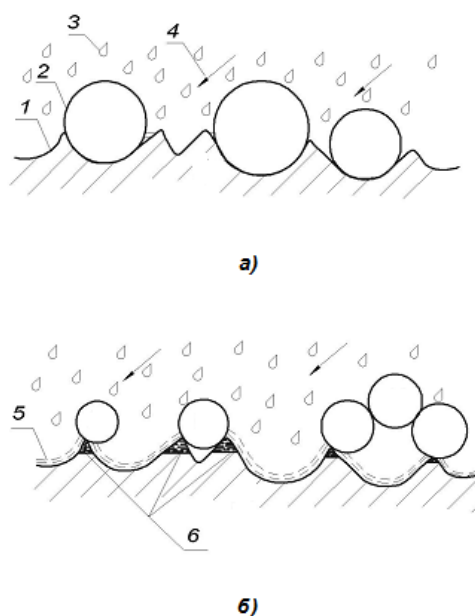


Рисунок 4. Схема и основные этапы реализации процесса: 1 – деталь оснастки; 2 – микрошарики различной фракции; 3 – токопроводящая газожидкостная среда; 4 – направление движения микрошариков; 5 – жидкостная пленка; 6 – микровыступы

4. Общие рекомендации работы

Формирование благоприятного для различного рода эксплуатационных свойств поверхностного слоя проходит в две стадии. Во-первых, на исходную дефектную поверхность 1 (рисунок 4, а) с направлением к ней 4 под углом β не более 60° подают микрошарики 2 более крупной фракции (150-200 мкм), которые за счет деформационного сдвига перераспределяют выступы и впадины и заживают микродефекты. Наличие жидкостной токопроводящей среды 3 образует постоянно обновляющуюся пленку жидкости и препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных напряжений растяжения, а также ускоряет процесс за счет явления анодного растворения материала. Затем, подают более мелкую фракцию микрошариков 2 (50-80 мкм), которая окончательно выравнивает микроповерхность (рисунок 4, б). Выравнивание микрогеометрии значительно зависит от скорости анодного растворения в месте микровыступов 6, которая в момент контакта шарика с деталью через жидкостную токопроводящую пленку 5 резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения и тогда время обработки составляет около 15 с на участок эффективного пятна распыла. Общее время обработки рассчитываем по формуле:

$$t_{\text{общ}} = \pi(D_{\text{обср}}/d_{p1}n_{\text{max}} + L_{\text{зон}}/d_{p2}n_L),$$

где $D_{\text{обср}}$ – средний диаметр локального участка обработки, мм;

$L_{\text{зон}}$ – длина локальной зоны обработки по средней линии, мм;

d_{p1} и d_{p2} – эффективное ядро распыла микрошариков на общем и локальном участках соответственно, зависящее от параметров эжекции, мм (определяется экспериментально на имитаторе);

n_{max} – максимальное число оборотов детали при прохождении уже ранее упрочненных участков поверхности, об/мин⁻¹;

n_L – число оборотов детали при прохождении локальной зоны обработки поверхности, об/мин^{-1} .

Для уточняющих технологических расчетов в общем виде $n = \pi D / t_{yc} d N_{yc}$. Здесь N_{yc} – количество пятен эффективного распыла d , укладываемых в диаметр обработки D . Время обработки участка пятна распыла t_{yc} определяется экспериментально по величине прогиба настроечного образца. Технологическое оборудование и оснастка часто имеют внушительные габариты. В связи с этим настройка процесса происходит при проверке и корректировке предварительно рассчитанных режимов на имитаторе внутренней поверхности с закрепленными настроечными плоскими образцами (рисунок 5).



Рисунок 5. Имитатор с настроечными образцами в камере струйно-динамической установки

Для того, чтобы единичного контакта (или серии контактов) было достаточно для выравнивания микрогеометрии за счет механического воздействия и анодного растворения осуществляется управление энергией соударений. Так как микрогранулы подают в зону обработки струйным методом, то и параметры процесса изменяют регулированием кинетической энергии потока, варьируя расход и давление сжатого воздуха. Конкретную концентрацию капельной фракции устанавливают экспериментально на настроечном имитаторе, исходя из обеспечения постоянной жидкостной пленки. При моделировании режимов процесса учитываются исходные данные:

- физико-механические свойства материалов микрогранул и детали;
- радиус кривизны (диаметр) обрабатываемой поверхности;
- исходная и требуемая величина наклепа поверхностного слоя и высота микронеровностей.

Заключение

Отдельным вопросом для перспективы исследований на данный момент является технологическое обеспечение равномерно распределенных по сложнопрофильным поверхностям лопаточных деталей показателей качества с учетом нежелательной технологической наследственности в виде микропористости и субмикротрещин после селективного лазерного спекания. Прецизионные размеры деталей быстроходных роторов требуют проведения отделочно-упрочняющей и размерно-калибрующей постобработки таких заготовок. Наиболее эффективными представляются методы безразмерной физико-технической и размерной комбинированной обработок. Положительные ре-

зультаты от их применения уже получены для различных элементов конструкций и заготовок при создании перспективных энергоустановок [5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сухочев Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. М: Машиностроение, 2004. 287 с.
2. Сухочев Г. А. Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий: учеб. пособие / Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев, Е. Г. Смольяникова. Воронеж: ВГТУ, 2024. 131 с
3. Сапожников А. П. Внедрение металлических порошков жаропрочных отечественных сплавов в производство особо ответственных деталей жидкостных ракетных двигателей / А. П. Сапожников, А. А. Таскинбаев // «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики»: сб. докладов Всероссийской научно-практ. конф. 18 - 22 сентября 2017 г. Томск, 2017. С. 203-204.
4. Патент №2709072 Российская Федерация, В23Н 5/06, В24В 39/00. Способ упрочняющей обработки локальных участков поверхностей деталей роторов [Текст] / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, А. М. Некрылов; заявитель и патентообладатель ВГТУ. № 2019123080, заявл. 17.07.2019; опубл. 13.12.2019. Бюл. №35. 8с.
5. Сухочев Г. А. Технологические аспекты изготовления деталей быстроходных роторов из мелкодисперсных порошков / Г. А. Сухочев, И. Г. Дроздов, Е. Г. Смольяникова, А. А. Таскинбаев // Насосы. Турбины. Системы. 2025. № 4 (57). С. 7-78.
6. Сухочев Г. А. Технологическое обеспечение повышенного ресурса нагруженных поверхностей сложного профиля / Г. А. Сухочев., С. Н. Коденцев, В. А. Кашицин // Насосы. Турбины. Системы. 2024. № 4 (53). С. 23-31.
7. 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 // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2020. № 7 (109). С. 20-23.
8. 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.
9. Подгорнов С. Н. Технологичность и показатели качества проточных поверхностей после комбинированной обработки / С. Н. Подгорнов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Коденцев, Г. А. Сухочев // Воронежский научно-технический вестник. 2022. № 4 (42). С. 22-28.
10. 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.

REFERENCES

1. Sukhochev, G. A. Quality Management of Products Operating under Extreme Conditions with Non-Stationary Loads / G. A. Sukhochev. Voronezh: VSU, 2003. 286 p.
2. Method for Hardening Internal Surfaces of Component Channels / G. A. Sukhochev, A. M. Nekrylov, A. Yu. Grymzin, S. N. Podgornov, D. V. Silaev // Patent No. 2788444 Russian

Federation, B23H 5/06, B23B 09/00; applicant and patent holder Voronezh State Technical University. - No. 2022100797, filed 25.05.2019; publ. 19.01.2023, Bull. No. 2. - 8 p.

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

4. Method for Hardening Treatment of Internal Surfaces of Components / G. A. Sukhochev, E. G. Smolyanikova, D. M. Nebolkin // Patent for Invention RU 2491155 C2, 27.08.2013. Application No. 2011106714/02 dated 25.06.2012. Patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Voronezh State Technical University» (RU).

5. Sukhochev G. A. Technological Support for Increased Service Life of Loaded Surfaces with Complex Profiles / G. A. Sukhochev, S. N. Kodentsev, V. A. Kashin // Pumps. Turbines. Systems. 2024. No. 4 (53). pp. 23-31.

6. Nekrylov A. M. Hardening and Finishing Treatment of Technologically Difficult-to-Access Flow Channels of Components / A. M. Nekrylov, A. Yu. Grymzin, S. N. Podgornov, V. N. Sokolnikov, G. A. Sukhochev // Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2020. No. 7 (109). pp. 20-23.

7. Nekrylov A. M. Improving Manufacturing Processability of Working Surfaces of Loaded Components by Applying Combined Hardening Treatment / A. M. Nekrylov, A. Yu. Grymzin, S. N. Podgornov, G. A. Sukhochev, S. N. Kodentsev, V. G. Gritskov // Hardening Technologies and Coatings. 2020. Vol. 16. No. 4 (184). pp. 182-186.

8. Sukhochev G. A. Technological Aspects of Manufacturing High-Speed Rotor Components from Fine Powders / G. A. Sukhochev, I. G. Drozdov, E. G. Smolyanikova, A. A. Taskinbaev // Pumps. Turbines. Systems. 2025. No. 4 (57). pp. 7-78.

9. Podgornov S. N. Manufacturability and Quality Indicators of Flow Surfaces after Combined Machining / S. N. Podgornov, A. Yu. Grymzin, S. N. Kodentsev, G. A. Sukhochev // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2022. No. 4 (42). pp. 22-28.

10. Grymzin A. Yu. Technological Methods for Combined Surface Hardening in the Development of Complex-Shaped Products / A. Yu. Grymzin, S. N. Podgornov, G. A. Sukhochev // Pumps. Turbines. Systems. 2021. No. 2 (39). pp. 73-78.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 27.03.2026.

The article was submitted March 5, 2026; approved after reviewing March 17, 2026; accepted for publication March 27, 2026.