

На правах рукописи



ТЕРЯЕВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ
АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ**

2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва», г. Красноярск

- Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Левко Валерий Анатольевич
- Официальные оппоненты: **Попов Андрей Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» (г. Омск)
Логачева Алла Игоревна,
доктор технических наук, профессор,
АО «Композит», начальник отделения металлических материалов и металлургических технологий (г. Королев)
- Ведущая организация: Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики» (АО КБХА) (г. Воронеж)

Защита состоится «25» сентября 2026 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий» 31, зал заседаний диссертационного совета, ауд. Л-205

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 660037, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 31, ФГБОУ ВО «СибГУ им. Решетнева»; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.403.05 Фадееву А. А.; e-mail: fadeev.77@mail.ru, тел.: +7(391) 291-90-65.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент

Фадеев Александр Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Из-за высокой сложности геометрии закрытых каналов сложнопрофильных деталей их окончательная обработка инструментами постоянной формы затруднена. В связи с этим существенное развитие получили такие финишные технологии, у которых в качестве инструмента используется поток различных сред, несущих рабочие элементы и способных копировать форму обрабатываемого канала. Сравнительный анализ современного уровня финишных технологий обработки закрытых каналов деталей показал, что все более широкое применение находит метод обработки абразивным потоком (ОАП).

Однако при обработке абразивным потоком закрытых каналов наблюдалась неравномерность съема металла, особенно на входной кромке. Ее появление подтверждено результатами моделирования процесса и обусловлено перестройкой профиля потока рабочей среды (РС). Неравномерность обработки входной и выходной кромок закрытых каналов предложено выравнивать за счет применения направляющих аппаратов. Применение направляющих аппаратов (НА) позволило уменьшить неравномерность обработки входных кромок, но добиться равномерной обработки всей поверхности закрытого канала не удалось. Кроме того, крыльчатки получаются литьем по выплавляемым моделям из аустенитно-мартенситных сталей, которые относятся к труднообрабатываемым материалам.

Совершенствование технологии ОАП закрытых каналов деталей возможно за счет применения направляющих аппаратов и рабочих сред новых составов. Использование направляющих аппаратов, отвечающим требованиям по точности базирования и закрепления, а также величины зазора между кромками аппарата и закрытых каналов, обеспечит требуемую величину шероховатости всей их внутренней поверхности. Использование рабочих сред, состав которых выбран по результатам анализа контактных взаимодействий абразивного зерна с микронеровностями обрабатываемой поверхности, позволит увеличить производительность процесса.

Совершенствование существующей общей методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком для закрытых каналов сложнопрофильных деталей позволит сократить сроки подготовки и внедрения данной технологии в производство. В связи с этим тема диссертации является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие различных методов финишной обработки межлопаточных каналов крыльчаток внесли такие ученые как В. А. Скрябин, Д. И. Волков, А. Х. Гильмутдинов, М. М. Радкевич, Б. П. Саушкин, Г. А. Сухочев. Однако реализация большинства из них для закрытых каналов связана с определенными трудностями. Одним из эффективных методов обработки внутренних поверхностей закрытых каналов крыльчаток показала себя обработка абразивным потоком. Работы в этом направлении ведутся предприятиями ExtrudeHoneCorporation (США), BelAirFinishing (США), MicroHegaSurfacesGmbH (Германия), ООО «Гидроабразив». Исследования и разработки в области обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчаток проводились такими учеными, как С.К. Сысоев, М. А. Лубнин, Г. И. Фомин, L.J. Rhoades, V. K. Jain, K. Cheng, C.W. Kang, H. Gao, L. Pambaguian, L. Xiaojun, J. Rech. Однако до сих пор не решены проблемы равномерности и производительности обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей из литейных сталей.

Целью диссертационного исследования является повышение производительности и равномерности обработки абразивным потоком внутренних поверхностей закрытых каналов сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей.

Область исследования соответствует специальности 2.5.6 Технология машиностроения. Направления исследований - №2 (Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие ходы, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости) и №7 (Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин).

Основными задачами исследования являются:

- обоснование выбора технологии финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей на основе их сравнительного анализа и описание основных проблем обработки абразивным потоком литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей;
- моделирование процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей с учетом теоретических основ расчета потока рабочей среды высокой вязкости и контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых материалов;
- совершенствование технологии обработки абразивным потоком межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на основе нового способа обработки с применением направляющего аппарата, обеспечивающий равномерную обработку всей их внутренней поверхности;
- совершенствование методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей;
- экспериментальные исследования обработки абразивным потоком рабочей средой высокой вязкости литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей;
- отработка усовершенствованного технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей.

Научная новизна диссертационной работы:

- разработан новый способ обработки абразивным потоком межлопаточных закрытых каналов крыльчаток с применением направляющего аппарата, отличающийся тем, что выходные сечения каналов направляющего аппарата аналогичны по форме и размерам входным сечениям каналов крыльчатки или меньше их размеров на величину коэффициента упругого восстановления струи рабочей среды в зазоре между ними, обеспечивающий равномерную обработку всей поверхности каналов;
- представлена усовершенствованная методика разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей, отличающаяся тем, что предложено выравнивание условий обработки в закрытых каналах за счет направляющего аппарата и на этапе выбора модели потока рабочей среды учтено разделение этого потока на отдельные зоны течения в каждом канале, позволяющая обеспечить равномерность обработки всей поверхности каналов;
- впервые описаны особенности изменения условий контактных взаимодействий абразивных зерен на элементарных фактических площадях касания с микронеровностями поверхностного слоя образцов из аустенитно-мартенситной стали от исходной литейной корки до основного материала в процессе обработки, формирующие структуру поверхностного слоя и деформационное упрочнение приповерхностной области, на основании которых даны рекомендации по выбору режимов обработки, повышающих ее производительность на 20%.

Практическая значимость диссертационной работы

- установлены регрессионные зависимости шероховатости и твердости поверхности литых образцов из аустенитно-мартенситных сталей от режимов обработки абразивным потоком, позволяющие выбирать такие сочетания состава высоковязкой рабочей среды и величины давления сдвига при обработке, которые, в отличие от предыдущих режимов обработки, позволяют реализовывать ее в один этап, тем самым повышая производительность обработки на 20%.
- усовершенствован технологический процесс обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчаток из аустенитно-мартенситных сталей, позволивший обеспечить равномерную обработку всей внутренней поверхности и уменьшить ее шероховатость от исходной (литьевая корка) $Ra = 8,7 \dots 9,3$ мкм до полированной $Ra = 2,4 \dots 2,8$ мкм, а также увеличить ее твердость с исходной $38,5 \dots 40,5$ HRC до $43,5 \dots 45,5$ HRC;
- разработана конструкция направляющих аппаратов как элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчаток и технология их изготовления;

- предложен расчет и методика конечно-элементного моделирования влияния шероховатости проточной части межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на энергетические параметры насоса, результаты которых показали, что при уменьшении шероховатости закрытых каналов с $Ra = 8,6$ мкм до $Ra = 2,4...2,9$ мкм и до $Ra = 0,8$ мкм напор и КПД насоса увеличится на 1,5-2,5 % с одновременным уменьшением потребляемой насосом мощности до 8 %.

- утверждены акты о промышленных испытаниях улучшения шероховатости и параметров твердости поверхности закрытых каналов сложнопрофильных деталей ТНА ЖРД обработкой абразивным потоком и о планируемом внедрении в опытное производство научно-технических результатов исследований диссертации на АО «Красмаш».

Результаты научных исследований использованы в учебном процессе кафедры «Технологии машиностроения» Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва.

Методология и методы исследования. Проведение исследований базировалось на известных данных в области обработки абразивным потоком, научных основах технологии машиностроения, реологии полимеров и методах математического моделирования. Экспериментальные исследования выполнены с применением методик многофакторного планирования с использованием как стандартного, так и оригинального оборудования и оснастки. Моделирование исследуемой технологии реализовано на основе скоростной съемки процесса течения рабочей среды. Анализ влияния шероховатости проточной части крыльчаток на энергетические характеристики насосов проводилось с использованием ANSYS CFX.

Положения, выносимые на защиту:

- новый способ обработки абразивным потоком межлопаточных закрытых каналов крыльчаток с применением направляющего аппарата, позволяет обеспечить равномерную обработку всей их внутренней поверхности;

- усовершенствованная методика разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей, позволяет обеспечить равномерность обработки всей поверхности каналов;

- особенности изменения условий контактных взаимодействий абразивных зерен на элементарных фактических площадях касания с микронеровностями поверхностного слоя образцов из аустенитно-мартенситной стали, позволяют разрабатывать рекомендации по выбору режимов обработки, повышающих ее производительность на 20%.

- усовершенствованный технологический процесс обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчаток из аустенитно-мартенситных сталей, позволяет равномерно уменьшить шероховатость и увеличить твердость поверхности проточной части закрытого канала от исходной (литьевая корка) до полированной.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается непротиворечивостью и повторяемостью результатов экспериментальных исследований, применением статистических методов обработки полученных данных, использованием современных методов конечно-элементного моделирования и измерительных средств, а также результатами опытно-промышленной апробации наиболее значимых положений работы.

Апробация работы и результатов. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных международных и всероссийских научных конференциях: «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 08–12 апреля 2014 года; Красноярск, 06–10 апреля 2015 года; Красноярск, 11–15 апреля 2016 года; Красноярск, 11–15 апреля 2022 года; Красноярск, 10-14 апреля 2023 года; Красноярск, 8-12 апреля 2024 года), «Решетнёвские чтения» (Красноярск, 10–14 ноября 2015 года; Красноярск, 09–12 ноября 2016 года; Красноярск, 12–16 ноября 2018 года; Красноярск, 09–11 ноября 2022 года), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference (Krasnoyarsk, 29–30 апреля 2021 года), «Испытания диагностика, надежность, теория и

практика» (Красноярск, 27-28 февраля 2023 года; Красноярск, 27-28 февраля 2025 года), «Механика XXI века» (Братск, 25 апреля 2024 года; Братск, 17-18 апреля 2025 года), «Механика и машиностроение. Наука и практика» (Санкт-Петербург, 27 ноября 2025 года), «Современные машиностроительные системы, технологии и инновации» (Воронеж, 06 марта 2026 года), «Современные исследования: теория, практика, результаты» (Москва, 13 марта 2026).

Публикации по теме. По теме диссертации опубликованы 20 печатных работ, из них: 3 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК; 1 статья, проиндексирована в базе Scopus, В Российском агентстве по патентам и товарным знакам зарегистрирован 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 155 страницах, содержит 14 таблиц, 65 рисунков, список литературы из 136 наименований и 4 приложения.

Направление дальнейших исследований связано с регулированием температуры и вязкости рабочей среды. Регулировать температуру предлагается на основе уравнений существующих температурных зависимостей вязкости полимерной основы с учетом влияния степени наполнения рабочей среды абразивными зёрнами (их видом и величиной). Вязкость рабочей среды предлагается регулировать за счет применения различных пластификаторов.

Содержание приложений. В работе четыре приложения: карта метрологического обеспечения качества и достоверности измерений, акт о промышленных испытаниях улучшения шероховатости и параметров твердости поверхности закрытых каналов сложнопрофильных деталей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя абразивным потоком; акт о планируемом внедрении в опытное производство научно-технических результатов исследований; акт об использовании научно-технических результатов исследований в учебном процессе кафедры «Технологии машиностроения» Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности решаемой проблемы, цель, задачи, практическая значимость и научная новизна проведенного исследования.

В первой главе приведено обоснование выбора технологии финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей на основе их сравнительного анализа и описание основных проблем обработки абразивным потоком литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей.

Установлено, что технологический процесс обработки абразивным потоком с точки зрения технологической надежности может обеспечить повторяемость результатов обработки по обеспечению требуемой величины и равномерности шероховатости ($R_{a0,08}$ мкм) внутренней поверхности.

Рассмотрены основные проблемы обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей, такие как неравномерность обработки на входной и выходной кромке закрытого канала по сравнению с основной поверхностью канала. Эта неравномерность подтверждена экспериментальными исследованиями и моделированием процесса ОАП.

Для обеспечения равномерности обработки деталей, имеющих наклонные или изогнутые в пространстве каналы, предложено применять в качестве элемента технологической оснастки направляющий аппарат, образующий канал совместно с обрабатываемой поверхностью. Установлено, что при сборке НА его лопатки примыкают к поверхностям лопаток заготовки с определенным зазором, величина которого определяет степень упругого восстановления потока рабочей среды (РС) и перестройке его профиля. При этом не дана оценка влияния погрешности базирования и закрепления детали в

приспособлении, а также выбора эффективного объема РС. Требуется создание новой схемы ОАП межлопаточных закрытых каналов крыльчаток.

Создание направляющих аппаратов как элементов технологической оснастки для ОАП закрытых каналов является важной задачей и может быть решена с применением аддитивных технологий. Моделирование процесса ОАП закрытых каналов позволит создать усовершенствованную методику разработки технологического процесса ОАП закрытых каналов.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы ОАП закрытых каналов сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей, описаны результаты моделирования процесса. На их основе сформулированы предложения по усовершенствованию данной технологии за счет применения направляющего аппарата и усовершенствованию методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком сложнопрофильных деталей.

Отмечено, что в области создания теоретических основ процесса ОАП существует несколько подходов. Так применяют процедуры вычислительной гидродинамики, статистические методы обработки эмпирических данных, методы конечных и дискретных элементов каналов простой формы. Однако достигнуть точного соответствия результатов моделирования с экспериментальными данными пока не удается.

В настоящее время все большее применение в моделировании процесса ОАП применяют реологию неньютоновских сред. Результатом такого моделирования было решение локальных задач по определению численных значений ряда факторов обработки. Проведенные ранее расчеты по модели вязкопластического тела показали, что они согласуются с экспериментальными данными только для скорости потока, а не для давления, так как при данных расчетах не учитывается влияние нормальных напряжений в потоке.

При анализе теоретических основ ОАП рассмотрены особенности расчета характеристик потока рабочей среды высокой вязкости и контактных взаимодействий при ОАП деталей из труднообрабатываемых материалов. На основании модели плоской вязкоупругой цепочки при ОАП, учитывающей ее размеры и разность скоростей потока РС удалось установить частные показатели численных значений нормальных и касательных напряжений в потоке. На основании известной формулы общей зависимости контурного давления получены значения контурного давления, при которых реализуется то или иной вид контакта, характерный для ОАП. Предложены зависимости расчета фактическая площадь контакта микронеровностей с учетом особенностей ОАП.

Для подтверждения результатов моделирования процесса течения РС при ОАП в каналах и обтекания ей кромок лопаток проведено визуальное исследование влияния формы обрабатываемого канала на поток рабочей среды за счет фиксирования процесса течения РС высокой вязкости в каналах различной конфигурации.

Так при рассмотрении изменения профиля потока среды в наклонном канале с наклонной лопаткой 2 со скругленным основанием (рисунок 1, а), видно, что межлопаточные каналы 3 практически идентичны по геометрическим характеристикам. Скорость потока 1 в нижнем канале выше, чем в верхнем. В верхнем канале наблюдается отрыв течения 5 от стенки лопатки 2. Застойные зоны 4 наблюдаются на плоском торце снизу и на скругленном основании лопатки 2 (рисунок 1, б). С течением времени отрыв потока среды 5 от стенки лопатки 2 в верхнем канале 1 сходит с выходной кромки, и за счет упругого восстановления потока среды 1 контактирует со всей поверхностью лопатки 2. Застойная зона 4 остается только на плоском торце (рисунок 1, в).

Для равномерной обработки каналов с лопатками необходимо обеспечить равномерный расход среды в каждом из каналов, за счет формирования профиля потока на входе в эти каналы. При анализе движения отдельных абразивных зерен (АЗ) в потоке установлено, что они перемещаются по линиям тока. При установившемся течении расстояние между соседними зёрнами не изменяется. Тем самым подтверждается предположение об образовании в потоке упругой цепочки.

Далее описано предложение по совершенствованию ОАП закрытых каналов деталей за счет применения направляющего аппарата (НА) как элемента технологической оснастки. Общая схема базирования и закрепления заготовки в приспособление для ОАП показана на рисунке 2.

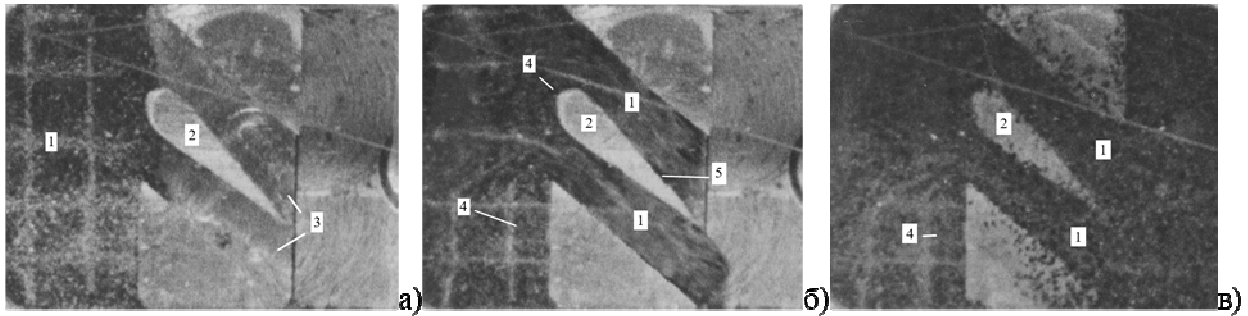


Рисунок 1 - Поток рабочей среды в наклонном канале с наклонной лопаткой со скругленным основанием вперед: а) начало процесса; б) втекание среды в каналы; в) поток среды с выходом из каналов и образованием застойных зон на входе

Установлено, что при сборке направляющего аппарата (рисунок 3) лопатки НА 1 и 2 примыкают к обрабатываемым поверхностям лопаток заготовки 3 с определенным зазором. Наличие зазора 4 между лопатками 1 – 3 и 2 – 3 ведет к проявлению эффекта упругого восстановления потока 5. При этом часть потока среды занимает свободное пространство внутри приспособления. Возникающая при этом перестройка профиля потока РС приводит к неравномерности обработки. Наибольший съем материала наблюдается в зонах 5 на входе и выходе в канале, где перестройка профиля потока максимальна.

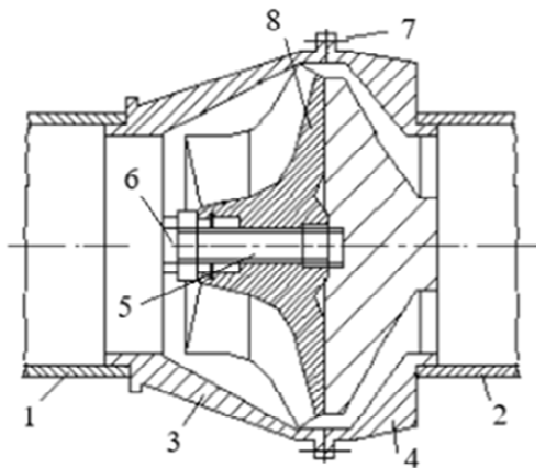


Рисунок 2 - Общая схема базирования и закрепления заготовки в приспособление для обработки абразивным потоком: 1 - верхний рабочий цилиндр; 2 - нижний рабочий цилиндр; 3 - крышка; 4 - основа приспособления; 5 - резьбовые шпильки; 6 - крепежная гайка; 7 - соединительные болты; 8 - обрабатываемая деталь.

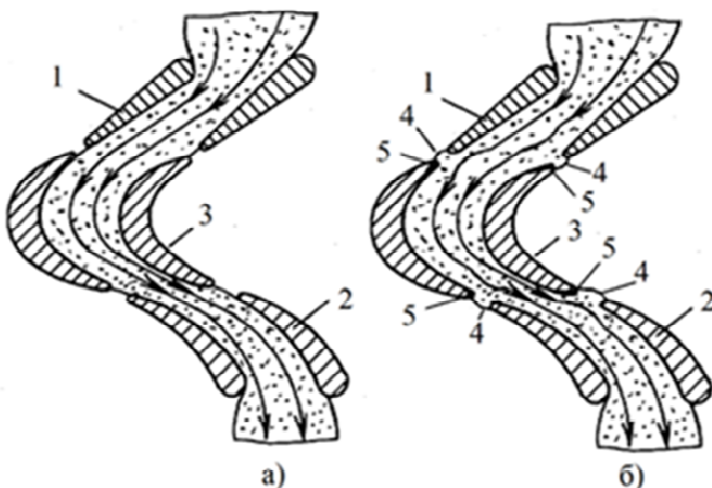


Рисунок 3 - Теоретическая схема способа обработки абразивным потоком с направляющим аппаратом: а) без учета эффекта упругого восстановления потока; б) с учетом эффекта упругого восстановления потока

Для уменьшения влияния данного эффекта перестройки профиля потока необходимо, чтобы выходные сечения каналов направляющих аппаратов 1 и 3 были аналогичны по форме и размерам входным сечениям межлопаточных каналов заготовки 2. Их размер также может быть меньше на величину коэффициента упругого восстановления потока рабочей среды.

Так как поток РС поступает на лопатки заготовки под некоторым углом, на заготовку со стороны потока дополнительно воздействует момент силы. При использовании общей схемы базирования и закрепления заготовки (рисунок 2) опорная база отсутствует, что при недостаточной силе затяжки крепежной гайки 6 делает возможным поворота заготовки 8, в том числе и относительно НА 1 и 2 (рисунок 3). Этот эффект приводит к изменению профиля потока РС, а следовательно, дополнительной неравномерности обработки. Для решения двух вышеописанных проблем и повышения надежности ОАП закрытых каналов предложена схема способа ОАП с направляющим аппаратом и пальцами (рисунок 4).

Так как в схеме (рисунок 4) между НА 3 и заготовкой 4 имеется зазор, величина (длина) которого L влияет на технологический режим обработки, в частности на площади поперечных сечений выходных отверстий НА $S_{на}$ и сечениями входных отверстий каналов заготовки S_3 , для расчета размеров выходных отверстий НА предложена формула

$$S_3 = S_{на} L^\alpha, \quad (1)$$

где α - изменение диаметра струи потока (1,1...1,3) на каждый миллиметр длины зазора.

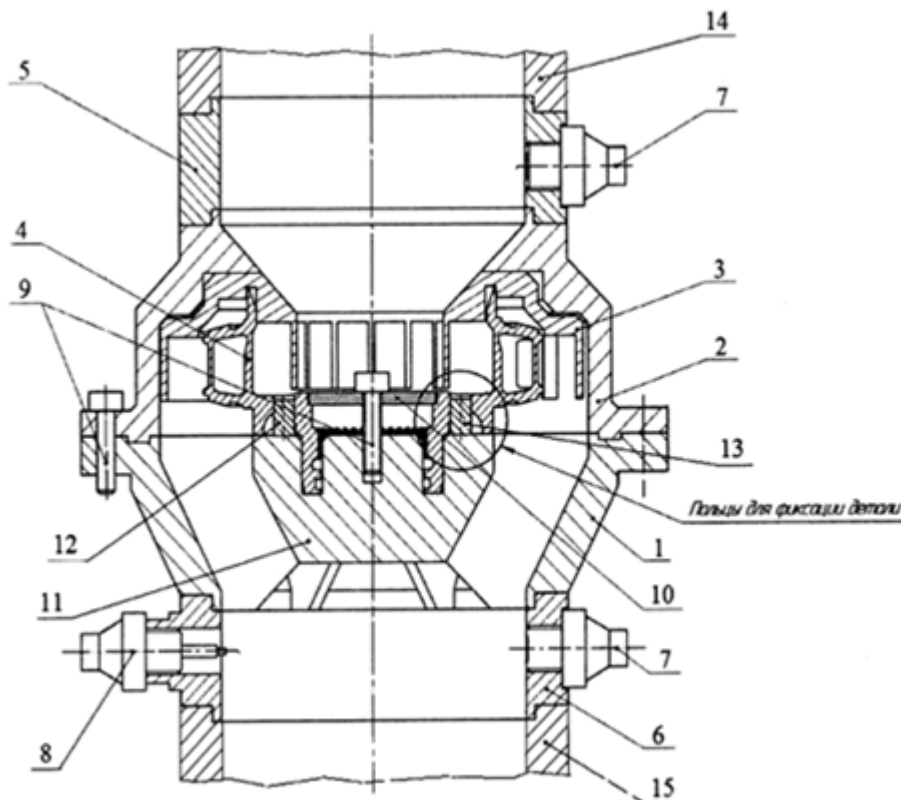


Рисунок 4 - Способ обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток: 1 - нижняя часть приспособления; 2 - верхняя часть приспособления; 3 - направляющий аппарат; 4 - обрабатываемая заготовка; 5 - верхний переходник; 6 - нижний переходник; 7 - датчики давления; 8 - температурный датчик; 9 - болты; 10 - стопорное кольцо; 11 - основание; 12 - цилиндрический палец; 13 - призматический палец; 14 - верхний рабочий цилиндр; 15 - нижний рабочий цилиндр

Для изготовления направляющего аппарата предложено использование технологии лазерной стереолитографии с последующей металлизацией поверхности НА либо использования полученной модели для литья по выплавляемым моделям.

Далее описаны основные шаги по совершенствованию существующей методики разработки ТП обработки абразивным потоком относительно закрытых каналов сложнопрофильных деталей, разработан алгоритм усовершенствованной методики. Предлагаемое совершенствование методики касается уточнения шагов 1, 2, 5, 6 и 7 последовательности выбора моделей течения РС этапа 1 общей (известной) модели.

Уточнение шага 1 связано с тем, что у закрытых каналов нет общей зоны течения потока РС, поток разделяется на m частей, что существенно влияет на профиль потока. Уточнение шага 2 вызвано использованием НА, что вводит в схему ОАП дополнительную четвертую зону течения потока. Эта зона разделяется еще на три части с установлением геометрического подобия формы и площади поперечного сечения (с учетом зависимости (1)), а также угла наклона как входной кромки канала НА, так и закрытого канала детали. Уточнение шага 5 связано с описанием входной части потока из переходника в НА и течением в самом направляющем аппарате. При уточнении шага 6 описываются m зон течения непосредственно в закрытых каналах. Уточнение шага 7 связано с процессом течения потока из закрытых каналов.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований ОАП рабочей среды высокой вязкости деталей из труднообрабатываемых сплавов.

Так исследование величины давления P_T , при которой начинается процесс течения, и изменения условий сдвига рабочих сред в зависимости от их состава. Эксперименты по определению влияния основных факторов на P_T проведены с использованием равномерноротатбельного плана для четырех факторов с трехразовым повторением опыта на каждом уровне плана: K_a (содержание абразива) – 1...2 м. ч.; K_f (содержание добавок) – 3...12 %; L_k (длина канала) – 3...10 мм; D_k (диаметр канала) – 1...9 мм. По результатам математической обработки экспериментальных данных получена зависимость предела текучести от основных факторов в диапазоне их варьирования:

$$P_T = -1,98 + 1,93K_a + 0,76K_f + 0,81L_k - 1,18D + 0,05K_aK_f + 0,04K_aL_k - 0,21K_aD_k - 0,04K_f^2 + 0,01K_fD_k - 0,06L_k^2 - 0,01L_kD_k + 0,15D_k^2 \quad (2)$$

В результате исследования влияния зернистости и углов при вершине единичного абразивного зерна на процесс ОАП подтверждена обратная зависимость результирующей силы резания от угла заточки абразивных зерен.

На основании зависимости (2), характера влияния зернистости и углов при вершине зерна и проведенной ранее обработки технологии ОАП закрытых каналов крыльчаток для повышения производительности обработки предложено проводить обработку рабочей средой одного состава: каучук СКТ (ГОСТ 14680–74, ТУ 38.103694–89) – 40...60% весового содержания; электрокорунд белый 25А зернистостью F100 – 40...60% весового содержания.

Для поиска экстремумов эмпирических зависимостей шероховатости R_a и твердости поверхности h от состава РС и давления сдвига P эксперименты проведены по плану Коно ($m=2$, число повторений на одном уровне – 6). Варьируемые факторы: процентное содержание по весу белого электрокорунда K_a – 40, 50, 60 % и каучука СКТ – 60, 50 и 40 % соответственно; давление сдвига P – 8, 10, 12 МПа. Для математической обработки произведено кодирование переменных $x_1 = K_a$, $x_2 = P$, $y_1 = R_a$, $y_2 = h$.

Обработка проведена на установке УЭШ-100, количество циклов при обработке – 60, время одного цикла ≈ 40 с. Для проведения ОАП было создано приспособление, имитирующее внутренний канал литой заготовки (рисунок 5).

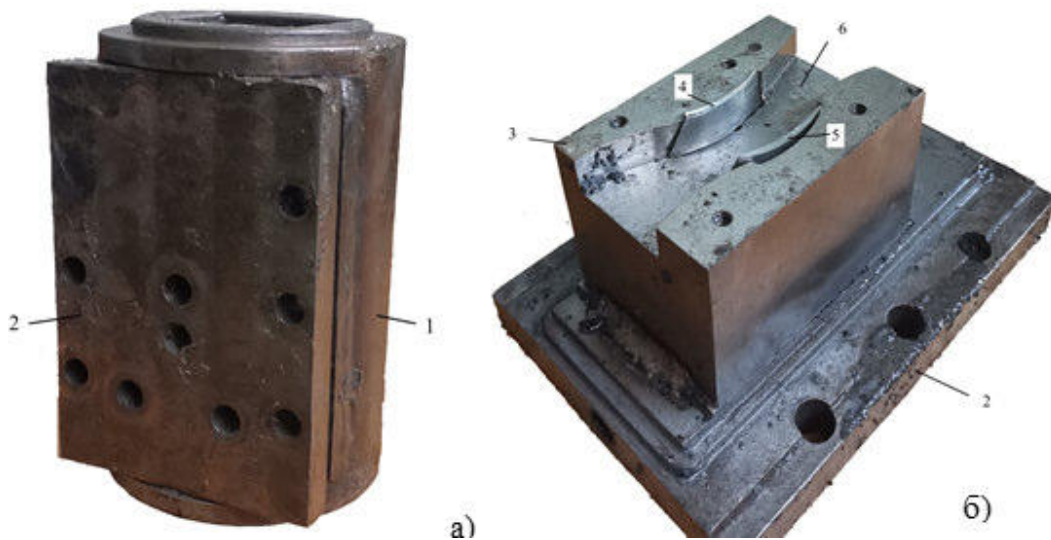


Рисунок 5 - Приспособление – имитатор внутреннего канала литой заготовки: а) общий вид; б) съемная часть: 1 - корпус; 2 - плата; 3 - основание; 4 - выгнутый образец; 5 - вогнутый образец; 6 - криволинейный канал

При установке собранной съемной части приспособления в корпус 1 криволинейный канал 6 совместно с внутренним каналом корпуса имитирует закрытый канал. В свою очередь, съемные литые образцы имитируют перо лопатки и показаны на рисунке 6.

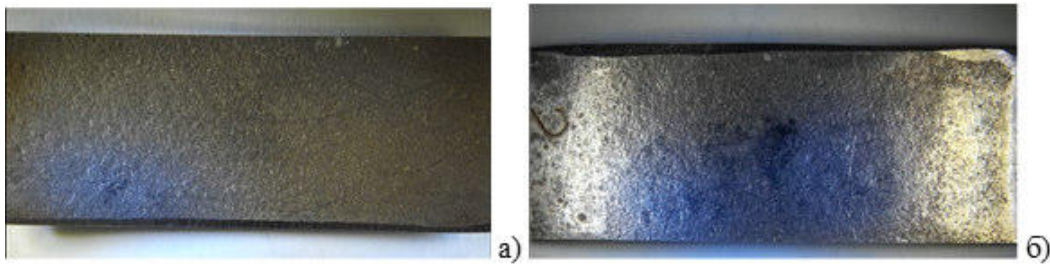


Рисунок 6 - Съемный литой образец – имитатор пера лопатки из стали 08X14H7МЛ: а) вогнутая часть; б) выгнутая часть

Состояние поверхности вогнутого и выпуклого съемного литого образца до обработки, после 30 циклов ОАП и после 60 циклов ОАП оценивались по изображениям, полученным на оптическом микроскопе. Профилограммы и величина шероховатости поверхности образцов определялись на профилометре модели *MarSurf M300*. Фактическая твердость поверхности образцов измерена на приборе *BUEHLER MICROMET 5100*. Исходная шероховатость: вогнутых образцов $Ra = 8,9...9,3$ мкм, выгнутых образцов – $Ra = 8,7...9,1$ мкм. Исходная твердость: вогнутых образцов 38,5...40,4 HRC, выгнутых образцов – 39,5...40,5 HRC.

В кодированном выражении эмпирическая зависимость шероховатости поверхности определена:

$$\text{Вогнутый образец } Y_1 = 2,72 - 0,33X_1 - 1,0X_2 + 0,5X_1^2 + 0,13X_1X_2 \quad (3)$$

$$\text{Выгнутый образец } Y_1 = 2,51 - 0,27X_1 - 1,13X_2 + 0,43X_1^2 + 0,07X_2^2 + 0,18X_1X_2 \quad (4)$$

В кодированном выражении эмпирическая зависимость твердости поверхности определена:

$$\text{Вогнутый образец } Y_1 = 39,58 + 0,15X_1 + 0,73X_2 - 0,22X_1^2 + 0,03X_2^2 - 0,08X_1X_2 \quad (5)$$

$$\text{Выгнутый образец } Y_1 = 39,99 + 0,07X_1 + 0,37X_2 - 0,13X_1^2 + 0,07X_2^2 - 0,03X_1X_2 \quad (6)$$

Поверхностный слой образцов до обработки (рисунок 7) представлен литевой коркой с шероховатостью произвольного направления величиной $Ra = 8,7...9,1$ мкм (выгнутые

образцы) и $Ra = 8,9...9,3$ мкм (вогнутые образцы). Твёрдость поверхности образцов варьировалась в интервале $38,5...40,5$ HRC, что превышает определяемую ОСТ 1 90005-91 твердость поверхности литых заготовок из стали 08X14H7МЛ – $33...39$ HRC.

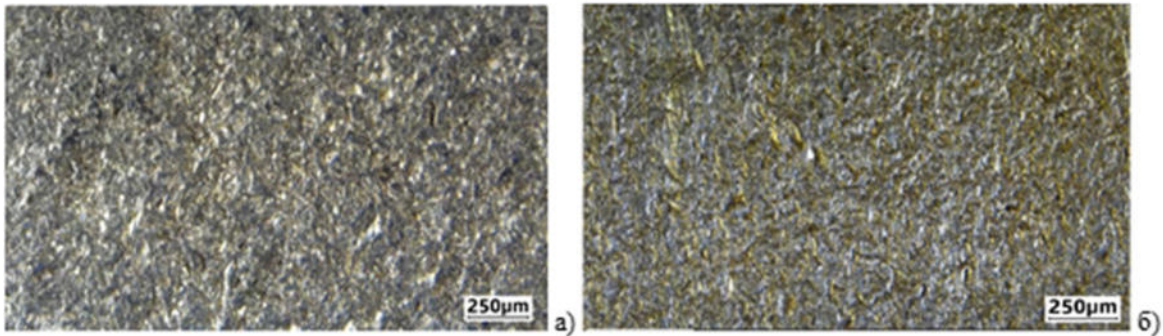


Рисунок 7 - Поверхность съемного литого образца до обработки: а) вогнутый; б) выгнутый

После 30 циклов обработки структура поверхности образцов (рисунок 8) изменилась. Большая часть выступов исходной литейной корки удалено. На поверхности виден комплекс отдельных царапин. Наблюдаются отдельные выступы со срезанными вершинами, а также ряд впадин исходной литейной корки. Шероховатость имеет, как правило, произвольное направление, а ее величина уменьшилась практически в два раза: $Ra = 4,2...4,5$ мкм (выгнутые образцы) и $Ra = 4,3...4,6$ мкм (вогнутые образцы). Твёрдость поверхности образцов возросла до $41,5...43,3$ HRC (выгнутые образцы) и до $41,0...42,8$ HRC (вогнутые образцы).

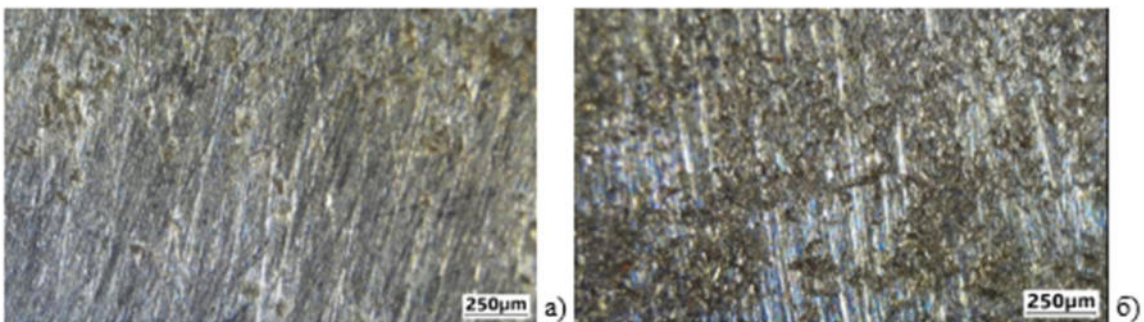


Рисунок 8 - Поверхность съемного литого образца после 30 циклов ОАП: а) вогнутый; б) выгнутый

После 60 циклов ОАП структура поверхности образцов (рисунок 9) представлена комплексом царапин, направление которых совпадает с направлением течения рабочей среды. Наблюдаются локальные зоны со остаточными впадинами исходной литейной корки. Шероховатость приобрела направление, параллельное направлению потока рабочей среды при обработке. Величина измеренной шероховатости для выгнутых образцов $Ra = 2,4...2,6$ мкм, для вогнутых образцов - $Ra = 2,6...2,8$ мкм. Твёрдость образцов достигла величины $44,5...45,5$ HRC на выгнутых образцах и $43,5...45,0$ HRC на вогнутых образцах.

Профилограмма литейной корки (рисунок 10, а) показывает комплекс местных выступов с разным средним шагом неровностей профиля по вершинам. Средняя высота выступов профиля Rp варьируется в пределах от 12 до 14 мкм. Глубина шероховатости сердцевин Rk изменяется в интервале от 10 до 12 мкм. При этом материальная составляющая $Mr1$, которая отделяет выступающие пики от основного профиля шероховатости, составляет всего 10 %. Материальная составляющая $Mr2$, отделяющая глубокие впадины от основного профиля шероховатости, составляет 79 %.

Профилограмма поверхности после 60 циклов обработки (рисунок 10, б) свидетельствует о существенном выравнивании профиля и увеличении его опорной длины. Показатель R_p уменьшился до диапазона от 3,2 до 4 мкм, а показатель R_k также снизился до значений от 2,5 до 3,2 мкм. Составляющая $Mr1$ увеличилась до 11 %, а $Mr2$ – до 85 %.

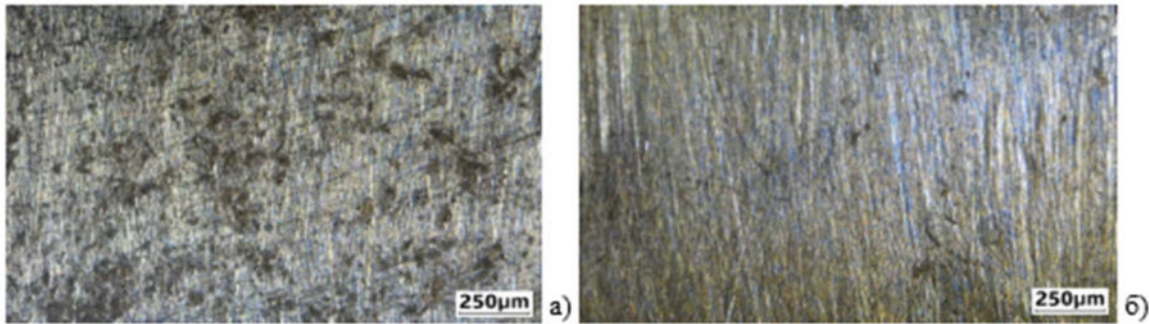


Рисунок 9 - Поверхность съемного литого образца после 60 циклов ОАП: а) вогнутый; б) выгнутый

Результаты экспериментальных исследований позволяют разделить процесс ОАП литых образцов на два этапа, различающихся между собой особенностями контакта АЗ и обрабатываемой поверхности.

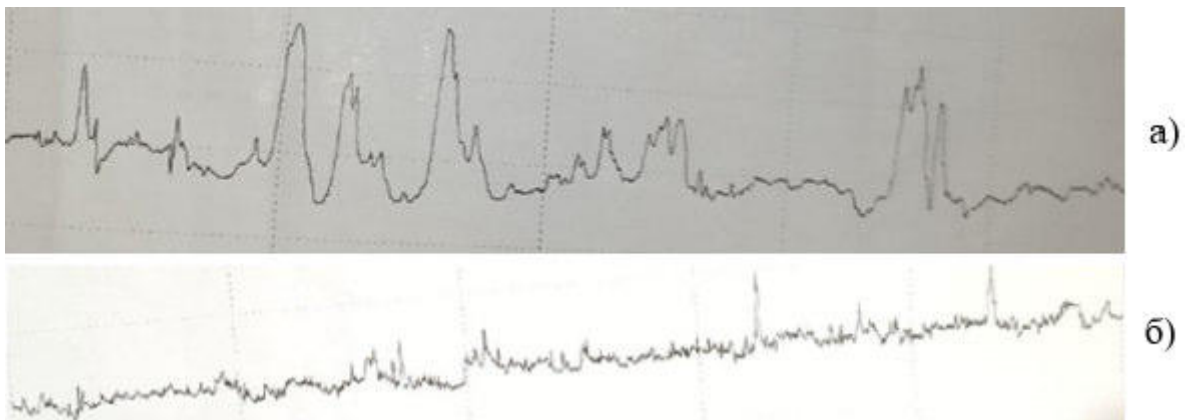


Рисунок 10 - Профилограмма поверхности выгнутого съемного литого образца: а) до обработки; б) после 60 циклов ОАП

Структура литейной корки определяет условия обработки на первом (черновом) этапе. Она отличается существенной неравномерностью высоты и распределения выступов. В контакт вступает некоторая часть зерна, при этом элементарные фактические площади касания образуются, как на вершинах, так и боковых поверхностях местных выступов корки. На этих участках преобладают механизмы микрорезания на уровне отдельных микровыступов зерна. Впадины профиля не меняют своей конфигурации, что говорит об отсутствии процесса пластической деформации оснований выступов профиля шероховатости. Возрастание величины твёрдости поверхности образца на этом этапе ОАП вызвано увеличением процента материальной составляющей средней линии профиля шероховатости из-за снятия слоя металла с локальных выступов литейной корки.

В процессе обработки постепенно удаляется материал с вершук локальных выступов и с боковых поверхностей. При этом элементарные фактические площади касания уменьшаются. После того как слой литейной корки удаляется практически полностью меняется механизм контактных взаимодействий. Зерно контактирует уже не с материалом корки, а с основным металлом заготовки в условиях равновесного контакта потока РС и поверхностного слоя образца. В контакт вступает существенно меньшая часть зерна, при

этом сьем металла (микрорезание) осуществляется на уровне ее микровыступов, а площадь касания становится еще меньше. Уменьшение размеров элементарных фактических площадок касания при постоянной силе резания ведет к росту величины фактического давления в контакте. Это обуславливает проявления пластические деформации локальных участков поверхности в зоне контакта. Шероховатость поверхности принимает параллельное направление. Пластическая деформация в ходе обработки ведёт к деформационному упрочнению приповерхностной области и появлению остаточных сжимающих напряжений.

Описанные выше результаты обработки характерны как для вогнутых, так и для выгнутых образцов. Следовательно их можно отнести и к обработке криволинейного канала, имитирующего закрытый канал.

В четвертой главе описаны результаты отработки усовершенствованного технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей.

Повышение производительности и равномерности обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчатки насоса осуществлено за счет использования усовершенствованного технологического процесса.

Обработка крыльчатки проведена на опытно-промышленной установке УЭШ-100 (рисунок 11). В качестве основы рабочей взят каучук СКТ. Его весовая доля в составе среды – 66%. В качестве наполнителя применены зерна карбида кремния черного 54С зернистостью *F20*. Карбид кремния, по сравнению с электрокорундом, обладает более высокой твердостью, а в его структуре чаще встречаются зерна промежуточной и даже пластинчатой формы. Выбор процентного содержания компонентов рабочей среды осуществлён по зависимостям (3) ... (6).



Рисунок 11 - Обработка абразивным потоком крыльчатки на опытно-промышленной установке УЭШ-100

Использование в схеме ОАП крыльчаток технологической оснастки в виде созданного направляющего аппарата (рисунок 12, а) позволило также создать равномерный расход во всех 12 закрытых каналах крыльчатки (рисунок 12, б). Направляющий аппарат создан на основе цифрового двойника технологией SLA с последующей металлизацией.

Обработка проведена в один этап 60 циклами (55...60 минут) с использованием давления масла в гидравлической системе установки до 12 МПа. В ходе процесса контролировалась температура и давление рабочей среды. Температура рабочей среды за 60 циклов повысилась от 20°C до 31°C, оставаясь в рекомендуемом интервале температуры, при котором ее повышение не оказывает серьезного влияния на вязкость (жесткость) рабочей среды.

При давлении сдвига 12 МПа давление потока РС, измеряемое датчиками, в начале каждого цикла достигала значений 7,5...8 МПа. Далее при формировании потока и сдвигового течения РС в обрабатываемых ЗК давление снижалось до величины 3,2...3,9 МПа. Такие величины давления потока в канале обеспечивали необходимые значения сил резания, обеспечивающие все виды контактных взаимодействий зерен карбида кремния с обрабатываемыми поверхностями.

Визуальный осмотр поверхности входной части всех закрытых каналов крыльчатки до обработки (рисунок 13, а) и после обработки (рисунок 13, б) показал наличие равномерной обработки всех двенадцати каналов. При этом существенного изменения профиля входных кромок лопаток не обнаружено.

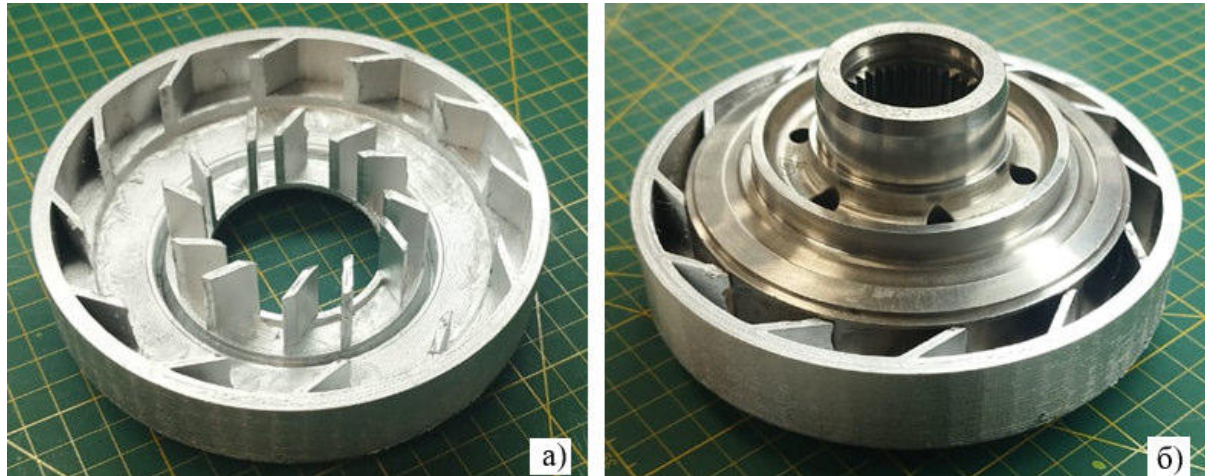


Рисунок 12 - Технологическая оснастка направляющий аппарат: а) направляющий аппарат; б) крыльчатка в сборе с направляющим аппаратом

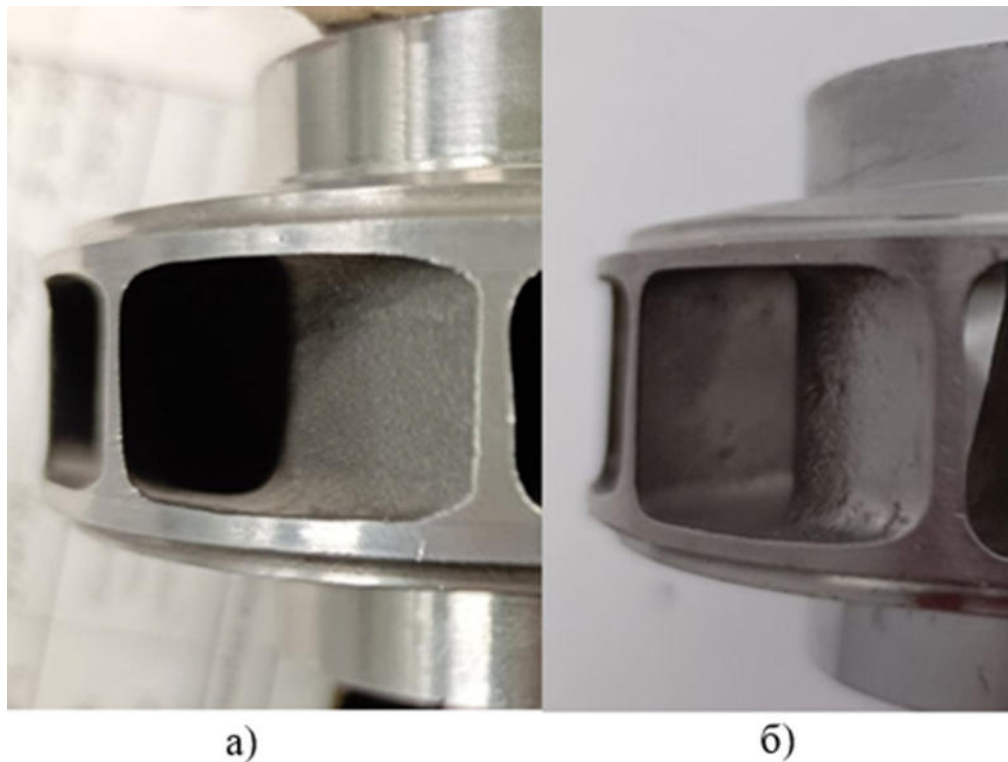


Рисунок 13 - Поверхность закрытых каналов крыльчатки: а) до обработки абразивным потоком; б) после обработки абразивным потоком.

Дальнейший анализ топографии поверхности установил, что поверхность до ОАП представлена литейной коркой с шероховатостью произвольного направления величиной $Ra = 8,7 \dots 10,2$ мкм. Твёрдость входной части варьировалась в интервале $38,5 \dots 40,5$ HRC.

После 60 циклов обработки структуре поверхности закрытых каналов присущ комплекс царапин, направление которых совпадает с направлением течения рабочей среды. Видны остатки впадин исходной литейной корки. Средняя ширина царапин 3-5 мкм. Шероховатость поверхности для всех каналов приобрела направление, параллельное направлению потока рабочей среды при обработке. Величина измеренной шероховатости поверхности $Ra = 2,4 \dots 2,9$ мкм. Данная топография поверхности характерна и для входной части закрытого канала, так и для его средней части. Твёрдость поверхности на входе в каналы достигла величины $43,5 \dots 45,5$ HRC.

Сравнение результатов изменения шероховатости и твёрдости поверхности двенадцати закрытых каналов крыльчатки показало, что в результате ОАП осуществлено равномерное уменьшение шероховатости поверхности всех закрытых каналов в 3,5 раза с одновременным упрочнением их поверхностного слоя на 40...43%. Производительность обработки удалось обеспечить за счет применения РС одного состава, что позволило уменьшить вспомогательное время на перезагрузку разных составов рабочих сред при одинаковом количестве циклов обработки.

Таким образом, в усовершенствованном технологическом процессе ОАП закрытых каналов крыльчаток необходимо выделить следующие этапы.

На основном этапе происходит непосредственный процесс обработки закрытых каналов крыльчатки, включающий в себя базирование и закрепление крыльчатки и направляющего аппарата в переходники технологической оснастки и установку для обработки, сам процесс обработки и извлечение крыльчатки из оснастки.

После обработки из закрытых каналов крыльчатки механическим путем были удалены остатки РС. Далее по специальной технологии была проведена промывка и обезжиривание внутренних поверхностей закрытых каналов. После этого осуществляется процесс контроля шероховатости поверхности, скругления кромок входного и выходного сечения закрытых каналов. Проводится контроль твердости поверхности, а также геометрических размеров закрытых каналов. После контрольных операций проводится сравнение полученных результатов с заданными конструкторской документацией значений.

Расчет влияния шероховатости проточной части межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на энергетические параметры насоса проведен на основе методик моделирования течения в проточной части насоса с использованием ANSYS CFX. По результатам расчета получены численные значения параметров насоса для величины шероховатости поверхности проточной части от Ra 0,8 мкм (полированная) до 8,6 мкм (исходная литая корка),

По результатам расчета построена зависимость КПД насоса и напора насоса от величины шероховатости проточной части. Полученные зависимости показаны на рисунке 14.

При моделировании шероховатости в ANSYS CFX применена так называемая "песочная" модель. Расчет проводился при следующих значениях величины шероховатости: гладкая стенка; 1,6 мкм; 6,4 мкм; 12,6 мкм и 17,2 мкм. Соответственно 1,6 мкм; 6,4 мкм; 12,6 мкм и 17,2 мкм – это диаметр сферы, а реальная шероховатость равна радиусу, то есть 0,8 мкм; 3,2 мкм; 6,3 мкм и 8,6 мкм. Шероховатость задавалась на элементах, формирующих проточную часть насоса.

По результатам CFD моделирования получено распределение основных параметров в проточной части насоса (статическое давление, полное давление, векторное поле меридиональной скорости и др.). Проведено сравнение относительного снижения напора и КПД для различных величин шероховатости (рисунок 15). В качестве точки отсчета выбран расчет, проведенный для гидравлически гладкой проточной части.

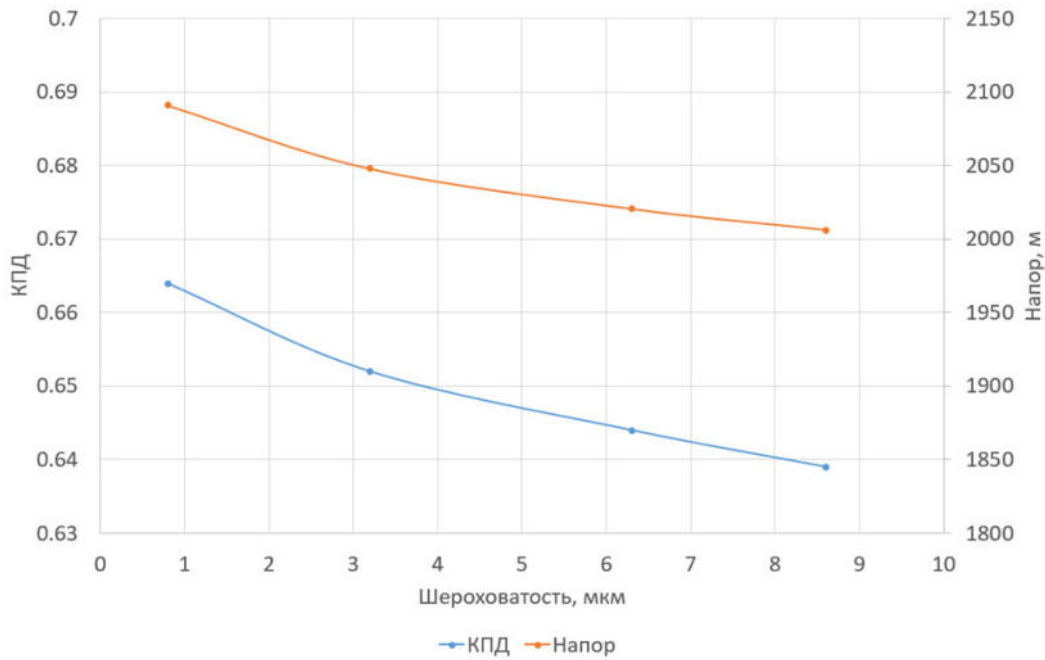


Рисунок 14 – Зависимость напора и КПД насоса от шероховатости проточной части

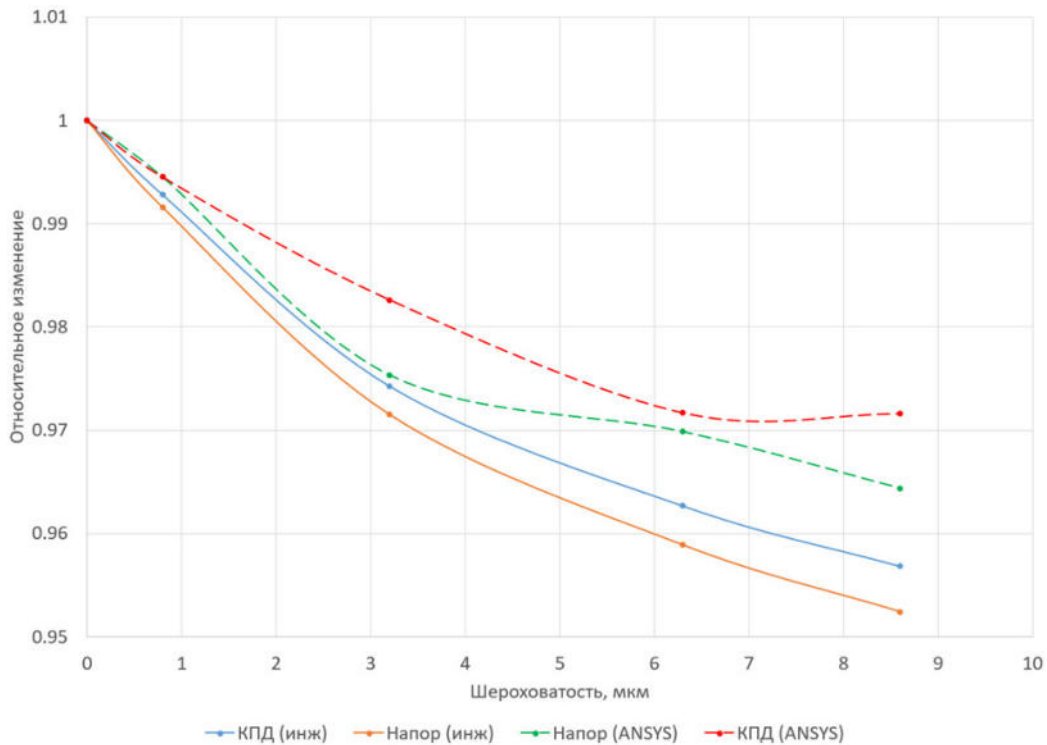


Рисунок 15 – Относительное снижение энергетических параметров насоса при различной величине шероховатости проточной части

Разработка ТП обработки абразивным потоком конкретной детали проводится с применением алгоритма усовершенствованной методики разработки ТП обработки абразивным потоком закрытых каналов. Рекомендации по режимам обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей приведены в таблице 1.

Обработку абразивным потоком сложнопрофильных деталей из различных материалов в рамках производственного предприятия возможно проводить на одной установке, выбирая для каждого случая свое приспособление и состав РС. Для обработки абразивным потоком деталей типа крыльчатка и сопловой аппарат в состав технологической оснастки необходимо включать направляющий аппарат.

Таблица 1. Рекомендуемые режимы ОАП закрытых каналов сложнопрофильных деталей

Наименование, способ получения, материал, требуемая шероховатость Ra , мкм	Количество обрабатываемых поверхностей и их вид	Режимы обработки					
		$P_{вх}$, МПа	Va , мкм	Ka , %	Кол-во циклов	T , C^0	ω_{max} м/сек.
Сопловой аппарат, литье, сталь ХН73МБТЮ, 1.25...2.5 мкм	25 закрытых каналов переменного сечения / Направляющий аппарат	12,0	250	66	70	20...70	0,020
Крыльчатка, литье, ВНЛ-1 1.25...2.5 мкм	12 закрытых каналов переменного сечения / Направляющий аппарат	12,0	250	66	60	20...30	0,020
Крышка насоса, литье, ВНЛ-1 1.25...2.5 мкм	Профильная поверхность / Выравнивающее устройство	12,0	250	66	70	20...30	0,020
Шнек насоса, литье, ВНЛ-1, 1.25...2.5 мкм	3 спиральных проточных каналов переменного сечения / Выравнивающее устройство	10,0	250	66	50	20...30	0,020

Для обработки абразивным потоком деталей типа крышка насоса шнек в состав технологической оснастки необходимо включать специальные выравнивающие устройства.

Таким образом усовершенствованный технологический процесс обработки абразивным потоком обеспечил достижения поставленной цели –повышение производительности (за счет уменьшения вспомогательного время на перезагрузку разных составов рабочих сред при одинаковом количестве циклов обработки) и равномерности ОАП внутренних поверхностей закрытых каналов центробежных колес (крыльчаток) для повышения напора и КПД насоса, а также снижения потребляемой им мощности, при обеспечении требуемой величины шероховатости и твердости этих поверхностей.

В результате в соответствии с разработанными технологическими рекомендациями ОАП закрытых каналов сложнопрофильных деталей данная технология планируется к внедрению в условиях опытного производства на АО «Красмаш».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обобщения результатов проведенных исследований предложено научно-обоснованное решение актуальной проблемы по повышению производительности и равномерности обработки абразивным потоком внутренних поверхностей закрытых каналов крыльчаток сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей.

1. В результате сравнительного анализа современных технологий финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей установлено, что с точки зрения технологической надежности обеспечения равномерности обработки таких каналов наибольшие перспективы представляет технология обработки абразивным потоком. Основными проблемами при этом остаются неравномерность обработки и низкая производительность процесса.

2. На основе визуального моделирования процесса течения рабочей среды высокой вязкости с учетом особенностей расчета характеристик ее потока и экспериментальных исследований процесса удаления материала поверхностного слоя закрытых каналов сформулированы предложения по совершенствованию обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей.

3. Представлена усовершенствованная методика разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей, отличающаяся тем, что предложено выравнивание условий обработки в закрытых каналах за счет направляющего аппарата и на этапе выбора модели потока рабочей среды учтено разделение этого потока на отдельные зоны течения в каждом канале, позволяющая обеспечить равномерность обработки всей поверхности каналов.

4. Разработан новый способ обработки абразивным потоком межлопаточных закрытых каналов крыльчаток с применением направляющего аппарата, отличающийся тем, что выходные сечения каналов направляющего аппарата аналогичны по форме и размерам входным сечениям каналов крыльчатки или меньше их размеров на величину коэффициента упругого восстановления струи рабочей среды в зазоре между ними, обеспечивающий равномерную обработку всей поверхности каналов.

5. Разработана конструкция направляющих аппаратов как элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчаток и технология их изготовления.

6. Установлены регрессионные зависимости шероховатости и твердости поверхности литых образцов из аустенитно-мартенситных сталей от режимов обработки абразивным потоком, позволяющие выбирать такие сочетания состава высоковязкой рабочей среды и величины давления сдвига при обработке, которые, в отличие от предыдущих режимов обработки, позволяют реализовывать ее в один этап, тем самым повышая производительность обработки на 20%.

7. Впервые описаны особенности изменения условий контактных взаимодействий абразивных зерен на элементарных фактических площадях касания с микронеровностями поверхностного слоя образцов из аустенитно-мартенситной стали от исходной литейной корки до основного материала в процессе обработки, формирующие структуру поверхностного слоя и деформационное упрочнение приповерхностной области, на основании которых даны рекомендации по выбору режимов обработки, повышающих ее производительность на 20%.

8. Усовершенствован технологический процесс обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчаток из аустенитно-мартенситных сталей, позволивший обеспечить равномерную обработку всей внутренней поверхности и уменьшить ее шероховатость от исходной (литьевая корка) $Ra = 8,7...9,3$ мкм до полированной $Ra = 2,4...2,8$ мкм, а также увеличить ее твердость с исходной 38,5...40,5 HRC до 43,5...45,5 HRC.

9. Предложен расчет и методика конечно-элементного моделирования влияния шероховатости проточной части межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на энергетические параметры насоса, результаты которых показали, что при уменьшении шероховатости закрытых каналов с $Ra = 8,6$ мкм до $Ra = 2,4...2,9$ мкм и до $Ra = 0,8$ мкм напор и КПД насоса увеличатся на 1,5-2,5 % с одновременным уменьшением потребляемой насосом мощности до 8 %.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных списком ВАК:

1. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали / В. А. Левко, **Н. С. Теряев**, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 122-132. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132. (80 %) – К1

2. Совершенствование технологии обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, **Н. С. Теряев**, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 3-12. – DOI 10.25960/мо.2023.3.3. (80 %) – К2

3. Совершенствование методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, **Н. С.**

Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Металлообработка. – 2024. – № 6(144). – С. 18-32. – DOI 10.25960/mo.2024.6.18. (80 %) – К2

Статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus:

4. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining / V. A. Levko, O. V. Litovka, D. I. Savin, **N. S. Terjaev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : III International Scientific Conference, Krasnoyarsk, 29–30 апреля 2021 года. Vol. Volume 1155. – Krasnoyarsk: IOP PublishingLtd, 2021. – P. 12029. – DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029. (50%)

Патент РФ на изобретение:

5. **Теряев Н.С.** Патент № 2751073 С1 Российская Федерация, МПК В24С 1/00. Способ обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток : № 2020136652 : заявл. 06.11.2020 : опубл. 07.07.2021 / Н. С. Теряев, В. А. Левко ; заявитель Акционерное общество "Красноярский машиностроительный завод". (90%)

Публикации в других изданиях:

6. Исследование влияния зернистости и углов при вершине единичного абразивного зерна на качество поверхности при абразивно-экструзионной обработке / **Н. С. Теряев**, А. И. Ермоленко, А. Ю. Володин [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 20-21. (70 %)

7.Изменение условий сдвига в зависимости от состава рабочей среды для абразивно-экструзионной обработки / А. И. Ермоленко, **Н. С. Теряев**, А. Ю. Володин [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 10-11. (50%)

8.Особенности абразивно-экструзионной обработки труднообрабатываемых сплавов после литья по выплавляемым моделям / **Н. С. Теряев**, А. Ю. Володин, С. К. Сысоев, А. С. Сысоев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – Т. 1, № 11. – С. 43-45. (60%)

9. Пределы текучести рабочих сред для абразивно-экструзионной обработки деталей / **Н. С. Теряев**, Л. П. Сысоева, А. С. Сысоев, С. К. Сысоев // Решетневские чтения. – 2015. – Т. 1. – С. 489-491. (60%)

10. **Теряев, Н. С.** Повышение качества поверхности лопаток в крыльчатках ТНА / Н. С. Теряев, Л. П. Сысоева, А. С. Сысоев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1, № 12. – С. 39-41. (60%)

11. **Теряев, Н. С.** Взаимодействие абразивных зерен с поверхностью каналов крыльчатки при абразивно-экструзионной обработке / Н. С. Теряев, Л. П. Сысоева, А. С. Сысоев // Решетневские чтения. – 2016. – Т. 1. – С. 56-58. (70%)

12.Левко, В. А. Технологии финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, **Н. С. Теряев** // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Том Часть 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 572-577. (70%)

13. **Теряев, Н. С.** Выбор эффективного объема рабочей среды для обработки абразивным потоком / Н. С. Теряев, О. В. Литовка // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 11–15 апреля 2022 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 38-40. (70%)

14. Критерии выбора технологического процесса финишной обработки / В. А. Левко, О. В. Литовка, П. А. Иванов, **Н. С. Теряев** // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 10–14 апреля 2023 года / Под общей редакцией

Ю.Ю. Логинова. Том 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 31-33. (20%)

15. Левко, В. А. Повышение надежности обработки абразивным потоком закрытых каналов заготовки за счет уменьшения погрешности базирования и закрепления в приспособлении / В. А. Левко, **Н. С. Теряев** // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 67-72. (80%)

16. Направляющий аппарат как элемент технологической оснастки для обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / **Н. С. Теряев**, В. А. Левко, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Механики XXI века. – 2024. – № 23. – С. 234-239. (80%)

17. Применение цифровых двойников при создании элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком / В. А. Левко, **Н. С. Теряев**, О. В. Литовка [и др.] // Механики XXI века. – 2025. – № 24. – С. 134-138. (70%)

18. Основные проблемы обработки абразивным потоком закрытых каналов литых заготовок и пути их решения / **Теряев Н.С.**, Левко В.А. // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2025. – №8. – С. 34 – 36 DOI: 10.26160/2658-6185-2025-8. (80%)

19. **Теряев, Н. С.** Расчет и моделирование влияния шероховатости проточной части межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на энергетические параметры насоса / Н. С. Теряев, В. А. Левко // Современные машиностроительные системы, технологии и инновации : Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 06 марта 2026 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2026. – С. 468-471.

20. Определение регрессионных зависимостей шероховатости и микротвердости поверхности литых образцов из стали 08X14H7MЛ от режимов обработки абразивным потоком / В. А. Левко, **Н. С. Теряев** // «Современные вопросы устойчивого развития общества в эпоху трансформационных процессов (шифр –МКСВ)» 13 марта, (2026, Москва). Сб. материалов XXXIV Международной научно-практической конференции, Издательство АНО ДПО «Университет ИТБО», Москва, 2026, с.81-85. DOI 10.26118/5416.2026.16.25.019 (80%)