

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Сибирский государственный университет науки и технологий имени
академика М. Ф. Решетнева»**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Левко Валерий Анатольевич

Красноярск – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	12
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1 Сравнительный анализ современных технологий финишной обработки внутренних поверхностей закрытых каналов сложнопрофильных деталей.....	15
1.2 Основные проблемы обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей.....	22
1.3 Выводы по главе, постановка цели и задач исследований	34
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ.....	36
2.1 Теоретические основы обработки абразивным потоком	36
2.1.1 Особенности расчета характеристик потока рабочей среды высокой вязкости	39
2.1.2 Особенность контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых материалов	50
2.2. Моделирование процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей	54
2.3. Предложение по совершенствованию обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей за счет применения направляющего аппарата как элемента технологической оснастки.....	58
2.4. Совершенствование методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком сложнопрофильных деталей.....	69
2.4.1 Уточнение шагов известной методики.....	69
2.4.2 Алгоритм усовершенствованной методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей.....	76
2.5 Выводы по главе.....	80
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ.....	82
3.1 Особенности обработки абразивным потоком рабочей среды высокой вязкости	82
3.1.1 Исследование условий сдвига рабочих сред в зависимости от их состава.....	83

3.1.2 Исследование влияния зернистости и углов при вершине единичного абразивного зерна на процесс обработки абразивным потоком	86
3.2 Экспериментальные исследования процесса обработки абразивным потоком литых образцов из стали 08X14H7МЛ.....	90
3.3 Анализ контактных взаимодействий абразивных зерен с микронеровностями поверхности каналов деталей из аустенитно-мартенситных сталей на основе исследований процесса обработки абразивным потоком литых образцов.....	98
3.4 Выводы по главе.....	104
4. ОТРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ	105
4.1 Повышение производительности и равномерности обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчатки насоса турбонасосного агрегата за счет использования усовершенствованного технологического процесса.....	105
4.2 Расчет и моделирование влияния шероховатости проточной части межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на энергетические параметры насоса.....	111
4.3 Рекомендации по совершенствованию производства сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей насосов за счет внедрения обработки абразивным потоком.....	124
4.4 Выводы по главе.....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	155

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных составляющих турбонасосного агрегата (ТНА) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) являются центробежные колеса (крыльчатки) лопаточных насосов. Из наиболее общих требований к ТНА выделяют: обеспечение непрерывной подачи необходимого количества компонентов топлива в камеру сгорания под заданным давлением и с возможно более высоким коэффициентом полезного действия (КПД); минимальной стоимостью изготовления, а также минимальными габаритными размерами и массой. Лопаточные насосы отвечают этим требованиям, однако для них характерна сравнительно небольшая величина КПД насосов (обычно не более 0,8...0,85) [1]. Одной из причин этого является потери на трение в межлопаточных каналах.

Актуальность темы диссертации. Из-за высокой сложности геометрии закрытых каналов сложнопрофильных деталей их окончательная обработка инструментами постоянной формы (круги, хонинговальные головки, притиры, ленты, бруски, лезвийный инструмент и др.) 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 в мировой практике более широкое применение находит метод обработки абразивным потоком (ОАП) (*abrasive flow machining (AFM)*) [2]. В нашей стране эта технология известна и под такими названиями как обработка абразивной массой, абразивно-экструзионная обработка, экструзионное хонингование.

Практика применения обработки абразивным потоком закрытых каналов выявила неравномерность съема металла в таких каналах, особенно на входной кромке [3]. Появление этой неравномерности подтверждено результатами моделирования процесса и обусловлено перестройкой профиля потока рабочей среды [4-7]. Неравномерность обработки на входной и выходной кромках

закрытых каналов предложено выравнивать за счет применения направляющих аппаратов (НА) [2, 8-10]. Применение НА позволило уменьшить неравномерность обработки входных кромок, но добиться равномерной обработки всей поверхности закрытого канала не удалось из-за влияния зазора между НА и крыльчаткой на поток рабочей среды (РС). Кроме того, крыльчатки получают литьем по выплавляемым моделям из аустенитно-мартенситных сталей, которые относятся к труднообрабатываемым материалам, что обуславливает особые требования к режимам обработки, в частности составам рабочей среды.

Совершенствование технологии ОАП закрытых каналов крыльчаток возможно за счет применения новой схемы ОАП с НА и рабочих сред высокой вязкости. Использование при обработке направляющих аппаратов, отвечающим требованиям по точности базирования и закрепления, а также величины зазора между кромками НА и крыльчатки, обеспечит равномерность обработки всей внутренней поверхности закрытых каналов. Использование РС высокой вязкости, состав которых выбран по полученным эмпирическим зависимостям 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

Extrude Hone Corporation (США), Bel Air Finishing (США), Micro Hega Surfaces GmbH (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 хода, 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, 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 $Ra = 2,4 \dots 2,9$ 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 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), «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), «Механики XXI века» (Братск, 25 апреля 2024 года; Братск, 17-18 апреля 2025 года), «Механика и машиностроение. Наука и практика» (Санкт-Петербург, 27 ноября 2025), «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 зернами (их видом и величиной). Вязкость рабочей среды предлагается регулировать за счет применения различных пластификаторов.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

AFM – *abrasive flow machining* (обработка абразивным потоком)

SLA – *Stereolithograph* (стереолитография)

SLM – *Selective laser melting* (селективное лазерное сплавление)

АЗ – абразивное зерно

ЖРД – жидкостной ракетный двигатель

ЗК – закрытый канал

КПД – коэффициент полезного действия

КСР – модель Каргина–Слонимского–Рауза

НА – направляющий аппарат

ОАП – обработка абразивным потоком

ПС – поверхностный слой

РС – рабочая среда

СД – сложнопрофильная деталь

ТНА – турбонасосный агрегат

ТП – технологический процесс

ФО – финишная обработка

ЦД – цифровой двойник

ЭПО – электролитно-плазменная обработка

ЭХО – электрохимическая обработка

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что для изготовления ряда деталей турбонасосного агрегата используют литейные коррозионностойкие стали 03X11Н8М2ФЛ, 03X12Н10МТЮЛ, 04X12Н6М5КЮЛ, 08X14Н7МЛ. Литые детали из аустенитно-мартенситных сталей имеют сложные каналы (рисунок 1.1), расположенные, в основном, по окружности (лопатки крыльчаток, колес турбин, направляющих аппаратов и др.); поверхности каналов находятся под углом (до 350°) относительно направления потока газа и жидкости в агрегатах с изменением углов наклона каналов по его длине, а геометрические параметры каналов изменяются в широком диапазоне (по диаметру от 30 до 800 мм, по площади сечения отдельного канала от 25 до 1000 мм², по суммарной площади сечения каналов от 10 до 80000 мм²) [11].

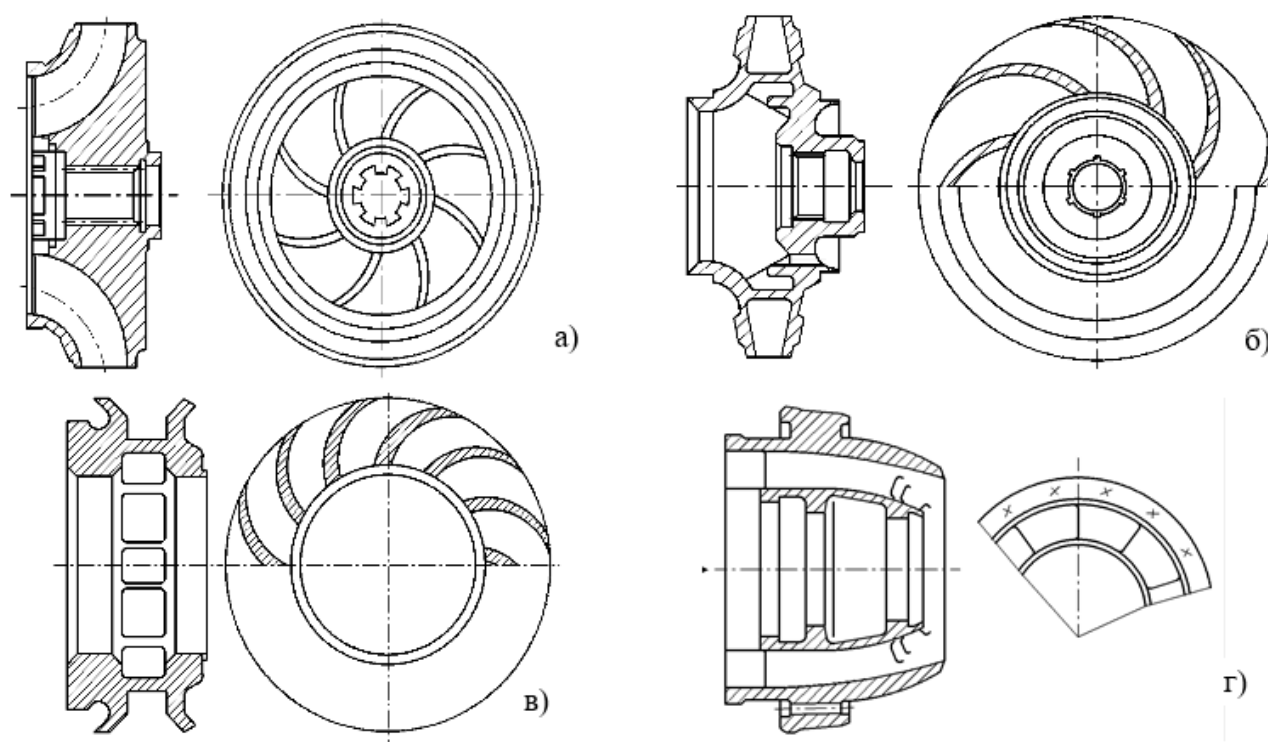


Рисунок 1.1 – Детали турбонасосного агрегата с закрытыми каналами: а) колесо турбины; б) центробежное колесо (крыльчатка); в) направляющий аппарат; г) спрямляющий аппарат [11]

При этом состояние поверхностного слоя (ПС) деталей после формообразования методом литья по выплавляемым моделям характеризуется: повышенной шероховатостью ($Ra = 6,2...12,5$ мкм); большой глубиной термически изменённого слоя (литейная корка $h = 0,1 - 0,8$ мм); высокими остаточными напряжениями. При этом конструкторская документация предусматривает следующие требования к поверхностям каналов по шероховатости $Ra = 0,63...3,2$ мкм, по точности $0,1...0,3$ мм [11].

При обработке заготовок из аустенитно-мартенситных сталей в отожжённом состоянии получить ПС высокого класса шероховатости затруднительно [12]. Сталь 08X14H7MЛ плавят в открытых или вакуумных индукционных печах. Отливки отвечают требованиям по прочностным и пластическим характеристикам, однако в них обнаружены такие макродефекты, как зональные рыхлоты площадью до $10-14$ мм² [13].

На сегодняшний день для формообразования заготовок сложнопрофильных деталей (СД) более широкое применение находит метод селективного лазерного сплавления (*Selective laser melting (SLM)*). Однако и для этого способа до сих пор не решена проблема высокой шероховатости, пористости и уровня остаточных напряжений ПС лопаток закрытых и открытых каналов [14].

Шероховатость ПС закрытых каналов СД влияет на показатели потока компонентов топлива, а следовательно, и на устойчивость работы насосов и их КПД. Как правило, для обеспечения необходимых параметров шероховатости и твердости внутренней поверхности закрытых каналов СД требуется дополнительное применение технологий финишной обработки (ФО).

Применение направляющих аппаратов как элементов технологической оснастки позволило уменьшить неравномерность обработки входных кромок, но добиться равномерной обработки всей поверхности закрытого канала (ЗК) не удалось. Кроме того, проектирование и изготовление НА связано с дополнительными затратами и представляет собой серьезную задачу.

Таким образом, создание и обеспечение требуемой шероховатости внутренней поверхности закрытого канала, равномерной по всей его длине, в том числе на входных кромках, является актуальной проблемой.

Известно, что для выбора способа ФО используются такие показатели качества детали, как точность изготовления и шероховатость и твердость поверхностного слоя. Достаточные условия выбора характеризуются производительностью, технологической себестоимостью и технологической надежностью процесса [15].

Мировая практика показывает, что процессы ФО являются наиболее трудоемкими, интенсивными и неконтролируемыми областями производства в изготовлении прецизионных деталей: на их долю приходится не менее 15% от общих производственных затрат [16]. Поэтому выбор процесса ФО закрытых каналов СД играет важную роль в организации производства.

Эти условия были взяты за основу сравнительного анализа современных технологий финишной обработки внутренних поверхностей закрытых каналов.

1.1 Сравнительный анализ современных технологий финишной обработки внутренних поверхностей закрытых каналов сложнопрофильных деталей

Целевой функцией сравнительного анализа было выбрано обеспечение требуемой величины и равномерности шероховатости ПС ЗК деталей, полученных литьем по выплавляемым моделям из коррозионностойких сталей аустенитно-мартенситного типа. Проведенный анализ современного уровня технологических процессов (ТП) ФО таких каналов показал, что их можно классифицировать на восемь условных групп со некоторыми комбинациями.

Первая группа. Лазерная термическая обработка (рисунок 1.2) применяется для термической обработки и упрочнения поверхности [17]. При этом формируются микроструктуры в высоколегированных сталях переходного аустенитно-мартенситного класса [18, 19]. Однако существующие конструкции лазерных установок сложно использовать для ФО ПС закрытых каналов.

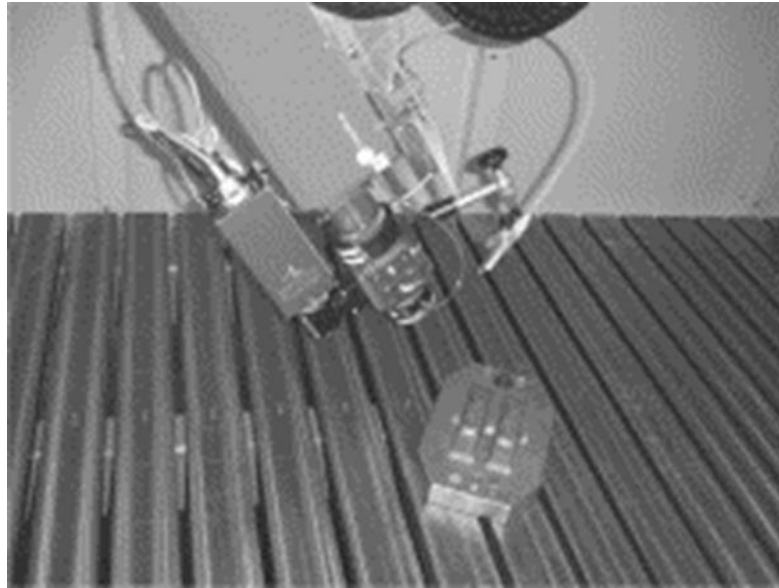


Рисунок 1.2 – Лазерная термическая обработка [17]

Вторая группа. Основным механизмом удаления материала с ПС при электрохимической обработке (ЭХО) является процесс анодного растворения заготовки [20]. ЭХО аэродинамических профилей лопаточных колес (рисунок 1.3) показала, что позволяет получать шероховатость таких поверхностей $Ra = 0,8...1,0$ мкм, при минимальном съеме материала [21]. Однако при этом конструкция колеса затрудняет доступ в межлопаточный канал и требует разработки специальной высокоточной оснастки для реализации процесса [22].

ЭХО не позволяет равномерно полировать поверхности сложной формы. Наблюдается явление растрыва. Технология сухого электрохимического шлифования и полирования *DryLyte* с помощью переноса ионов металла посредством свободных твердых тел (цеолитов) осложняется сложной формой деталей типа лопаток газотурбинного двигателя [23].

Третья группа. Метод (ЭПО) основан на электроразрядных явлениях в системе металл-электролит. При напряжении более 200 В вокруг детали (анода) при переходе от пузырькового кипения к пленочному образуется устойчивая тонкая (50 – 100 мкм) парогазовая оболочка, в которой протекает сложный комплекс физико-химических процессов [24].

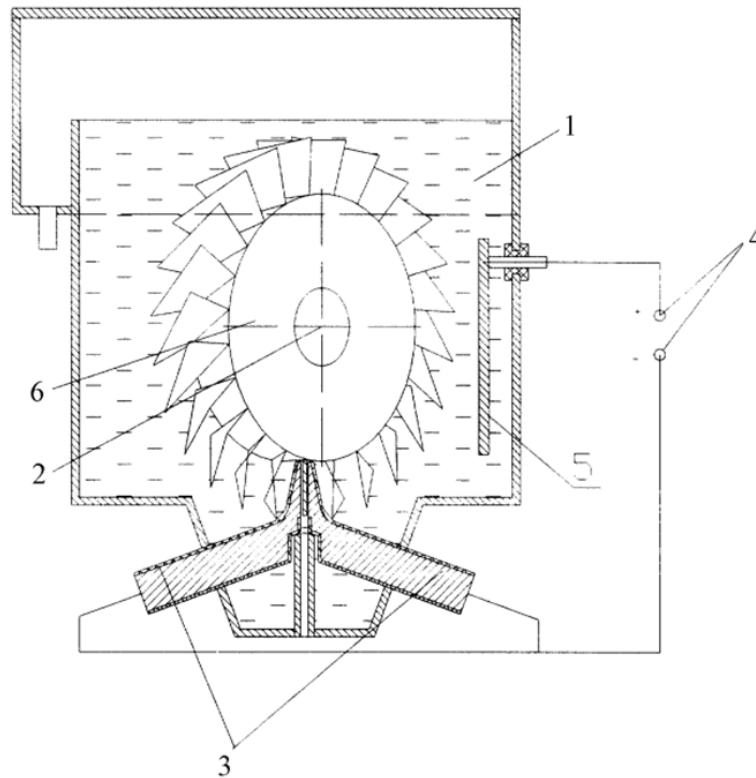


Рисунок 1.3 – Электрохимическая доводка аэродинамических профилей лопаточных колес [21]

Наряду с достоинствами данный метод имеет и недостатки. К ним можно отнести следующие: невозможность одномоментной обработки больших изделий, высокие температуры обработки, значительный расход электроэнергии, неравномерность обработки по профилю изделия. Струйная ЭПО обладает преимуществами по сравнению с обработкой изделий в ванне [25]. Она позволяет вести обработку криволинейных поверхностей открытых каналов. Однако доступ катодного модуля с магнетронной распылительной головкой в закрытые каналы затруднен.

ЭПО внутренних поверхностей изделий сложной формы проводят с использованием дополнительного переключаемого гибкого катода [26]. Этот способ может обеспечить лишь локальную полировку отдельного канала переменной формы. Схема устройства для ЭПО внутренних пространственно-сложных поверхностей различной кривизны (рисунок 1.4) [27] не позволяет дать оценку форме применяемого катода и его расположения в обрабатываемом канале.

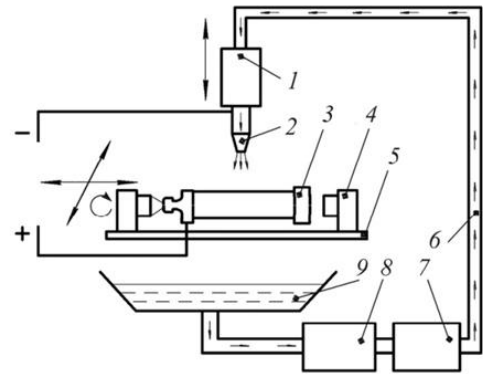
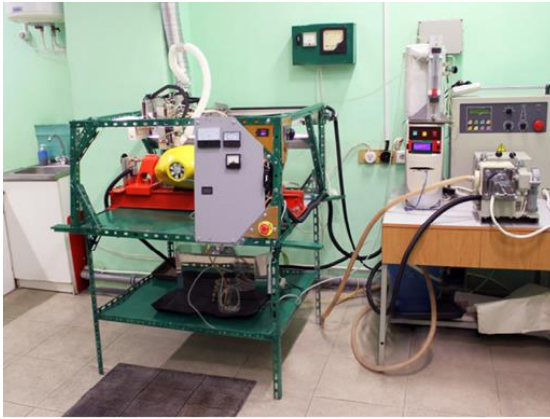


Рисунок 1.4 – Устройство и схема струйной электролитно-плазменной обработки [27]

Четвертая группа. Традиционное вибрационное полирование различными гранулами в установках разного типа показала свою эффективность в обработке наружных поверхностей [28, 29]. Обработка изделий сверхмелкими абразивными средами позволяет достигать высокого качества поверхности, но при этом процесс носит длительный характер [30].

Пятая группа. Обработка деталей в среде свободного абразива имеет богатые традиции [31, 32]. ФО деталей свободным абразивом в кавитирующей среде [33] позволяет вести полировку внутренней цилиндрической поверхности с достижением шероховатости $Ra = 0,48$ мкм. ПС материала получает дислокационное упрочнение, при котором возможно образование микротрещин [34]. При обработке СД типа колес турбин эффективной является камерная обработка уплотненными мелкодисперсными абразивными средами (рисунок 1.5) [35]. Однако в ЗК деталей типа крыльчатка сложно создать равномерный поток уплотненной среды.

Шестая группа. Для обработки крыльчатки предложен способ, когда ее погружают в жидкостно-абразивную среду, приводят во вращение и обеспечивают самопрокачку среды по каналам крыльчатки [36]. При этом наблюдается недостаточная интенсивность обработки, вызванная наличием противодействия в выходных участках каналов крыльчатки.

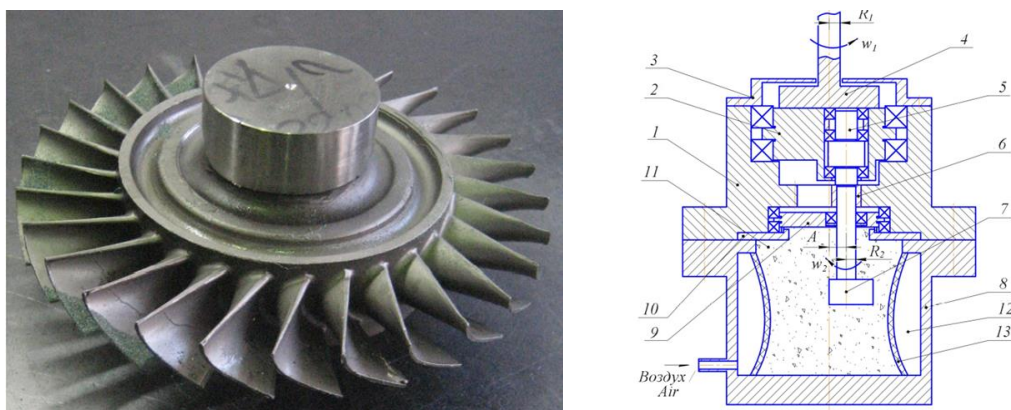


Рисунок 1.5 – Колесо турбины и схема ее камерной обработки уплотненными мелкодисперсными абразивными средами [35]

Этот недостаток устранен техническим решением, в котором входные участки каналов крыльчатки располагают на уровне, обеспечивающем их взаимодействие с обрабатываемой средой, а выходные участки – над ее уровнем (рисунок 1.6). Данный способ позволил провести обработку проточных каналов литой крыльчатки и обеспечить шероховатость $Ra = 0,6 \dots 1,8$ мкм [37].

Седьмая группа. Для отделочно-упрочняющей обработки каналов СД предложен ряд комбинированных способов. Одним из таких методов является струйно-динамическая обработка. Детали, расположенной внутри цилиндрического контейнера с гранулированной рабочей средой, во время обработки передаются колебания от платформы вибромашины. Под действием низкочастотных вибраций за счет периодических знакопеременных переворотов контейнера происходит возвратно-поступательное перемещение среды по межлопаточным каналам детали [38]. В ЗК этим методом сложно обеспечить равномерность обработки.

В ударно-импульсной обработке сужающихся криволинейных каналов (рисунок 1.7) шарики за счет импульсно-ударного механического воздействия создают стабильный микрорельеф без зон с микротрещинами и, совмещая упрочнение с электрохимическим воздействием, формируют заданную шероховатость по всем поверхностям лопатки [39].

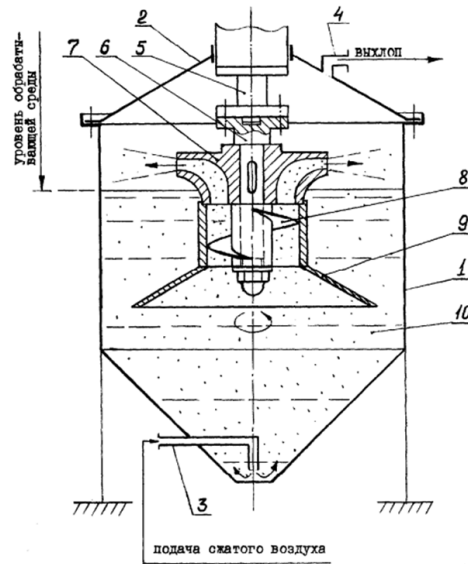


Рисунок 1.6 – Способ обработки поверхностей проточных каналов крыльчаток и устройство для его осуществления [37]

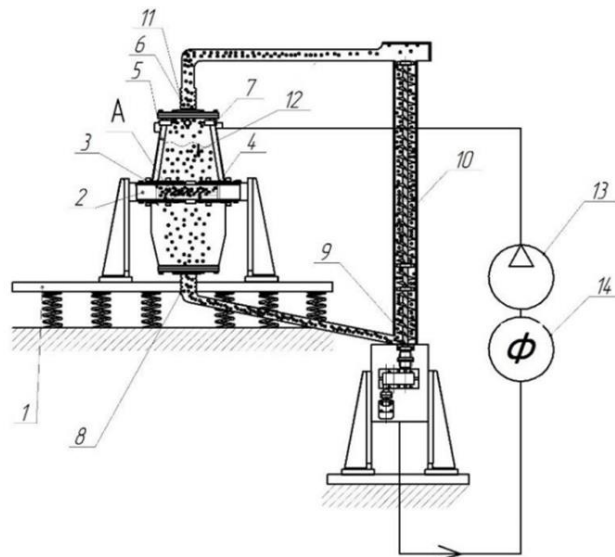


Рисунок 1.7 – Схема ударно-импульсной обработки сужающихся криволинейных каналов [39]

Восьмая группа. Обработка абразивным потоком. В нашей стране ОАП также известен как абразивно-экструзионная обработка или экструзионное хонингование. Механизм обработки этого способа заключается в сжимающем давлении на обрабатываемую поверхность при абразивном контакте с ней полутвердого, труднотекучего полимерного материала. Этот материал состоит из силиконовой среды, наполненной мелкодисперсными абразивными частицами. Эту среду называют рабочей средой. При течении поток РС

удерживает под давлением полимерный материал в ограниченном абразивном контакте с обрабатываемой поверхностью [27]. Данный метод дает возможность ФО ПС закрытых каналов СД и обеспечивает точность расхода компонентов топлива через эти каналы. ОАП обеспечивает повторяемость результатов обработки по обеспечению требуемой величины и равномерности шероховатости (Ra до 0,08 мкм). Однако при этом наблюдается неравномерность обработки, особенно на входных кромках, а также значительное время на обработку [3]. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Сравнительный анализ способов ФО закрытых каналов

Показатель	Технология						
	ЛТО	ВП	ОСА	ЭПО и ЭХО	ГАО	ОАП	СДО
Механизм удаления материала	ПН	МР, ПД	МР, ПД	АР, ИПО	МР, ПО	МР, ПО, ПД	ПО, ПД
Точность, мм	0,05	0,05	0,05	0,03	0,3	0,05	0,05
Шероховатость, Ra , мкм	0,6	0,08	0,08	0,02	0,2	0,08	0,2
Удельный съём, мг/см ² ·мин	0,5	нет данных	нет данных	нет данных	0,1	0,06	нет данных
Производительность, мм ³ /мин	20	10	10	50	100	75	100
Равномерность обработки закрытых каналов	нет	нет	нет	нет	нет	да	нет
Возможность использования одного инструмента для каналов любых сечений	нет	да	да	нет	да	да	да

где: механизмы удаления: МР – микрорезание; ПОМ – пластическое оттеснение материала; ПД – пластическая деформация; АР – анодное растворение; ПН – поверхностный нагрев; ИПО – испарение в парогазовой оболочке; виды технологических процессов: ЛТО – лазерная термическая обработка; ВП – вибрационное полирование; ОСА – обработка свободным абразивом в кавитирующей среде; ЭПО – электролитно-плазменная обработка; ЭХО – электрохимическая обработка; ГАО – гидроабразивная обработка; ОАП – обработка абразивным потоком; СДО – струйно-динамическая обработка .

Таким образом, проведенный сравнительный анализ показал, что требованиям целевой функции в установленных граничных условиях в наибольшей степени отвечает обработка абразивным потоком [40].

1.2 Основные проблемы обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей

В целом, по информации [41], к настоящему времени выделились четыре схемы процесса ОАП: двунаправленная ОАП сквозных каналов и наружных поверхностей в закрытых камерах (*two-way AFM*); однонаправленная ОАП сквозных каналов и наружных поверхностей в закрытых камерах (*one-way AFM*); ОАП несквозных полостей с наложением вибрации (*orbital AFM*); ОАП микроотверстий (*micro AFM*).

К настоящему времени в мире проведен достаточно большой объем экспериментальных и теоретических исследований в области ОАП. Так систематизация 99 зарубежных работ представлена в критическом обзоре прошлых исследований и достижений в процессе чистовой обработки абразивным потоком, однако специфика обработки закрытых каналов практически не затронута [42].

Первая открытая публикация в этой области в СССР появилась в 1980 году [43]. С тех пор за 40 лет в России появился ряд патентов и научных статей, посвященных процессу ОАП. Из четырех применяемых типов ОАП в России наибольшее распространение получила двунаправленная обработка абразивным потоком (*two-way AFM*). В нашей стране зарегистрировано более 30 авторских свидетельств и патентов на устройства, способы и составы рабочих сред для обработки абразивным потоком (абразивной массой, абразивно-экструзионной обработки и других названий этой технологии) [44].

Для ОАП деталей из труднообрабатываемых материалов применяют высоковязкие РС. Начиная с 80-х годов прошлого века этот метод применяется

и для полирования литых поверхностей лопаток, колес компрессора и рабочих колес [45]. Например, в процессе ОАП неподвижного лопаточного венца (кольца) из легированной стали удалось обеспечить шероховатость поверхности $Ra = 0,33$ мкм [46].

В предыдущей главе было отмечено, что обработкой абразивным потоком удалось обеспечить требуемую шероховатость ПС закрытых каналов СД, но не по всей длине канала и с низкой производительностью процесса [3].

Эта неравномерность связана с изменением направления потока высоковязкой РС и перестройки его профиля при входе в закрытые каналы. Для ОАП деталей, имеющих наклонные или изогнутые в пространстве каналы, предложено использовать направляющий элемент (рисунок 1.8), образующий канал совместно с обрабатываемой поверхностью [8].

В этом способе устройство содержит рабочую камеру 1, образованную полостями цилиндров 2 и 3, с абразивной массой 4, в объеме которой устанавливается обрабатываемая деталь 5 с направляющими аппаратами 6 и 7. Деталь в сечении имеет лопатки, расположенные наклонно к основному движению абразивной массы. В зоне примыкания к каналу лопатки имеют угол наклона и форму идентичные детали. Количество каналов в НА, образованных лопатками, соответствует количеству каналов в детали. Деталь 5 с направляющими аппаратами 6 и 7 устанавливается в рабочую камеру 1, прижимается цилиндром 2 к цилиндру 3, и поршнями 8 и 9 абразивная масса 4 перепрессовывается через каналы.

При этом поток посредством наклонных в зоне примыкания лопаток 10 и 11 изменяет направление движения основного потока и входит в деталь 5 по касательной плоскости к обрабатываемой поверхности начального участка канала в детали. Это позволяет исключить образование застойных зон и отрыв потока струи. Такой способ позволил обеспечить более равномерную обработку и убрать необработанные участки на входе в канал длиной 8...10 мм [8].

Предложенный способ обработки получил развитие в других работах. Так в результате численного моделирования и экспериментальной обработки ОАП

12 открытых каналов диска (аналог стали 45), наклоненных под углом 45° , установлено, что применение направляющего элемента позволило уменьшить неравномерность обработки на входе с 29,6% практически до нуля [9].

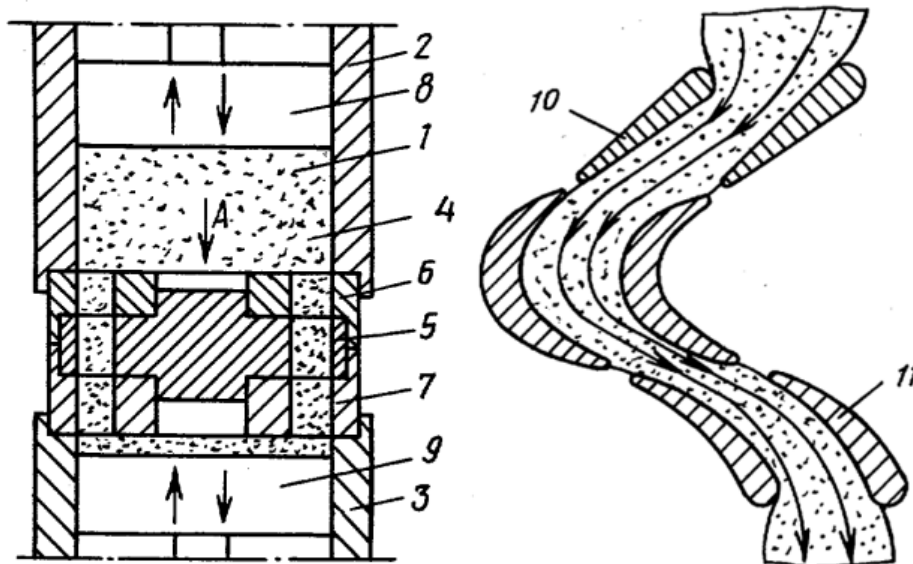


Рисунок 1.8 – Способ обработки деталей абразивной массой [8]

При моделировании процесса течения РС при ОАП применяют статистические методы обработки эмпирических данных, процедуры вычислительной гидродинамики, методов конечных и дискретных элементов, типовых структур нейронной сети и молекулярно-динамического моделирования. Однако достигнуть точного соответствия результатов моделирования с экспериментальными данными пока не удается [47]. Аналогичный вывод можно сделать и по результатам моделирования течения высоковязких РС при ОАП лопаток и межлопаточных каналов.

Так при имитационном моделировании скоростей съема материала и контроля точности профиля при *AFM* цельной лопатки ротора установлено, что прогнозируемая скорость сдвига вокруг профиля лопатки предполагает, что удаление материала будет неравномерным по всему профилю, а более высокий уровень съема металла будет на острие лопатки [4].

Обработка абразивным потоком набора из пяти металлических лопаток, изготовленных аддитивным способом (материал *Maraging Steel MS1 (EOS)*)

также выявила неравномерность обработки от 50 до 550 мкм вдоль лопатки. Полученная неравномерность обработки хорошо коррелируется с результатами моделирования распределения давления секущей плоскости в центре расчетной области (лопатки) и образования застойных зон (рисунок 1.9) [9].

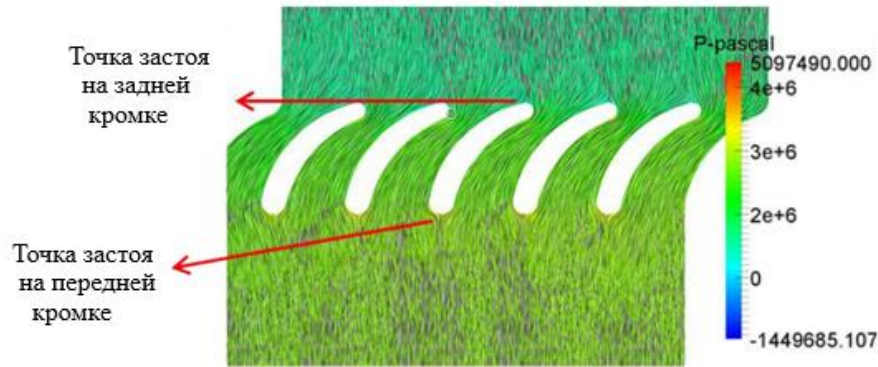


Рисунок 1.9 – Распределение давления рабочей среды в секущей плоскости в центре расчетной области (лопатки) [9]

Нами ранее проведены исследования обработки абразивным потоком ЗК крыльчатки. Анализ обработанной поверхности показал, что на ПС лопаток вследствие неправильного задания направления потоку имелись зоны с мало изменившейся шероховатостью начальной части лопатки. По внешнему кольцу детали имеются вкрапления и вмятины от воздействия абразива, съём металла был неравномерен по длине лопатки. В середине ЗК наблюдается большой съём металла, чем по краям. Это значит, что при изменении направления потока теряется его энергия, то есть давление при расширении потока по краям проема между лопатками уменьшается [48].

По результатам данного исследования было спроектирована и изготовлена специальная оснастка (рисунок 1.10) для установки и базирования заготовки (детали) на опытно-промышленной установке УЭШ-100 [48].

Эта оснастка использована для ОАП поверхностей лопаток в направляющем аппарате с целью определения возможности применения способа для уменьшения шероховатости лопаток отливок по выплавляемым моделям (с исходной шероховатости $Rz = 25 \dots 40$ мкм до $Ra = 3,2 \dots 10$ мкм) [49].

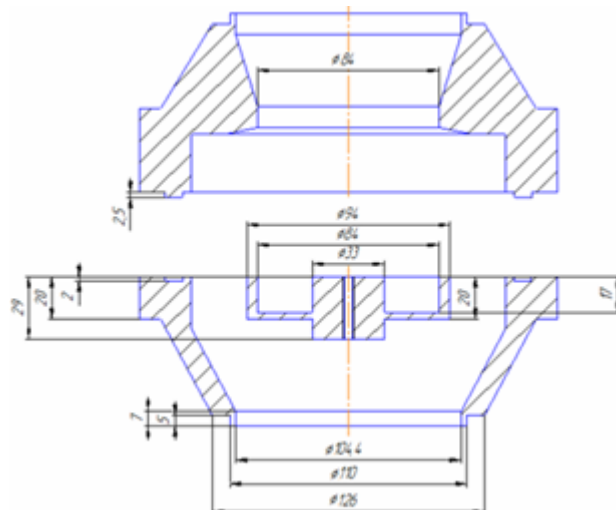


Рисунок 1.10 – Приспособление (технологическая оснастка) для установки и базирования заготовки (детали) на установке УЭШ-100 [48]

Обработка проводилась в два этапа. РС для первого этапа приготовлена на основе каучука синтетического диметилсилоксанового термостойкого СКТ (ГОСТ 14680–74, ТУ 38.103694–89) с добавлением 15 % фторопласта Ф-4 и 75 % карбид кремния черный 54С зернистостью F60; давление масла в системе – 12 МПа; количество циклов при обработке – 20; время одного цикла – 50 с. На втором этапе использовался электрокорунд белый 25А зернистостью F100 в концентрации 50 %; количество циклов при обработке – 30; время одного цикла – 40 с. После обработки шероховатость лопаток уменьшилась до $Ra = 3,2 \dots 10$ мкм после первого этапа до стабильного значения $Ra = 3,2$ мкм после второго без существенного изменения профиля лопатки [49].

Проведенные пробные исследования показали необходимость поэтапной обработки с подбором вида, необходимой зернистости и концентрации абразива на каждом этапе, а также учета герметичности и прочности закрепления заготовок в приспособлении для избегания попадания абразива в зону контакта деталь – приспособление и предотвращения повреждения поверхностей детали и приспособления. Особого внимания требует точность разработки конструкции и изготовления НА для увеличения равномерности обработки [49].

В качестве носителя в ОАП используются различные твердые частицы – абразивные зерна карбида кремния, электрокорунда, карбида бора, а также алмазы. Размеры частиц варьируются в диапазоне от 0,005 мм до 1,5 мм. Чем меньше величина требуемой шероховатости, тем меньше размер используемого для обработки зерна. Производительность обработки также имеет прямую зависимость от величины давления сдвига РС и ее вязкости (жесткости). Процентное содержание наполнителя в рабочей среде изменяется в пределах от 1 до 3 массовых единиц [45]. Вязкость среды играет важную роль в данной технологии. Для эффективной ОАП каналов деталей с различными размерами поперечных сечений и их длин состав сред варьируется за счет регулирования вязкости полимерной основы РС, размеров АЗ и их весового содержания (таблица 1.2.) [45].

Именно высоковязкие РС эффективны при обработке труднообрабатываемых материалов (литейные стали аустенитно-мартенситного типа, молибденовые сплавы и др.). Это подтверждается целым рядом исследований. Так высоковязкими РС были успешно обработаны образцы из инконеля 718, полученные технологией *SLM* [50]. После *AFM* образцов из мартенситно-старееющей стали 300 обеспечено уменьшение шероховатости $Ra = 12...14$ мкм до $Ra = 2...4$ мкм [51, 52]. Обработка незакаленных и закаленных образцов из мартенситно-старееющей стали 300 средами различной вязкости (низкая, средняя, высокая) показала, что обработка высоковязкими рабочими средами имеет большую производительность [53].

Таблица 1.2 Варьирование вязкости рабочей среды [45]

Тип среды / Вязкость Размер канала, мм*	LV Low Viscosity Низкая вязкость	LMV Low/Medium Viscosity Низкая / средняя вязкость	MV Medium Viscosity Средняя вязкость	HMV High/Medium Viscosity Высокая / средняя вязкость	HV High Viscosity Высокая вязкость
Минимум	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4
Максимум	3,2	6,4	12,8	25,4	50,8

*Указанные размеры являются проходной шириной или диаметром, в предположении, что длина канала в два раза больше ширины.

Отмечено значительное улучшение шероховатости поверхности и появление сжимающих остаточных напряжений после ОАП внутренней поверхности канала образцов, полученных как технологией *SLM*, так и электроэрозионной обработкой [54].

В мировой практике основу РС составляют различные каучуки: полиборосилоксаны, силиконовые и метил-винил силиконовые каучуки, натуральные и стирол-бутадиеновые каучуки. В Российской Федерации качестве основы рабочей среды применяют диметилсилоксановые каучуки.

Процесс ОАП является сложным. При его реализации возникает целый ряд физических явлений, влияющих на качество и производительность обработки. Для внедрения ОАП в производство конкретных деталей необходимо провести достаточно большой объем экспериментальных исследований, связанных с определением оптимального состава РС и режимов ее перепрессовывания, обусловленных физико-механическими и геометрическими характеристиками обрабатываемых каналов [55].

К настоящему времени в моделировании процесса сложился ряд подходов. Так использование нейронных сетей дает возможность определения требуемых режимов обработки на основе экспериментальных данных без применения теоретических моделей обработки [56, 57]. Однако этот подход все же требует значительного объема опытной отработки данной технологии для конкретных деталей, особенно сложной формы.

Отмечено, что на процесс обработки, в частности, на величину сил резания при контакте АЗ и обрабатываемой поверхности, оказывают возникающие в потоке упругие и касательные напряжения. Однако точное определение их численных значений затруднено [58].

Другой подход в моделировании основан на применении данных, полученных при ОАП каналов с простыми геометрическими формами, для прогнозирования результатов процесса обработки каналов с более сложными формами [59]. При этом остается нерешенным вопрос выбора критерия подобия.

Так результаты моделирования скорости и статического давления потока в канале постоянного по форме круглого сечения применяется для каналов с иными формами поперечного сечения для установления взаимосвязи между режимами обработки и результатами обработки, такими как качество поверхности. Для того, чтобы применить модели процесса для любой произвольной геометрии, соответствующие корреляции сохраняются в технологической базе данных. В этом случае используется CFD-моделирование, которое учитывает наиболее распространенные ограничения, такие как рабочее давление, температура и учитывается вязкоупругое поведение среды. Однако при этом выявлены существенные различия результатов моделирования давления потока рабочей среды с экспериментальными данными [60]. Несовпадение результатов моделирования и экспериментальных исследований также влияют на точность расчета производительности процесса ОАП [61].

Известен ряд моделей, описывающих разные аспекты технологии ОАП. Так при исследовании параметров процесса, влияющих на силы резания в обработке абразивным потоком, установлено, что сила резания зерна (содержащая радиальную силу и осевую силу) наиболее чувствительна к технологическому параметру давления [62].

Установлено влияние изменения температуры РС на шероховатость обработанной поверхности. Для эффективной обработки температура рабочей среды должна быть ниже 40°C , а наиболее эффективная обработка достигается при температуре ниже 25°C [63]. Этот фактор был принят в качестве граничного условия при разработке методик создания технологического процесса ОАП.

В целом, проведенный обзор результатов исследований подтверждают мировую практику применения ОАП для обработки деталей из аэрокосмической и автомобильных отраслей [64, 65]. Однако существующие теоретические разработки в данной области не позволяют найти аналитическим способом комплексного решения по влиянию ряда технологических факторов ОАП на показатели качества и производительности обработки.

Еще одной из проблем обработки абразивным потоком ЗК является возникновение неравномерности обработки, обусловленной перестройкой профиля потока РС от круглого сечения рабочего цилиндра установки к профилям входных сечений каналов детали. При этом изменяется и направление потока рабочей среды. Единый поток разделяется на несколько потоков, число которых соответствует числу каналов детали.

При имитационном моделировании скоростей съема материала и контроля точности профиля при *AFM* цельной лопатки ротора на основе решения вязкой модели уравнения Навье-Стокса в системе COMSOL Multiphysics, установлено, что удаление материала будет неравномерным по всему профилю, а более высокий уровень съема металла будет на острие лопатки (рисунок 1.11) [4].

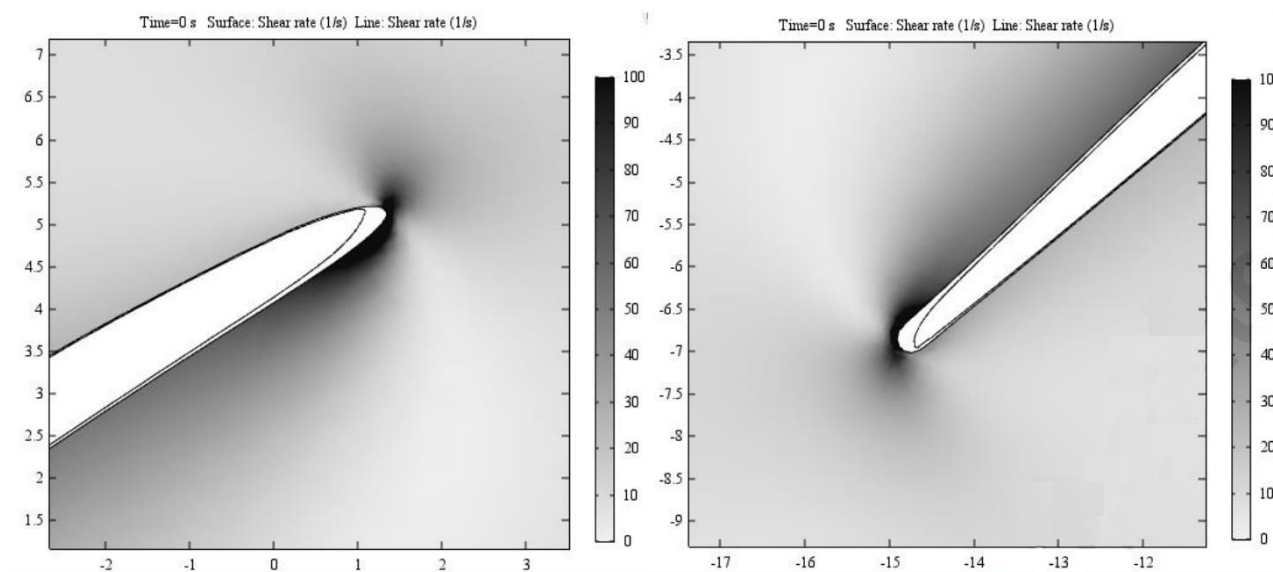


Рисунок 1.11 – Моделирование удаления материала при *AFM* лопатки [4]

ОАП набора из пяти металлических лопаток, изготовленных аддитивным способом (материал Maraging Steel MS1 (EOS)) средой средней вязкости (карбид кремния зернистостью 700 мкм) при давлении 10 МПа также выявила неравномерность обработки от 50 до 550 мкм вдоль профиля лопатки [6].

Наряду с численным моделированием процесса течения РС в закрытых каналах проведено несколько исследований по имитационному моделированию

процесса течения рабочей среды при ОАП в каналах и обтекания ей кромок лопаток. Это моделирование построено на визуальном исследовании процесса течения среды при *AFM* в имитаторах каналов с различным профилем поперечного сечения [7].

Имитационное моделирование течения РС как в обрабатываемых каналах, так и на их входах и выходах, подтвердило, что неравномерность обработки ПС закрытых каналов вызвано изменением профиля потока среды [66].

Применение методики обеспечения качества каналов деталей летательных аппаратов с использованием ОАП позволило обеспечить заданную точность расхода компонентов топлива через каналы деталей, имеющих большое количество лопаток, а также достичь требуемой шероховатости их ПС в диапазоне $Ra = 1,6...3,2$ мкм [67].

Данная методика построена на предположении, что для поддержания постоянного расхода и давления и среды на входе в каждый канал при обработке объем камеры с рабочей средой должен быть больше общего суммарного объема обрабатываемых каналов в $1,2...1,6$ раза [67].

В методике оценки точности, качества и эффективности ОАП деталей предложена последовательность выбора моделей течения РС в проточных каналах. При этом все пространство, образованное полостями рабочих цилиндров, приспособления и детали, разбивается на зоны (рисунок 1.12) [68].

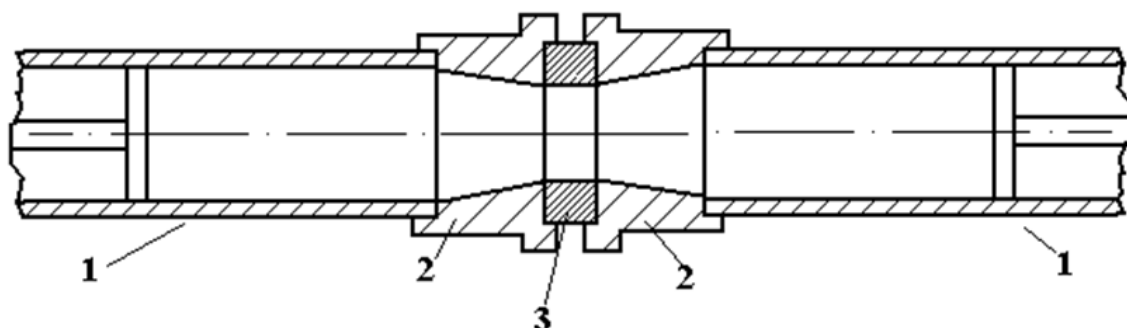


Рисунок 1.12 – Зоны течения при двунаправленной обработке абразивным потоком (абразивно-экструзионной обработки): 1 – рабочий канал; 2 – переходник; 3 – деталь [68]

При анализе зоны 2 (переходники для закрепления многоканальных деталей) для задания начальных условий для зоны 3 (каналы детали) необходимо дать оценку равномерности расхода среды во всех обрабатываемых каналах и рассмотреть перестройку профиля потока на входном отверстии каждого канала [68]. Однако эти рекомендации построены для обработки открытых каналов.

Для обеспечения равномерной обработки закрытых каналов СД с учетом специфики их геометрических особенностей и свойств материала необходимо дополнить существующие методики обеспечения качества каналов и оценки точности, качества и эффективности ОАП деталей.

Алгоритм общей методики оценки точности, качества и эффективности обработки абразивным потоком деталей (таблица 1.3) описывает все действия по разработке технологического процесса ОАП любых деталей [10].

Детализировка шагов первого этапа (таблица 1.4) уточняет последовательность выбора моделей течения РС этапа 1 общей модели. На втором этапе окончательно определяется состав РС исходя из ряда показателей геометрии закрытых каналов и структуры поверхностного слоя детали [10].

Выбор состава среды также ведется по эмпирическим зависимостям таких характеристик РС, как коэффициент Пуассона и модуль Юнга от величины абразивного наполнителя и его весового содержания в среде [69, 70]. Расчеты на этапах 3, 4 и 5 проводят на основе модели контактных взаимодействий [71, 72].

Таблица 1.3 Методика оценки точности, качества и эффективности обработки абразивным потоком деталей [10]

Этап	Содержание
1	Выбор модели для предварительного расчета расходно-напорных характеристик потока рабочей среды
2	Выбор требуемого состава рабочей среды как абразивного инструмента
3	Расчеты фактической площади контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью, величины и направления сил, возникающих при контакте, а также размерности сближения контактирующих тел в базовом канале круглого сечения
4	Расчет шероховатости обработанной поверхности и производительности обработки выбранной рабочей средой в базовом канале
5	Уточнение расчетов из этапа 4 в исследуемом канале с учетом расходно-напорных характеристик потока рабочей среды
6	Верификация расчетов и экспериментальная отработка технологии <i>AFM</i> на образцах

Таблица 1.4 Последовательность выбора моделей течения рабочей среды этапа 1 общей модели [10]

Шаг	Содержание
1. Выбор вида <i>AFM</i>	Характеристика обрабатываемых каналов
2. Деление на зоны течения	Для двунаправленной <i>AFM</i> – 3 или 4 зоны в зависимости от конфигурации входных и выходных отверстий
3. Зона 1. Рабочий цилиндр установки	Модель течения в круглом прямом канале. Зона начального осесимметричного и установившегося течения. Начальные условия задаются на штоке.
4. Зона 2. Переходники для крепления одноканальных деталей	Модель течения в диффузоре/конфузоре. Зона перестройки профиля потока от круглого к профилю обрабатываемого канала. Начальные условия находятся из решения течения в зоне 1. Решение течения в зоне 2 задает начальные условия зоны 3
5. Зона 2. Переходники для крепления многоканальных деталей	Модель течения в диффузоре/конфузоре и/или кольцевом канале. Начальные условия находятся из решения течения в зоне 1. При задании начальных условий для зоны 3 необходимо дать оценку равномерности расхода рабочей среды во всех обрабатываемых каналах и рассмотреть перестройку профиля потока на входном отверстии каждого канала
6. Зона 3. Каналы детали	Модели течения для различных каналов
7. Зона 2. Влияние переходников на процесс истекания потока из каналов детали	Для деталей с проточными каналами с одинаковым количеством входных и выходных отверстий модели течения являются обратно симметричными во входных зонах 2.
8. Зона 1. Рабочий цилиндр установки	Модель течения в круглом прямом канале. Расчет является проверочным

Однако при разработке технологического процесса ОАП закрытых каналов СД есть ряд особенностей, которые требуют уточнения рассмотренной выше общей методики. Данное уточнение позволит существенно уменьшить объем экспериментальных исследований при внедрении данной технологии для конкретной номенклатуры деталей с закрытыми каналами.

Дискуссионным остается вопрос погрешности базирования и закрепления детали в приспособлении и уточнения величины зазора между направляющим аппаратом и обрабатываемой деталью, а также выбора эффективного объема РС. Отсутствует информация о процессах создания направляющих аппаратов как элементов технологической оснастки для ОАП.

1.3 Выводы по главе, постановка цели и задач исследований

Проведенный анализ современного уровня технологий ФО закрытых каналов СД показал, что их можно классифицировать на восемь условных групп со некоторыми комбинациями. Из всех технологий в мировой практике технология ОАП находит всё большее применение. Однако ряд проблем, присущих данной технологии, ограничивает ее технологические возможности по обеспечению равномерной шероховатости поверхности ЗК сложнопрофильных деталей и снижают производительность обработки литых заготовок из аустенитно-мартенситных сталей.

Основной проблемой является неравномерность обработки на входной и выходной кромке закрытого канала по сравнению с основной поверхностью канала. Эта неравномерность подтверждена экспериментальными исследованиями и моделированием процесса ОАП.

Моделирование процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей с учетом особенностей расчета характеристик потока рабочей среды высокой вязкости и контактных взаимодействий при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов позволит требования к усовершенствованию существующей методике разработки технологического процесса.

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 направляющего аппарата его лопатки примыкают к поверхностям лопаток заготовки с определенным зазором, величина которого определяет степень упругого восстановления потока и перестройке его профиля. Не дана оценка влияния погрешности базирования и закрепления детали в приспособлении, а также выбора эффективного объема рабочей среды. Требуется создание нового способа ОАП с применением направляющего аппарата, обеспечивающего

равномерную обработку всей внутренней поверхности 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.

Экспериментальное определение зависимости предела текучести и изменения условий сдвига РС от их состава, влияния зернистости и углов при вершине единичного абразивного зерна на процесс обработки позволит уточнить условия контактных взаимодействий абразивных зерен с микронеровностями поверхности каналов литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей.

Экспериментальные исследования обработки абразивным потоком рабочей средой высокой вязкости литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей позволят установить регрессионные зависимости производительности, шероховатости и твердости поверхности от режимов обработки.

Отработка усовершенствованного технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчаток из аустенитно-мартенситных сталей обеспечит уменьшение шероховатости и увеличение твердости поверхности проточной части всех закрытых каналов от исходной (литьевая корка) до полированной.

Определение зависимостей напора и КПД насоса ТНА от величины шероховатости проточной части закрытых каналов крыльчатки по результатам расчета и конечно-элементного моделирования позволит более точно обосновать необходимость ФО этих каналов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

Моделирование процесса обработки абразивным потоком ЗК сложнопрофильных деталей с учетом особенностей расчета характеристик потока рабочей среды высокой вязкости и особенностей контактных взаимодействий при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов дает возможность сформировать требования по совершенствованию как существующей методики разработки ТП, так и технологии ОАП в целом. Результатом этого является новый способ ОАП межлопаточных закрытых каналов крыльчаток с применением направляющего аппарата и алгоритм усовершенствованной методики.

2.1 Теоретические основы обработки абразивным потоком

В области создания теоретических основ процесса ОАП существует несколько подходов. Так применяют процедуры вычислительной гидродинамики [73-75], статистические методы обработки эмпирических данных [11, 76-78], методы конечных и дискретных элементов каналов простой формы [79, 80] и типовых структур нейронной сети [81-83]. Однако достигнуть точного соответствия результатов моделирования с экспериментальными данными пока не удастся [75]. Аналогичный вывод можно сделать и по результатам моделирования течения рабочих сред при ОАП лопаток и межлопаточных каналов [4, 5, 47].

В настоящее время все большее применение в моделировании процесса ОАП находит подход в области реологии неньютоновских сред [84, 85]. Результатом такого моделирования было решение локальных задач по определению численных значений ряда факторов обработки.

Известно, что неньютоновские жидкости разделяются на тиксотропные и дилатантные. При определенных факторах ОАП поток РС показывает

нелинейное и зависящее от времени сдвига реотропное поведение, проявляющее поведение в виде утолщения при сдвиге при низкой скорости сдвига и поведение в виде утончения при сдвиге при более высоких скоростях сдвига [86]. Отмечено, что вязкость среды уменьшается с увеличением скорости сдвига и напряжения сдвига на стенке, а повышение концентрации абразивных зерен увеличивает вязкость среды [87].

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 [88].

Следующим шагом в развитии моделирования потока РС при ОАП стало применение конечно-элементного моделирования на базе уравнений течения неньютоновских сред. Оно позволило получить картину распределения скорости и давления потока РС в каналах простой формы [58, 61]. Применение подобного подхода для моделирования процесса течения сред высокой вязкости выявило достаточно серьезные расхождения расчетных и экспериментальных данных [79, 80]. Такое расхождение обусловлено тем, что поток РС является не просто неньютоновской средой, а представляет собой наполненную твердыми частицами суспензию на основе высокомолекулярной жидкости.

Величина частиц наполнителя и степень их содержания в РС существенно влияет на такие показатели РС как величина напряжения сдвига τ_0 , величина начальной вязкости η_0 и начальный коэффициент нормальных напряжений ξ_0 [60, 88]. Отмечено, что на процесс ОАП, в частности, на величину сил резания при контакте абразивного зерна и обрабатываемой поверхности, оказывают возникающие в потоке упругие и касательные напряжения. Однако точное определение их численных значений затруднено [58].

Известен ряд моделей, описывающих разные аспекты ОАП. Так при исследовании параметров процесса, влияющих на силы резания при ОАП, установлено, что сила резания зерна (содержащая радиальную силу и осевую силу) наиболее чувствительна к технологическому параметру давления [62].

Закрытые каналы имеют сложную форму поперечного сечения, что обуславливает невозможность получения точных решений по скорости и давлению потока ньютоновских и неньютоновских сред на основе дифференциальных решений второго и более высоких порядков. Поэтому существует практика применения данных, полученных при ОАП каналов с простыми геометрическими формами, для прогнозирования результатов процесса обработки каналов с более сложными формами [59]. При этом остается нерешенным вопрос выбора критерия подобия.

На равномерность ОАП большое влияние оказывает форма поперечного сечения обрабатываемых каналов и ее постоянство по длине канала, а также наличие местных сопротивлений, влияющих на перестройку профиля потока. [5, 7, 59]. Так результаты моделирования скорости и статического давления потока в канале постоянного по форме круглого сечения применяется для каналов с иными формами поперечного сечения для установления взаимосвязи между режимами обработки и результатами обработки, такими как качество поверхности. Для того, чтобы применить модели процесса для любой произвольной геометрии, соответствующие корреляции сохраняются в технологической базе данных. В этом случае используется CFD-моделирование, которое учитывает наиболее распространенные ограничения, такие как рабочее давление, температура и учитывается вязкоупругое поведение среды. Однако при этом выявлены существенные различия результатов моделирования давления потока рабочей среды с экспериментальными данными [60].

Для расчета численных значений скорости и давления АЗ по длине канала в полученные результаты моделирования на основе течения вязкоупругой РС необходимо вводить поправки, учитывающие влияние структуры наполнителя. Визуальные исследования процесса ОАП каналов различного сечения выявили в линии тока РС совокупность абразивных зерен в виде цепочки. Такую цепочку можно представить в виде структуры, состоящей из последовательно соединенных одинаковых элементов. Каждый элемент деформируется независимо от остальных, а условие неразрывности цепочки обеспечивается

соединением сегментов вязкоупругой среды в шариках, моделирующих абразивные частицы. При этом численные значения скорости и давления потока зависят от степени и характера деформации потока РС, которая в свою очередь определяется градиентом скорости потока на стенке канала и внешним трением абразивного зерна и обрабатываемой поверхности [68, 89].

Именно этот подход будет использован для теоретического обоснования процесса ОАП закрытых каналов СД.

2.1.1 Особенности расчета характеристик потока рабочей среды высокой вязкости

В пункте 1.2 отмечено, что вязкость РС, наряду с давлением сдвига, является основным фактором в производительности ОАП. Для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, к которым относятся литейные стали аустенитно-мартенситного типа применяются высоковязкие рабочие среды. Вязкость РС зависит от исходной вязкости полимерной основы, а также вида и степени наполнения твердыми частицами, т.е. структуры рабочей среды.

Известно [42], что при выборе структуры РС ориентируются на ряд требований. По своему составу это должна быть способная к релаксации вязкоупругая и неньютоновская жидкость с очень высоким коэффициентом восстановления, способная по давлению проявлять упругие свойства твердого тела. Вязкие свойства РС должны обеспечивать ей возможность копировать любую форму обрабатываемого канала и осуществлять течение через каналы с небольшой площадью поперечного сечения. Возникающие в потоке рабочей касательные и нормальные напряжения должны обеспечивать необходимую силу воздействия абразивных частиц на обрабатываемую поверхность, а состав РС должен быть инертным к физиологическим жидкостям.

Известна степень влияния наполнении абразивом K_a , величины V_a абразивных зерен и входного давления $P_{вх}$ на вязкие, упругие и пластичные свойства среды [70]. С возрастанием $P_{вх}$ и содержания абразива в среде K_a среды коэффициенты η увеличиваются. Это обусловлено тем, что при увеличении

скорости сдвига более интенсивно разрушается пространственная структура среды. При этом эффективная вязкость, касательные и нормальные напряжения становятся больше [70].

В случае моделирования потока РС как набора цепочек, можно принять вязкоупругие свойства всех сегментов цепочки подобными. В этом случае их поведение может быть описано при помощи различных моделей. Так полная деформация сегмента γ является суммой мгновенно-упругой γ_0 , запаздывающей (высокоэластической) γ_e и пластической (вязкого течения) γ_f деформаций – $\gamma = \gamma_0 + \gamma_e + \gamma_f$.

Данный вид деформации можно представить с помощью известной модели Бургерса–Френкеля (рисунок 2.1) [90]. Смещение каждого элемента моделирует относительную деформацию, а необходимая для данной деформации сила отвечает напряжению. Каждая компонента деформации в данной модели связана с напряжением линейно:

$$\gamma_0 = \tau / G_0; \eta_1 \gamma_e' + G \gamma_e = \tau; \gamma_f' = \tau / \eta.$$

где τ – касательные напряжения; G_0 – модуль мгновенно-упругой деформации; G – модуль упругости при сдвиге; η – вязкость окружающей среды; η_1 – вязкость цепочки.

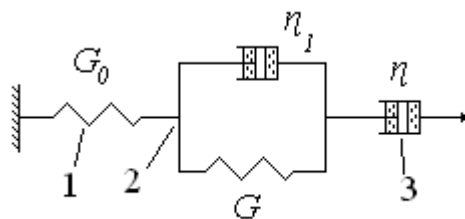


Рисунок 2.1 - Модель Бургерса–Френкеля: 1 – пружина, моделирующая мгновенно-упругую деформацию; 2 – элемент из параллельно соединенных пружины и демпфера, моделирующий запаздывающую деформацию; 3 – демпфер, моделирующий вязкое сопротивление деформированию [90]

Разделение цепочки на сегменты условно и должно в дальнейшем быть подтверждено экспериментальными данными. В связи с этим предположением для описания режимов деформирования РС при ОАП возможно применить

некоторые варианты преобразованной модели Каргина–Слонимского–Рауза (КСР), показанной на рисунке 2.2. Преобразование модели заключается в изменении схемы нагружения. В модели КСР один конец цепочки закреплен, а ко второму приложена растягивающая внешняя сила $F(t)$. В рассматриваемой модели внешняя сила приложена к одному концу, а второй конец свободно перемещается в некоторой среде.

Вязкое сопротивление перемещению демпфера соответствует взаимодействию цепочки с окружающей средой, которая препятствует ее перемещению относительно потока среды и других цепочек. Такое взаимодействие характерно и для случая ОАП и соответствует модели, на рисунке 2.2, а. Известно, что для всех вязкоупругих систем модуль мгновенно-упругой деформации G_0 гораздо больше, чем модуль G , связанный с высокоэластическими деформациями. В этом случае модель КСР для случая ОАП тоже может быть упрощена к виду, показанному на рисунке 2.2, б [68].

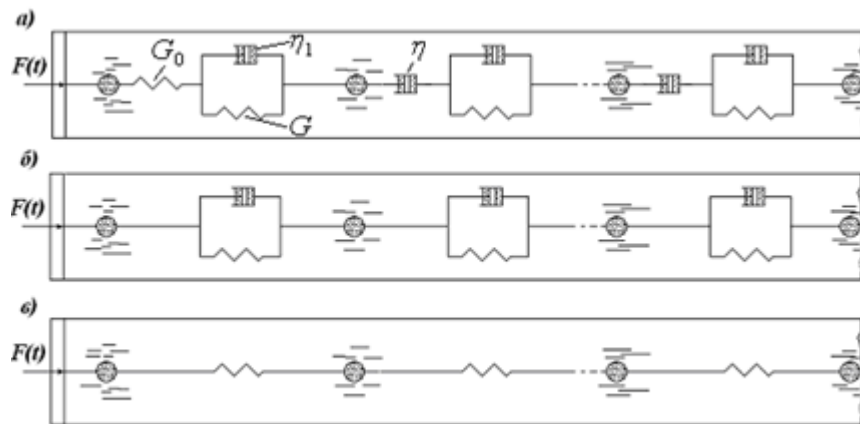


Рисунок 2.2 - Модель Каргина–Слонимского–Рауза: а) полная модель с учетом мгновенно-упругой деформации и внутренней вязкости; б) модель без учета мгновенной деформации; в) модель без учета внутренней вязкости [68]

Элементы этих двух моделей описывают запаздывающую деформацию, связанную с несовершенной упругостью образовавшейся цепочки. Обусловленная этим диссипация энергии характеризует внутреннюю вязкость самой цепочки. Если пренебречь сопротивлением деформированию, обусловленной внутренней вязкостью цепи по сравнению с эффектом ее

взаимодействия с окружающей средой, то можно получить еще более простую модель, приведенную на рисунке 2.2, в. Данные модели являются одномерными и могут передать особенность поведения проекции цепочки, расположенной на центральной оси потока, на выбранное направление в пространстве [68].

При начале процесса экструзии к одному из концов цепочки посредством поршня прикладывается внешняя сила $F(t)$. При этом в среде возникает сопротивление движению i -того шарика, равное произведению вязкости среды η на скорость движения шарика, т.е. $\eta(du_i/dt)$. Усилие, действующее на пружину с модулем G , можно выразить как произведение G на разность координат концов пружины, которая представляет собой величину относительной деформации (сжатия) пружины. Усилие, действующее на демпфер с вязкостью η_1 , зависит от разности скоростей смещения шариков, окружающих этот демпфер. Тогда, условия равновесия первого шарика, находящегося на свободной поверхности среды, можно записать как [68]

$$\eta \frac{du_1}{dt} + \eta_1 \left(\frac{du_1}{dt} - \frac{du_2}{dt} \right) - G(u_1 - u_2) = 0. \quad (2.1)$$

Условия равновесия i -того шарика зависят от окружающей среды и двух пар демпфер – пружина

$$\eta \frac{du_i}{dt} + \eta_1 \left[\left(\frac{du_i}{dt} - \frac{du_{i+1}}{dt} \right) - \left(\frac{du_{i-1}}{dt} - \frac{du_i}{dt} \right) \right] - G[(u_i - u_{i+1}) - (u_{i-1} - u_i)] = 0. \quad (2.2)$$

Последний $(n+1)$ -й шарик испытывает влияние окружающей среды, одной пары демпфер – пружина и внешней силы

$$\eta \frac{du_{n+1}}{dt} + \eta_1 \left(\frac{du_{n+1}}{dt} - \frac{du_n}{dt} \right) - G(u_{n+1} - u_n) = F(t). \quad (2.3)$$

Система уравнений (2.1) ... (2.3) определяет зависимость движения цепочки на оси канала под действием заданной силы. В упрощенном варианте модели $\eta_1 = 0$. Известна форма записи i -того уравнения данной системы, которое получено вычитанием из каждого уравнения последующего уравнения за исключением последнего

$$\eta \frac{d(u_i - u_{i+1})}{dt} + \eta_1 \left[2 \frac{d(u_i - u_{i+1})}{dt} - \frac{d(u_i - u_{i+2})}{dt} - \frac{d(u_{i-1} - u_i)}{dt} \right] - G[2(u_i - u_{i+1}) - (u_{i+1} - u_{i+2}) - (u_{i-1} - u_i)] = 0. \quad (2.4)$$

В нормальных координатах $y_i = u_i - u_{i+1}$ система уравнений (2.1)...(2.3) принимает вид

$$\begin{cases} \eta \frac{y_1}{dt} + \eta_1 \left(2 \frac{y_1}{dt} - \frac{y_2}{dt} \right) - G(2y_1 - y_2) = 0 \\ \eta \frac{y_i}{dt} + \eta_1 \left(2 \frac{y_i}{dt} - \frac{y_{i+1}}{dt} - \frac{y_{i-1}}{dt} \right) - G(2y_i - y_{i+1} - y_{i-1}) = 0 \\ \eta \frac{y_n}{dt} + \eta_1 \left(2 \frac{y_n}{dt} - \frac{y_{n-1}}{dt} \right) - G(2y_n - y_{n-1}) = F(t) \end{cases} \quad (2.5)$$

Записанные n линейных дифференциальных уравнений первого порядка образуют систему относительно n неизвестных функций y_i . Решение такой однородной системы (без правой части) известно [68]

$$y_i = \sum_{\mu=1}^n C_{\mu i} e^{-s_{\mu} t}, \quad (2.6)$$

где $C_{\mu i}$ и s_{μ} – подлежащие определению константы.

Известны значения s_{μ} при $\eta_1 \neq 0$ и $\eta_1 = 0$, выраженные как

$$s_{\mu} = \frac{4G \left[\sin \frac{\mu\pi}{2(n+1)} \right]^2}{\eta + 4\eta_1 \left[\sin \frac{\mu\pi}{2(n+1)} \right]^2} \text{ и } s_{\mu} = \frac{4G}{\eta} \left[\sin \frac{\mu\pi}{2(n+1)} \right]^2 \quad (2.7)$$

Для рассматриваемого случая установившегося движения по центральной оси потока при ОАП представляет интерес временная зависимость смещения конца цепочки, т.е. $(n+1)$ -й шарика при постоянной действующей силе $F(t) = F_0 = \text{const}$, которая записана в виде

$$u_{n+1}(t) = \frac{F_0 t}{\eta(n+1)} - F_0 \sum_{\mu=1}^n B_{\mu} (1 - e^{-t/\lambda_{\mu}}). \quad (2.8)$$

Структура величин $\lambda_{\mu} = s_{\mu}^{-1}$ и B_{μ} для упрощенного варианта модели, показанного на рисунке 2.2, в:

$$\lambda_{\mu} = \frac{\eta}{4G} \left[\sin \frac{\mu\pi}{2(n+1)} \right]^{-2} \text{ и } B_{\mu} = \frac{1}{2G(n+1)} \left[\text{ctg} \frac{\mu\pi}{2(n+1)} \right]^2. \quad (2.9)$$

Полное смещение складывается из линейно зависящего от времени первого члена формулы (2.6) и суммы членов, зависящих от времени экспоненциально.

Необратимое течение соответствует пластическому деформированию среды и смещению центра тяжести цепочки. При установившемся режиме необратимые деформации неограниченно увеличиваются во времени, т.е. реализуется процесс сдвигового течения.

Движение конца цепи относительно центра тяжести соответствует упругой деформации, а константы λ_{μ} являются временами запаздывания системы. Упругие деформации также увеличиваются, но, приближаясь к некоторому асимптотическому значению $u_e(\infty)$.

Основной задачей по выбору состава высоковязкой РС является обеспечение такого сочетания ее вязкоупругих свойств, которое бы позволило создать с одной стороны, требуемые расходно-напорные характеристики потока в обрабатываемом канале, а с другой стороны - максимально возможные усилия при контакте абразивное зерно (АЗ) – обрабатываемая поверхность [68].

Из четырех констант материала, характеризующих упругие свойства РС, на основе стандартных методик [68] проще и точнее экспериментально определить величины модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ . Далее через эти константы можно установить величину модуля упругости при сдвиге $G = E / 2(1 + \mu)$.

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (2.10)$$

Количество шариков n в цепочке и длина сегмента цепочки зависят от степени наполнения среды твердыми частицами и протяженности потока РС в обрабатываемом канале. Величина эффективной вязкости РС определяется по методике [68].

При анализе режима поведения цепочки, деформирующейся вдоль центральной оси канала, не учитывались пространственные эффекты, возникающие из-за значительных поперечных размеров цепочки.

При плоской схеме в силу размеров шарика 1 (рисунок 2.3), моделирующего АЗ с сольватной оболочкой, модель цепочки должна учитывать градиент скорости сдвига потока на ее верхней 2 и нижней границах 3. Величина сольватной оболочки формирует поперечные размеры линии тока [68].

Для расчета цепочки, деформирующейся вдоль центральной оси потока, где отсутствует градиент скорости сдвига, достаточно применения уравнений (2.1) ... (2.3). Для расчета цепочек, деформирующихся в зоне с существенным градиентом скорости сдвига, необходимо учитывать пространственные эффекты, возникающие при простом сдвиге в упругом теле (рисунок 2.4.)

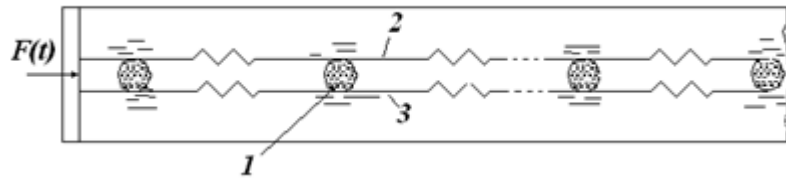


Рисунок 2.3 - Модель плоской вязкоупругой цепочки при ОАП, учитывающей ее размеры и разность скоростей потока рабочей среды [68]

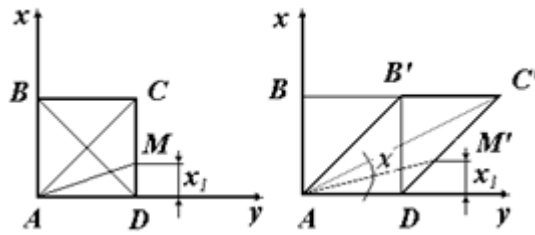


Рисунок 2.4 - Схема простого сдвига в сегменте цепочки (на стенке) [68]

Выделен некоторый объем РС, заключенный в единичном сегменте цепочки между двумя соседними шариками. При установившемся течении размеры линии тока не изменяются. Принимается то, что и расстояние между центрами шариков остается постоянным y_i . Тогда вследствие деформации, вызванной градиентом скорости сдвига, диагональ AC удлинится до AC' , а отрезок AM , отстоящий от оси y на расстоянии x' , удлинится до отрезка AM' . Величина сдвига $\gamma = BB'$ равна градиенту скорости сдвига. Тогда относительная деформация ε произвольного отрезка AM [68]

$$\varepsilon = \frac{AM'}{AM} = \left[\frac{(1 + \gamma x_1)^2 + x_1^2}{1 + x_1^2} \right]^{0,5} \quad (2.11)$$

Максимальное значение относительной деформации ε соответствует удлинению рассматриваемой диагонали AC до AC' , при котором возникает главное напряжение σ_1 . В перпендикулярном ей направлении возникает главное напряжение σ_2 , вызванное изменением BD до BD' . Угол χ находится между линией действия главного напряжения σ_1 и направлением сдвига. Касательные

напряжения на площадках, ориентированных к направлению сдвига под углом χ равны нулю, что позволяет для выделенного объема записать все компоненты действующих напряжений

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \sigma_1 \cos^2 \chi + \sigma_2 \sin^2 \chi; \\ \sigma_{22} &= \sigma_1 \sin^2 \chi + \sigma_2 \cos^2 \chi; \\ \tau = \sigma_{12} &= -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\chi; \\ \sigma &= \sigma_{11} - \sigma_{22} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\chi.\end{aligned}\tag{2.12}$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Из соотношений (2.12) видно, что в случае $\sigma_1 - \sigma_2 \neq 0$ всегда возникают нормальные напряжения. Соотношение между касательными и нормальными напряжениями выражается через угол χ как $\sigma/2\tau = \operatorname{ctg} 2\chi$, а тангенс угла χ при ориентации главных напряжений вдоль и перпендикулярно диагонали AC' (рисунок 2.4), находится как $\operatorname{tg} \chi = (1 + \gamma)^{-1}$. Тогда на основании вышеназванного соотношения между напряжениями и схемы простого сдвига в сегменте можно записать [68]

$$\sigma/2\tau = \operatorname{ctg} 2\chi = (2 + \gamma)\gamma/2(1 + \gamma)\tag{2.13}$$

В данных расчетах не учитывается влияние вращения абразивной частицы и ее сольватной оболочки на напряженно-деформированное состояние среды. Из рассмотрения модели статистического макромолекулярного клубка в гидродинамическом поле (модель Бики), можно принять, что в сдвиговом потоке с градиентом скорости γ' АЗ и сольватная оболочка будут вращаться с угловой скоростью, в среднем равной $\gamma'/2$.

При известных значениях коэффициента эффективной вязкости среды η , градиента скорости сдвига потока, модуля упругости при сдвиге G , длины сегмента цепочки и размера сольватной оболочки на основании предложенной

модели возможен приближенный расчет напряженно-деформированного состояния потока наполненной вязкоупругой среды при установившемся течении на стенке в тонком осесимметричном канале большой длины. В таких каналах влиянием формы поперечного сечения на поток можно пренебречь и свести картину течения от объемного к плоскому состоянию [89].

В первоначальный момент приложения нагрузки $F(t)$ при $\eta_1 = 0$ в цепочке происходит последовательная упругая деформация сегментов и условия равновесия первого шарика, i -того шарика и $(n+1)$ -й шарика различны и $y_1 < y_i < y_n$. По цепочке проходит волновой процесс сжатия сегментов до величины, зависящей от длины и диаметра сегмента, а также от модуля упругости при сдвиге G . При этом увеличивается диаметр сегмента цепочки, что ведет к возникновению упругих взаимодействий между соседними цепочками, которые начинают препятствовать процессу сжатия сегмента [68].

При установившемся режиме сдвигового течения скорости движения всех шариков (du_i/dt) одинаковы, времена запаздывания системы λ_μ достигают своих максимальных значений, упругие деформации приближаются к асимптотическому значению $u_e(\infty)$. Тогда и условия равновесия для всех сегментов цепочки подобны и $y_1 = y_i = y_n$, т.е. не зависят от длины цепочки (обрабатываемого канала). Величина сжатия ε сегментов цепочки на оси канала в данном случае перестает быть зависимой от длины канала, т.е. от режима вязкоупругого течения. На центральной оси канала поток движется подобно сжатому упругому стрежню [68].

Основное влияние на процесс ОАП оказывает напряженно-деформированное состояние потока возле стенки обрабатываемого канала, вызванное градиентом скорости потока. Для цепочки, деформирующейся на стенке канала, характерна разная скорость вязкого течения верхней и нижней границы с проявлением пространственных эффектов, описываемых уравнениями (2.11) ... (2.13).

Для проверочного расчета по предложенной модели по методикам [69, 70] определены величины эффективной вязкости $\eta=600000$ Па с, модуля Юнга $E=150000$ кг/м² и модуля упругости при сдвиге $G=50000$ рабочей среды, состав которой выбран по проведенным исследованиям [3]: каучук синтетический диметилсилоксановый термостойкий СКТ (ГОСТ 14680–74, ТУ 38.103694–89) - 34 %, электрокорунд белый 25А зернистостью F70 - 66 %;. Величина зерна с сольватной оболочкой ≈ 250 мкм. Расстояние между соседними зернами (шариками) в цепочке при установившемся течении ≈ 500 мкм.

Общий поток РС при входе в закрытые каналы разделяется на несколько частей, что приводит к существенному изменению профиль его профиля. Так как общая площадь обрабатываемых поверхностей закрытых каналов существенно больше площади поверхности единичного канала рабочего цилиндра, то количество активных абразивных зерен тоже увеличивается. Если рассматривать единичную цепочку, то число шариков n в ней в закрытом канале длиной около 0,4 м, составляет ≈ 1300 . Экспериментально определена максимальная скорость потока – 0,01 м/с и градиент скорости сдвига установившегося течения в канале - $\gamma' = 1,4$ с⁻¹. Для рассматриваемого случая $\varepsilon \approx 1,3$.

Величина сдвигающей силы $F(t) = 900$ Н найдена из произведения значения давления среды $P_{вх} \approx 2,0$ МПа, измеренного на входе в канал, на площадь поперечного сечения канала 15 x 30 мм. Из (2.11) с учетом геометрических размеров сегмента 0,3 x 0,3 мм и градиента скорости сдвига найдены относительные деформации $\varepsilon_1 = 1,82$ и $\varepsilon_2 = 0,45$. Из (2.13) величина угла $\chi \approx 14^\circ$. Тогда из отношений $\sigma_1 = \varepsilon_1 E$ и $\sigma_2 = \varepsilon_2 E$ следует, что $\sigma_1 \approx 273000$ и $\sigma_2 \approx 67500$. Из (2.12) $\sigma_{11} \approx 260875$, $\sigma_{22} \approx 79625$, $\tau \approx 85006$, $\sigma = 160044$. Такие соотношения между величинами напряжений сохраняются по всей длине обрабатываемого канала и позволяют осуществлять ОАП каналов по всей их длине.

Известно влияние изменения температуры РС на производительность обработки абразивным потоком. Для эффективной обработки температура

рабочей среды должна быть ниже 40°C , а наиболее эффективная обработка достигается при температуре ниже 25°C [63, 91, 92]. Этот фактор был принят в качестве граничного условия при разработке методик создания технологии ОАП.

2.1.2 Особенность контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых материалов

Силовое взаимодействие единичного АЗ с обрабатываемой поверхностью происходит на поверхности контакта Π_k с номинальной площадью A_a . Область контакта в процессе скольжения (качения) пары элементов трения проходит по их поверхности, образуя на каждой из них участок Π_{Ti} с площадью A_{Ti} ($i = 1, 2$), называемый поверхностью трения. Форма и размеры поверхности контакта и поверхностей трения зависят не только от геометрии, но и кинематики элементов сопряжения.

Основной сьем металла происходит при контакте металл поверхностного слоя – абразивное зерно, т.е. в процессе абразивного изнашивания. Для оценки состояния ПС детали после обработки необходимо выявить характеристики изнашивания. Взаимодействие реализуется в отдельных изолированных друг от друга зонах фактического контакта микронеровностей ПС и АЗ.

Для характеристики процесса контакта в трибологии используются понятия номинально A_a , контурной A_c и A_r , фактической площадей касания, а также контурного давления, равного отношению силы, действующей на контактирующие тела, к контурной площади касания $p_c = N / A_c$. В пределах A_c контакт осуществляется отдельными микронеровностями, каждая из которых образует элементарную фактическую площадку касания A_{ri} .

В зависимости от характеристик взаимодействующих тел в зонах фактического касания будет происходить смятие микронеровностей или их внедрение в поверхность более мягкого тела.

Известно [93], что фактическая площадь касания произвольной контактирующей микронеровности практически совпадает с площадью ее

сечения и отличается на 1...2 %. Процесс суммирования отдельных площадок фактического касания в большинстве случаев не влияет на соотношение между фактической площадью касания единичной микронеровности и ее сближением.

Различают два основных вида контакта: насыщенный и ненасыщенный. При ненасыщенном контакте число контактирующих микронеровностей n_r меньше числа микронеровностей n_c , расположенных на контурной площади касания.

Модуль упругости E неподвижной рабочей среды меньше, чем материала обрабатываемой детали. Однако возникающие при течении среды напряжения значительно увеличивают ее упругость. Это обусловлено накоплением в среде упругих деформаций.

При определенных величинах тензора напряжений полимерной основы среды при контакте микронеровностей зерна и поверхности происходит внедрение более жестких микронеровностей АЗ в менее жесткие микронеровности ПС. Это происходит и потому, что абразив имеет более шероховатую поверхность, чем ПС обрабатываемой детали. В начальный момент обработки микронеровности АЗ меньше по величине, чем микронеровности поверхностного слоя. Как только их величина становится сопоставимой, наступает равновесное состояние контакта.

Таким образом, при дальнейшем рассмотрении процесса контакта в расчетах за менее жесткое тело принимается материал обрабатываемой детали.

При внедрении фактическая площадь касания микронеровностей образуется на их боковых поверхностях. Величина этой поверхности зависит от того, какие деформации (упругие, упругопластические, пластические или микрорезание) возникают в зоне контакта. Необходимо учитывать, что при ОАП РС и обрабатываемая поверхность перемещаются относительно друг друга.

Общая зависимость контурного давления выражается формулой [94]:

$$p_c = \frac{0.21\nu(\nu-1)k_1 b E R_{\max}^{1/2} \varepsilon^{\nu+1/2}}{(1-\mu^2)R^{1/2}} \quad (2.14)$$

где μ – коэффициент Пуассона; k_1 – постоянная интегрирования, зависящая от ν и показанная на рисунке 2.5.

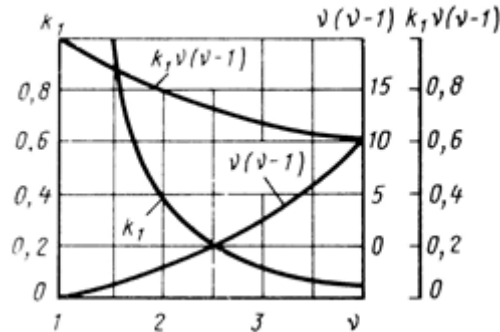


Рисунок 2.5 - Зависимость k_1 , $\nu(\nu-1)$ и $\nu(\nu-1)k_1$ от ν

Из (2.14) получены значения контурного давления, при которых реализуется то или иной вид контакта:

$$1) \text{ упругий ненасыщенный контакт - } p_c \leq \frac{2.4(1-\mu^2)^4 \text{HB}^5}{\Delta^2 E^4},$$

$$2) \text{ упругий насыщенный контакт - } \frac{2.4(1-\mu^2)^4 \text{HB}^5}{\Delta^2 E^4} \leq p_c \leq \frac{5.4(1-\mu^2)^4 \text{HB}^5}{\Delta^2 E^4},$$

3) пластический ненасыщенный контакт -

$$\frac{5.4(1-\mu^2)^4 \text{HB}^5}{\Delta^2 E^4} \leq p_c \leq \frac{14.5(1-\mu^2)^4 \text{HB}^5}{\Delta^2 E^4},$$

$$4) \text{ пластический насыщенный контакт - } p_c > \frac{14.5(1-\mu^2)^4 \text{HB}^5}{\Delta^2 E^4},$$

$$5) \text{ микрорезание - } p_c > \frac{\text{HB}}{2^{\nu+1} \Delta^\nu} \left(1 - \frac{6\tau_n}{\text{HB}}\right)^2, \quad (2.15)$$

где HB – твердость материала по Бриннелю, $\text{H}/\text{мм}^2$; $\Delta = R_{\max}/(Rb^{1/\nu})$ – комплексный параметр, характеризующий шероховатость поверхности; τ_n – касательное напряжение контакта.

Параметры ν и b могут быть определены различными способами [95]. Значения Δ для различных видов обработки и режимов резания приведены в различных источниках [93-97]. Поскольку контакт осуществляется в условиях

вязкоупругой среды, то параметр τ_n для ОАП можно определить из реологических характеристик РС.

Если рассматривать шероховатые поверхности детали и рабочей среды, находящиеся первоначально на расстоянии $R_{\max} = R_{\max d} + R_{\max и}$, которые при контакте сблизилась на величину a . Относительное сближение поверхностей определяется по формуле [68]

$$\varepsilon = a / (R_{\max d} + R_{\max и}) = a / R_{\max} \quad (2.16)$$

Номинальное p_a , контурное p_c и фактическое p_r давления в контакте в зависимости от прижимающей силы P_y определяются по формулам:

$$p_a = P_y / A_a ; p_c = P_y / A_c ; p_r = P_y / A_r , \quad (2.17)$$

где A_a , A_c , A_r – номинальная, контурная и фактическая площади контакта.

Поскольку при ОАП основной контакт происходит по боковым сторонам микронеровностей, то величина прижимающей силы P_y определена из векторной суммы сил, возникающих при напряженном состоянии основы F_σ и F_τ .

Фактическая площадь контакта микронеровностей после преобразований функций [97] с учетом особенностей ОАП определится как:

1) упругий контакт

$$A_r = \left[2,35(0,5A_c b)^{1/2v} \left(I_k \rho_k^{1/2} / k_{АЭО}^{1/2} R_{\max}^{1/2} \right) P_y \right]^{2v/(2v+1)}, \quad (2.18)$$

2) пластический контакт

$$A_r = P_y / c\sigma_\tau = P_y / HB , \quad (2.19)$$

3) упруго-пластический контакт

$$A_r = \frac{P_y}{c\sigma_\tau} + \frac{(bA_c)^{1/v} v a_k (P_y / c\sigma_\tau)^{(v-1)/v}}{2R_{\max}}, \quad (2.20)$$

где I_k – упругая постоянная контакта; ρ_k – приведенный радиус контактирующих тел; a_k – критическое абсолютное сближение, соответствующее переходу контакта из упругого в пластическое состояние; $k_{АЭО}$ – коэффициент контакта при АЭО (определяется экспериментально); v_d , v_n , b_d ,

b_i - коэффициенты для расчета опорной кривой профиля шероховатости; НВ – твердость по Бриннелю:

$$I_k = \left((1 - \mu_i^2) / E_i \right) + \left((1 - \mu_d^2) / E_d \right); \rho_k = \rho_i \rho_d / (\rho_i + \rho_d); v = v_i + v_d; b = \frac{k_{\text{АЭО}} b_i b_d R_{\text{max}}^v}{R_{\text{max}i}^v + R_{\text{max}d}^v}.$$

Особенностью контактных взаимодействий при ОАП деталей из труднообрабатываемых материалов является то, что на начальных этапах обработки наблюдаются все виды контакта, как на отдельных микровыступах абразивного зерна и обрабатываемой поверхности, так и АЗ в целом. Однако основным механизмом снятия материала с поверхности заготовки является микрорезание на уровне элементарных фактических площадей касания отдельных микровыступов зерна с верхушками и боковыми поверхностями локальных выступов обрабатываемой поверхности (литейной корки) на первом этапе, и основным металлом заготовки – на втором этапе.

В процесс обработки по мере удаления материала происходит постепенное уменьшение размеров элементарных фактических площадок касания, что при постоянной силе резания ведет к росту величины фактического давления в контакте. Это обуславливает проявления пластические деформации локальных участков поверхностного слоя в зоне контакта на втором этапе обработки. Различные условия контактных взаимодействий при обработке на первом и втором этапе необходимо учитывать при регулировании режимов ОАП.

2.2. Моделирование процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей

Для подтверждения результатов моделирования процесса течения РС при ОАП в каналах и обтекания ей кромок лопаток проведены визуальное моделирование с применением методики исследование влияния формы обрабатываемого канала на поток рабочей среды [7]. Визуальные исследования заключалась в фиксировании процесса течения РС высокой вязкости в каналах различной конфигурации и обтекания ей различных местных сопротивлений.

Для проведения визуальных исследований использовано устройство (рисунок 2.6). Оно состоит из корпуса 1, в паз которого устанавливаются образцы-имитаторы 2; крышки 3 и два переходника 4 и 5. Крышка 3 и корпус 1, соединенные между собой замковым соединением, образуют прямоугольный канал сечением 10x50 мм и длиной 130 мм. Крышка имеет окно 6 из органического стекла толщиной 20 мм. В корпусе 1 смонтированы два датчика давления 7 и 8. Переходники 4 и 5 обеспечивают плавный переход от круглого сечения в цилиндрах до прямоугольного в устройстве, а также закрепление его в установке.

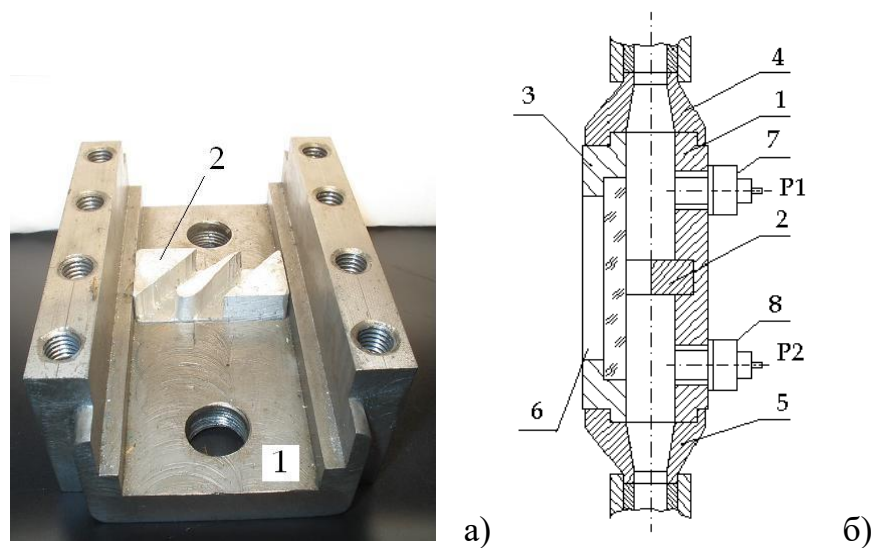


Рисунок 2.6 - Устройство для визуальных исследований процесса ОАП: а) корпус с образцом; б) схема устройства [7]

Характер потока рабочей среды 1 моделировался в трех параллельных каналах 3 с идентичной формой и площадью поперечного сечения, образованных стенками 2 с плоскими фронтальными кромками. (рисунок 2.7). Установлено, что при подаче сдвигающего давления в начальный момент (рисунок 2.7, а) на входе в каналы формируется профиль потока. Так как геометрические характеристики каналов идентичны (рисунок 2.7, б), то и идентичны расходно-напорные характеристики потоков в каждом из исследуемых параллельных каналов. При этом в потоке среды при его растяжении в канале возникают как вязкие (касательные), так и упругие (нормальные) напряжения [2].

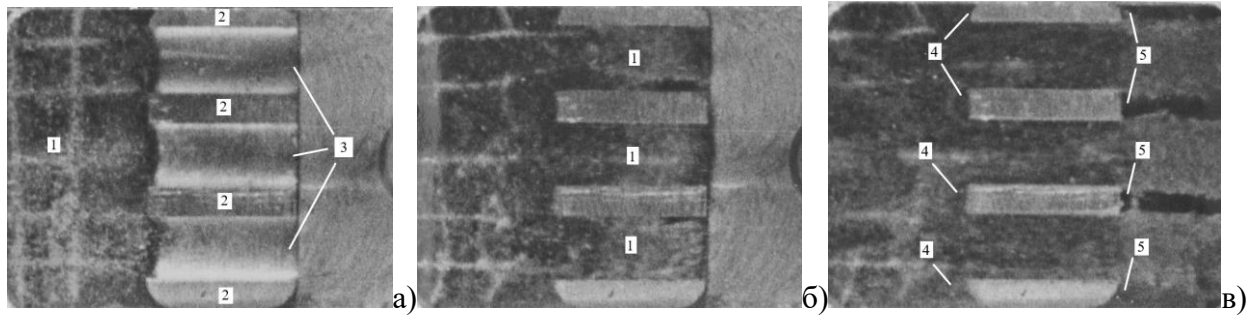


Рисунок 2.7 - Поток рабочей среды в трех параллельных каналах с идентичной формой и площадью поперечного сечения: а) начало процесса; б) втекание среды в каналы; в) поток среды с выходом из каналов и образованием застойных зон на входе и выходе [2]

Так как плоские фронтальные кромки стенок 2 являются местными сопротивлениями, то на них возникают застойные зоны 4, а на выходе из каналов наблюдается эффект упругого восстановления потока с отрывом потока от плоских фронтальных кромок и возникновением застойных зон 5 (рисунок 2.7, в). Эффект упругого восстановления обусловлен релаксацией напряжений, накопленных потоком при перестройке его профиля в каналах, а также на их входах и выходах.

К традиционным решениям относятся конструкции, в которых угол наклона лопаток и межлопаточных каналов совпадают. Результаты моделирования потока высоковязкой РС в таких конструкциях показаны на рисунке 2.8 и рисунке 2.9.

Так при рассмотрении изменения профиля потока среды в наклонном канале с наклонной лопаткой 2 со скругленным основанием (рисунок 2.8, 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 2.8, 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 2.8, в).

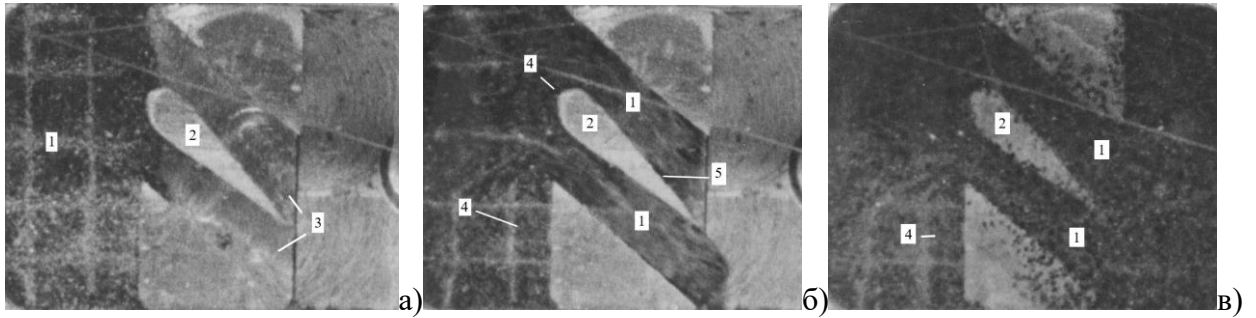


Рисунок 2.8 - Поток рабочей среды в наклонном канале с наклонной лопаткой со скругленным основанием вперед: а) начало процесса; б) втекание среды в каналы; в) поток среды с выходом из каналов и образованием застойных зон на входе [2]

Также межлопаточные каналы 3 практически идентичны по геометрическим характеристикам при моделировании течения среды 1 в наклонном канале с наклонной лопаткой 2 с острым основанием (рисунок 2.9, а).

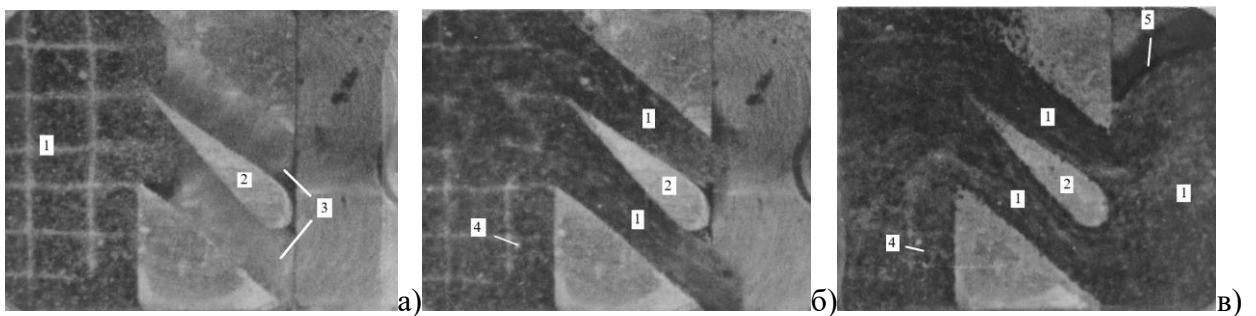


Рисунок 2.9 - Поток рабочей среды в наклонном канале с наклонной лопаткой со острым основанием вперед: а) начало процесса; б) втекание среды в каналы; в) поток среды с выходом из каналов и образованием застойных зон на входе [2]

Скорость потока среды 1 в нижнем канале немного выше, чем в верхнем канале, но отрыва потока от стенки лопатки 2 не происходит. Застойная зона 4 наблюдается только на плоском торце (рисунок 2.9, б). С течением времени скорости потока среды 1 в каналах выравниваются. Застойная зона 4 остается только на плоском торце. На выходе из канала образуется отрыв потока со скругленного основания лопатки 2, который за счет упругого восстановления потока сходит с кромки. Эффект упругого восстановления потока 5 виден в верхней части фотографии (рисунок 2.9. 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 АЗ в потоке установлено, что они перемещаются по линиям тока. При установившемся течении расстояние между соседними зернами не изменяется. Тем самым подтверждается предположение об образовании в потоке упругой цепочки.

2.3. Предложение по совершенствованию обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей за счет применения направляющего аппарата как элемента технологической оснастки

Известно, что при проектировании специальных средств оснащения к приспособлениям предъявляют ряд требований, в том числе и по уменьшению величины погрешности базирования и закрепления заготовок [98].

Общая схема базирования и закрепления заготовки в приспособление для ОАП (рисунок 2.10) включает в себя верхний рабочий цилиндр 1 и нижний рабочий цилиндр 2 установки для обработки абразивным потоком, а также крышки 3 и основы 4 приспособления, резьбовой шпильки 5, крепежной гайки 6, соединительных болтов 7 и обрабатываемой заготовки 8.

Основа 4 приспособления представляет собой корпус с центральной частью, соединенные между собой тремя перегородками. Между перегородками расположены полости для подачи РС. В центральной части есть резьбовое отверстие, в которое вкручивается резьбовая шпилька 5. Основа 4 с вкрученной шпилькой 5 устанавливается на посадочную плоскость нижнего рабочего цилиндра 2. Далее на шпильку монтируется обрабатываемая заготовка 8. При этом поверхность центральной части основы 4 является установочной базой. При помощи крепежной гайки 6, накручиваемой на шпильку 5, заготовка 8 закрепляется в приспособлении, при этом формируется направляющая база. Далее на основу 4 монтируется крышка 3, закрепляясь болтами 7. После этого верхний рабочий цилиндр 1 при помощи траверсы поджимает приспособление в сборе к нижнему рабочему цилиндру 2. Заготовка готова к обработке.

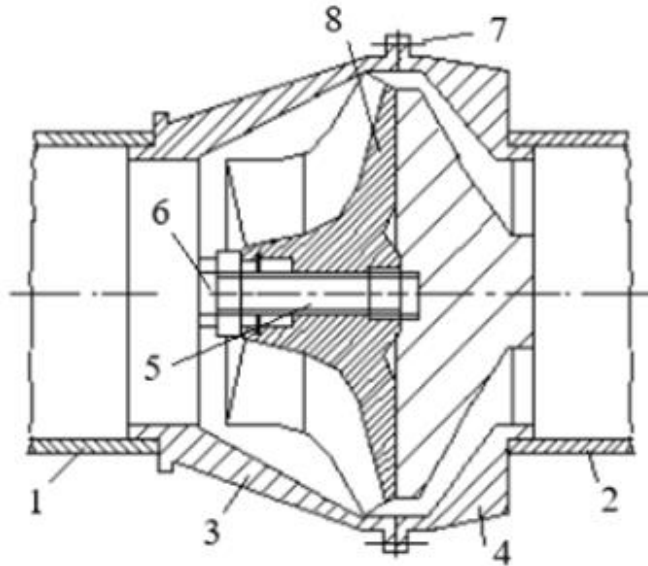


Рисунок 2.10 - Общая схема базирования и закрепления заготовки в приспособление для обработки абразивным потоком

Известно, что закрытые каналы расположены по окружности заготовок (лопатки крыльчаток, турбин, роторов, направляющих аппаратов и др.). При этом поверхности каналов находятся под углом (до 350°) относительно направления потока газа и жидкости в агрегатах с изменением углов наклона каналов по его длине, а геометрические параметры каналов изменяются в широком диапазоне [11].

Установлено, что при сборке направляющего аппарата (рисунок 2.11) 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 ЗК. Наибольший съем материала наблюдается в зонах 5 на входе и выходе в канале, где перестройка профиля потока максимальна [66].

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.

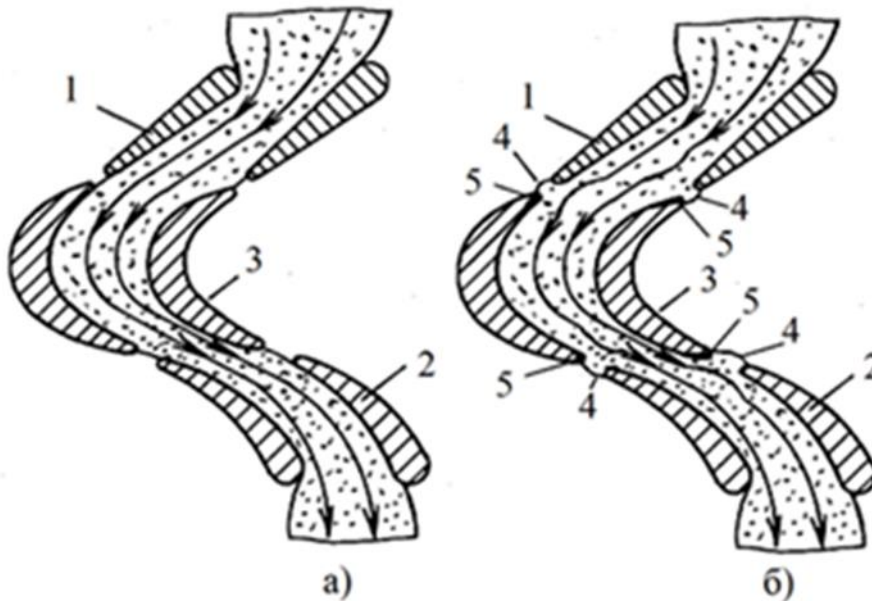


Рисунок 2.11 – Теоретическая схема способа обработки абразивным потоком с направляющим аппаратом: а) без учета эффекта упругого восстановления потока; б) с учетом эффекта упругого восстановления потока [66]

При первоначальном формировании потока мгновенное давление рабочей среды может достигать величин порядка 5...8 МПа, что приводит к возникновению силы, действующей в осевом направлении на центральную часть основания 4. Численные значения этой силы могут варьироваться в зависимости от диаметров рабочих цилиндров установки в пределах от 30000 до 65000 Н.

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 2.10) 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 2.11). 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 обработки абразивным потоком с направляющим аппаратом и установочными пальцами (рисунок 2.12.)

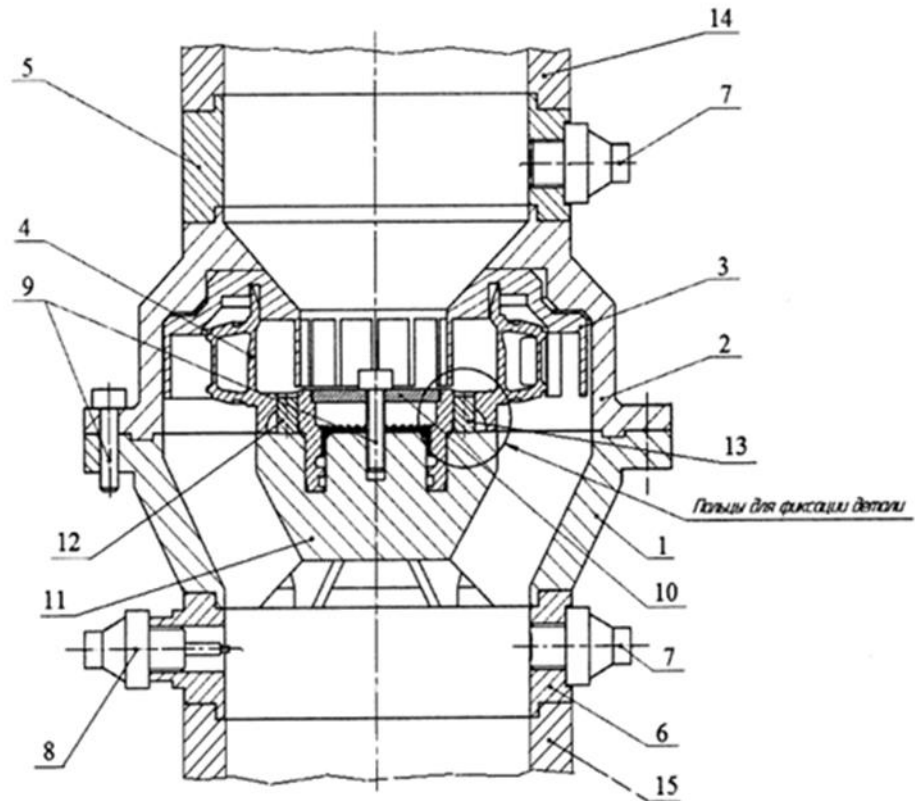


Рисунок 2.12 – Способ обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток [99]

В установочное отверстие базового основания 11 нижней части 1 приспособления устанавливается обрабатываемая заготовка 4. При этом в два отверстия заготовки 4 входят цилиндрический палец 12 и призматический палец 13. Пальцы 12 и 13 служат для базирования заготовки (направляющая база) при обработке и для предотвращения ее поворота потоком рабочей среды относительно заданного положения.

При помощи стопорного кольца 10 и крепежного болта 9 (опорная база) заготовка 4 закрепляется на основании 11 (установочная база). Далее на

заготовку 4 монтируется направляющий аппарат 3, закрываемый верхней частью 2 приспособления. При этом лопатки НА располагают так, чтобы они обеспечили требуемый профиль потока на входе в обрабатываемые каналы. При этом зазор между каналами направляющего аппарата и обрабатываемой заготовки не должен создавать условия для возникновения эффекта упругого восстановления струи потока. После этого нижняя часть 1 и верхняя часть 2 приспособления соединяются болтами 9. Необходимый для эффективной обработки объем РС помещается в нижний рабочий цилиндр 15 установки для обработки абразивным потоком. В нижний рабочий цилиндр вставляется нижний переходник 6, в который монтируется собранное приспособление с заготовкой и НА. На верхнюю часть 2 приспособления устанавливается верхний переходник 5, который входит в верхний рабочий цилиндр 14 установки. Рабочий цилиндр 14 имеет возможность вертикального перемещения, а установка обеспечивает закрепление приспособления между своими рабочими цилиндрами 14 и 15.

Для контроля и регулирования величины давления потока РС применяют датчики давления 7, для контроля температуры РС - температурный датчик 8.

При подаче давления шток нижнего рабочего цилиндра 15 продавлиывает рабочую среду через нижний переходник 6 в нижнюю часть 1 приспособления. При этом профиль потока меняется от цилиндрического сечения к кольцевому сечению. Далее поток РС с кольцевым профилем достигает входные отверстия каналов направляющего аппарата 3. При этом поток разбивается на отдельные составляющие, количество которых соответствует количеству каналов обрабатываемой заготовки 4. Профиль каждой составляющей потока принимает форму сечения межлопаточного канала направляющего аппарата 3 и далее продавливается в каналы заготовки 4. При этом на входе и выходе в каналы заготовки перестройка профиля составляющих потока РС не происходит.

Поскольку поперечное сечение входных отверстий направляющего аппарата 3 больше по своей площади, чем поперечное сечение выходных отверстий, имеющих одинаковую или меньшую по размерам на величину коэффициента упругого восстановления потока площадь с входными и

выходными сечениями каналов заготовки, создаются такие условия течения потока, при котором основная обработка происходит в каналах детали [100].

В схеме способа ОАП с направляющим аппаратом (рисунок 2.12) между НА 3 и заготовкой 4 имеется зазор. Его величина влияет на технологический режим обработки, в частности на площади поперечных сечений выходных отверстий НА и сечениями входных отверстий каналов заготовки. В зоне зазора на выходной кромке направляющего аппарата начинается эффект свободного восстановления потока РС с увеличением его размеров. Поэтому для расчета размеров выходных отверстий НА необходимо знать численное значение коэффициента упругого восстановления потока рабочей среды.

Правильное описание нелинейных реологических эффектов, построение определяющих соотношений течения неньютоновских вязких жидкостей и вязкоупругопластичных сред (например суспензий, гелей, полимеров в вязкотекучем состоянии или в виде расплавов и растворов и т.п.) важны для понимания закономерностей и моделирования огромного количества природных и технологических процессов [101].

При свободном восстановлении струи потока, вышедшей из канала, главной особенностью является то, что среда в обрабатываемом канале не находится в условиях действия однородных напряжений и, следовательно, в различных окружных сечениях среды накапливается разная упругая деформация. Поэтому наблюдаемый эффект упругого восстановления является интегральным, связанным с различным по радиусу потока упругим восстановлением материала. После того как струя выходит из канала (капилляра), она ведет себя как высокоэластическое тело, не проявляющее текучести, изменяясь по диаметру в α раз [68]. Известна формула, связывающая изменение диаметра струи α и напряжение обратимой деформацией γ_m [9]

$$\gamma_m = \sqrt{3(\alpha^4 + 2\alpha^2 - 3)} \quad (2.21)$$

Точное решение уравнений напряжения обратимой деформацией γ_m невозможно. Приближенно его принимают как $1/k\eta$, где η – эффективная вязкость рабочей среды, k – эмпирический коэффициент.

Для определения численного значения коэффициента эффективной вязкости РС того состава, который будет применяться для ОАП, применяется методика экспериментального определения коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды [70]. С применением данной методики возможно определение величины эмпирического коэффициента k .

Проведенные расчеты показали, что для состава РС, использованной для обработки абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок [3], коэффициент $\alpha = 1,1 \dots 1,3$ на каждый миллиметр длины зазора.

Следовательно, площади поперечных сечений выходных отверстий направляющего аппарата и сечений входных отверстий каналов заготовки связаны между собой выражением

$$S_3 = S_{\text{на}} L^\alpha, \quad (2.22)$$

где L – длина зазора.

Из (2.22) следует, чем больше длина зазора, тем больше должна быть разность площадей S_3 и $S_{\text{на}}$ [102].

Проектирование направляющего аппарата для ОАП конкретных деталей является важной задачей [102]. Не менее важной является задача изготовления этого элемента технологической оснастки с учетом условий и типа производства. Верхняя часть приспособления 1 и нижняя часть приспособления 2, между которыми фиксируется обрабатываемая деталь 3, изготавливаются при помощи традиционных технологий лезвийной обработки и сварки. Направляющий аппарат 4 должен соответствовать ряду требований. Число каналов НА должно соответствовать количеству ЗК детали (рисунок 2.13).

Как показывает практика, элементы технологической оснастки для ОАП имеет большой срок службы. Высокая стойкость поверхностей оснастки,

которые в ходе обработки контактируют с потоком рабочей среды, обусловлена их постепенной приработкой до шероховатости $Ra \approx 0,1 \dots 0,2$ мкм и упрочнением в 2...3 раза, по сравнению с исходным состоянием. Это характерно для элементов оснастки как из любых видов сталей, так и сплавов алюминия. Таким образом, производство элементов технологической оснастки для ОАП необходимо отнести к единичному типу.

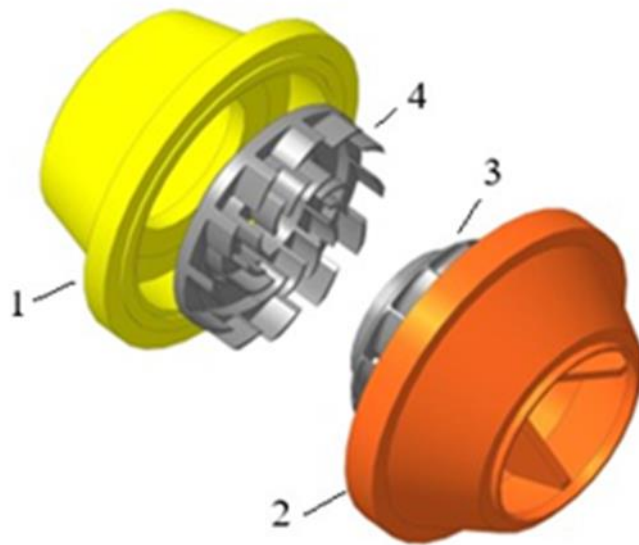


Рисунок 2.13 – Технологическая оснастка для обработки абразивной обработки закрытых каналов с направляющим аппаратом [102]

Выбор эффективного объема рабочей среды направлен на обеспечение максимального количества активных АЗ. Активное абразивное зерно – это зерно, которое находится в контактных взаимодействиях с обрабатываемой поверхностью. Чем больше абразивных зерен, тем производительнее обработка.

Для обработки деталей с большой площадью поперечного сечения значительная часть АЗ потока РС не участвует в контактных взаимодействиях. Эти зерна перепрессовываются во внутренних линиях потока РС, т.е. не участвуют в процессах внешнего трения. В связи с этой особенностью, площадь поперечного сечения каналов обрабатываемой детали должна быть меньше, чем площади поперечного сечения элементов оснастки – приспособления, направляющего аппарата, переходников.

Минимальная величина объема РС определяется суммарным объемом внутренних каналов структурных элементов схемы обработки – нижней 1 и верхней 2 частей приспособления; направляющего аппарата 3; детали 4; нижнего 6 и верхнего 5 переходников (рисунок 2.12).

Численные значения объемов каждого структурного элемента определяются на основании геометрического моделирования в САД системе. Полученная величина характеризует тот объем РС, который необходим для заполнения схемы рабочей средой.

Проведенные ранее визуальные исследования показали, что форма обрабатываемых каналов оказывает серьезное влияние на характер абразивного потока. Так местные сопротивления вызывают появление застойных зон при обработке [5]. В этих зонах часть потока остается неподвижной, а основной поток перемещается по внешней границе застойной зоны. Объем РС в застойных зонах также необходимо учитывать в ее общем объеме.

Эффективный объем РС должен обеспечивать требуемые расходно-напорные характеристики абразивного потока (скорость и давление), а также ход потока РС (количество активных АЗ). В зависимости от соотношения площади поперечного сечения и общей площади внутренней поверхности обрабатываемой детали эффективный объем рабочей среды должен быть в 1,5...4 раза больше минимального. Если требуемый эффективный объем РС превышает объем камеры рабочего цилиндра, то необходимо загрузка дополнительного объема [103].

Цифровые двойники (ЦД) представляют собой виртуальные реплики реальных объектов, которые позволяют моделировать и симулировать их поведение в различных условиях [104], а их использование обеспечивает интеллектуализацию процессов подготовки производств [105]. Создание элементов технологической оснастки для ОАП с применением ЦД возможно по следующим направлениям: лезвийная обработка, электроэрозионная обработка, селективное лазерное сплавление, литье по выплавляемым моделям и нанесение металлизующего покрытия на модель направляющего аппарата.

Общим этапом всех направлений является создание цифрового двойника технологической оснастки с последующим разбиением на ЦД переходников и направляющего аппарата. 3D-модели разрабатываются в САД-системе с учетом конструктивных особенностей и требований к детали и процессу ОАП. При этом особое внимание уделяется требованиям по точности размеров межлопаточных каналов НА. При этом точность присоединяемых поверхностей может быть исполнена по 12...14 качеству.

При использовании лезвийной обработки для изготовления НА потребуется 4,5-осевая или 5-осевая обработка на обрабатывающих центрах. При этом исходный ЦД перерабатывается с учетом требований системы разработки управляющих программ для станков с ЧПУ для последующей разработки цифрового двойника технологического процесса.

Этот двойник содержит информацию о последовательности обработки, выбранных режущих инструментах и траекториях их движений, выбранных режимах резания. Это дает возможность провести визуализацию процесса обработки, а также совместить процесс резания и контроля получаемых размеров. Рассматриваемый подход позволяет достаточно гибко организовать производство оснастки в условия единичного производства, но при этом потребует применения дорогостоящего оборудования и программного обеспечения, а также значительного штучного времени на обработку.

Аналогичными достоинствами и недостатками будет характеризоваться производство НА с использованием электроэрозионной обработки. В этом случае дополнительно возникает необходимость изготовления специализированных электродов и постобработки присоединяемых поверхностей.

Селективное лазерное сплавление также потребует переработки исходного ЦД детали. Этого требует оптимизация геометрии модели для минимизации дефектов и повышения качества изготовления. При этом цифровой двойник для аддитивного производства необходимо преобразовать в иной формат,

поддерживаемый аддитивным оборудованием с учетом размещения 3D-модели на виртуальной платформе и ограничениями по размерам рабочей камеры.

В этот цифровой двойник необходимо ввести конструктивные элементы в виде поддержек детали для предотвращения ее деформаций, обеспечения геометрической точности, отвода избыточного тепла, обеспечения адгезии к платформе и облегчения удаления после печати. Детали, полученные технологией *SLM*, требуют постобработки и создания соответствующего цифрового двойника.

Высокая стоимость оборудования и расходных материалов, длительное время печати и низкое качество напечатанных деталей — вот некоторые из факторов, препятствующих широкому применению 3D-печати металлических деталей [106]. В перспективе эта технология может стать основной для создания специализированной технологической оснастки для ОАП, однако в настоящее время для условий единичного производства эффективнее отдавать изготовление направляющих аппаратов специализированным компаниям.

Известно, что технология лазерной стереолитографии (*Stereolithography (SLA)*), заключающаяся в отверждении жидкого фотополимерного материала под действием лазерного излучения, на основе цифрового двойника дает возможность построения моделей сложной формы и структуры, при этом полученные модели отличаются высокой прочностью и точностью, хорошим качеством поверхности и характеризуются несложной постобработкой [107].

Использование *SLA*-технологии дает возможность быстро изготовить точные литевые изделия из металла. Напечатанная 3D-модель покрывается жаропрочной суспензией в несколько слоев для создания оболочковой формы. Далее модель выжигается при высокой температуре и на ее место заливается металл. После отверждения металла, оболочка удаляется и проводятся финишные операции по отделке уже готовой отливки из металла [108].

Цифровой двойник направляющего аппарата для *SLA*-технологии может стать исходной моделью и для нанесения металлизированного покрытия [109]. Основными методами металлизации, которые используются в настоящее время,

являются электроосаждение [110] и химическое осаждение [111]. Проведенные эксперименты по химической металлизации оправок и формированию функционального слоя пресс-форм, посредством гальванического выращивания позволили получить технологическую оснастку с использованием прототипированных оправок [112]. Однако небольшая толщина нанесенного слоя делает дискуссионной перспективу использования данной технологии для изготовления элементов технологической оснастки для ОАП.

Предложенный подход с применением цифровых двойников при создании элементов технологической оснастки для ОАП существенно повышают технологичность конструкции этих элементов, сокращают сроки подготовки производства. Использование аддитивных технологий (*SLM* и *SLA*) дает возможность изготавливать направляющие аппараты с относительно невысокой себестоимостью в условиях единичного производства [113].

2.4. Совершенствование методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком сложнопрофильных деталей

Предлагаемое совершенствование методики касается уточнения шагов 1, 2, 5, 6 и 7 последовательности выбора моделей течения рабочей среды этапа 1 общей модели, описанной в таблице 1.3.

2.4.1 Уточнение шагов известной методики

Уточнение шага 1 Анализ исходной информации о геометрических характеристиках обрабатываемой детали с ЗК, наряду с построением 3D модели, дает возможность принятия решения о целесообразности использования направляющего аппарата и его геометрических характеристиках.

Известно, что при обработке лопастных деталей зоны течения возникают в нескольких каналах, образованных между обрабатываемой поверхностью и внутренней поверхностью приспособления, как показано на рисунке 3. В зоне, образованной внешней поверхностью детали 3 и внутренней поверхностью крышки 2, происходит непосредственная обработка. Течение в этой зоне должно

обеспечить условия для равномерной обработки всей поверхности канала до требуемой шероховатости с заданной производительностью [10].

В данном случае обрабатываемые каналы не изолированы друг от друга, так как зона между поверхностями 2 и 3 является общей для всех каналов. Объемный расход среды считается общим. Перестройка профиля потока рабочей среды минимальна. При такой конструкции детали применение НА нецелесообразно (рисунок 2.14).

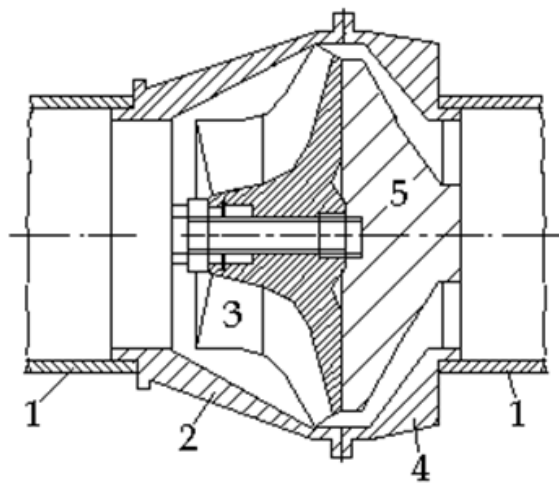


Рисунок 2.14 – Зоны течения в нескольких каналах, образованных внешней поверхностью детали и внутренней поверхностью приспособления: 1 – рабочие цилиндры установки; 2 – верхняя часть приспособления (переходник); 3 – деталь; 4 – нижняя часть приспособления (направляющая); 5 – основа приспособления [10]

На рисунке 2.14 видно, что у закрытых каналов 5 детали 4 нет общей зоны течения. Их обработка осуществляется отдельно, что требует выравнивания условий обработки в каждом закрытом канале, а следовательно, использование направляющего аппарата для обеспечения равномерного объемного расхода потока РС в каждом закрытом канале при двухсторонней ОАП. При этом НА обеспечивает требуемую конфигурацию и площадь поперечного сечения, а также угол наклона входных и выходных сечений закрытых каналов.

При обработке закрытых каналов, как правило, профиль потока рабочей среды меняется существенно, так как поток разделяется на несколько частей.

Уточнение шага 2. Применение направляющего аппарата вводит дополнительную четвертую зону течения потока РС (рисунок 2.15).

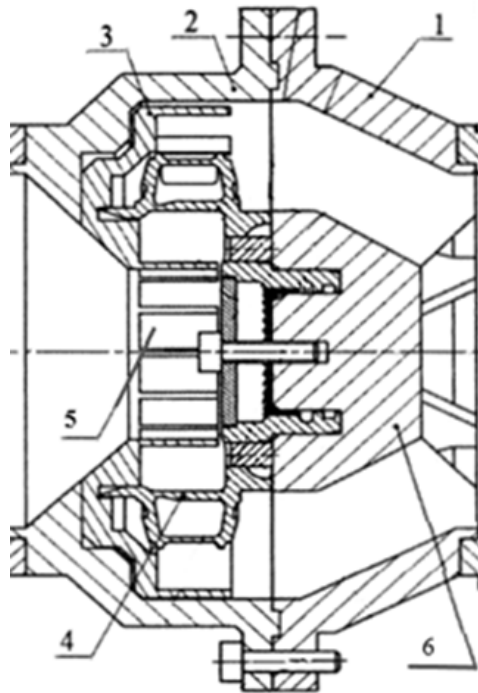


Рисунок 2.15 – Зоны течения с направляющим аппаратом: 1 – нижняя часть приспособления (направляющая); 2 – верхняя часть приспособления (переходник); 3 – направляющий аппарат; 4 – деталь; 5 – закрытый канал детали; 6 – основа приспособления [114]

Уточнение шагов 3 и 4 не требуется. На шаге 3 рассматривается зона 1 - рабочий цилиндр установки, в которой модель течения в прямом канале круглого поперечного сечения не меняется.

С учетом ламинарного течения РС и величины числа Рейнольдса для потока РС при ОАП $Re \ll 1$ [68], максимальную скорость ядра потока в рабочем цилиндре рассчитывают по преобразованной формуле Пуазейля [11]

$$w_{\text{я}} = \frac{\Delta p}{\eta} \frac{r^2}{8l}, \quad (2.23)$$

где r – радиус рабочего цилиндра, l – длина рабочего цилиндра, ΔP – перепад динамического давления потока в рабочем цилиндре длиной l , η – эффективная вязкость рабочей среды.

На шаге 4 рассматриваются условия ОАП одноканальных деталей.

Уточнение шага 5. Применение в обработке направляющего аппарата как дополнительной части оснастки ведет к разделению зоны 2 на три зоны – 2а, 2б и 2в (рисунок 2.15). В зоне 2а реализуется модель течения рабочей среды в конусном канале (конфузор), а начальные условия находятся из решения течения в зоне 1. Эта итерация остается такой же, как и в базовой модели, приведенной в таблице 1.3. Для аналитического расчета применимо уравнение Бернулли для неньютоновской жидкости.

В конфузоре поток РС плавно меняет свой профиль, в нем возникают деформации растяжения по оси канала и сжатия в радиальном напряжении. Такая конфигурация зоны 2а существенно сокращает потери потока за счет изменения конфигурации местного сопротивления от резкого уменьшения размера (стенка) к конфузору.

Далее поток РС с установившимся круглым профилем, равным по площади выходному сечению конфузора, поступает в зону 2б. В этой зоне происходит осесимметричное разделение единого потока на m потоков. При этом в каждом из m каналов происходит дальнейшая деформация растяжения потока по оси канала и сжатия потока в радиальном напряжении.

При этом зазор между направляющим аппаратом и деталью имеет такой размер, при котором увеличение сечения потока при его упругом восстановлении было бы минимальным и не влияло на перестройку профиля потока. Величина зазора зависит от вязкости рабочей среды и сдвигающего давления и определяется по зависимостям (2.21) и (2.22).

Величину длины зазора L необходимо включать в качестве замыкающего звена в технологическую размерную цепь, составляемую по рисунку 2.15, при базировании детали 4 и направляющего аппарата 3 в основу приспособления 6.

Для описания условий течения в направляющем аппарате зоны 2в применим подход, который использован при задании начальных условий для зоны 3 исходной методики, приведенной в таблице 1.3. Здесь реализуется оценка равномерности расхода РС во всех m закрытых каналах и рассматривается перестройка профиля потока на входном сечении каждого канала.

Важным условием выравнивания потока РС является геометрическое подобие формы и площади поперечного сечения (с учетом зависимости (2.22)), а также угла наклона как входной кромки канала НА, так и закрытого канала детали.

Уточнение шага 6. Особенностью этого шага является разбиение общей зоны 3 на m отдельных зон течения (рисунок 2.16), общее количество которых соответствует числу закрытых каналов (3-1, 3-2, 3-3, ..., 3- m).

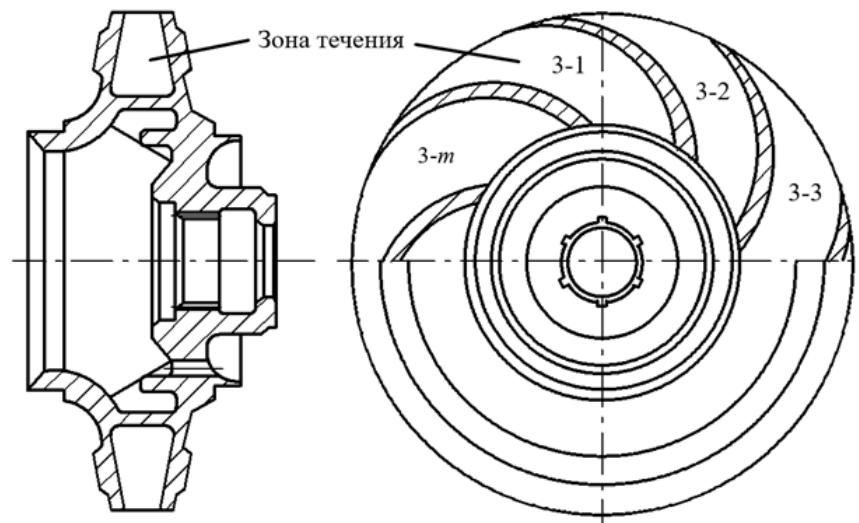


Рисунок 2.16 – Разбиение на зоны течения в m закрытых каналах [114]

Осесимметричное расположение закрытых каналов и их геометрическое подобие (вместе с геометрическим подобием каналов направляющего аппарата) обеспечивают равномерность расхода потоков рабочей среды в каждом канале.

Уточнение шага 7. Поток РС из m зон закрытых каналов детали переходит в m зон направляющего аппарата. При этом профиль потоков не изменяется. Далее m потоков выходят из направляющего аппарата в конусную часть переходника (диффузор). При этом происходит эффект упругого восстановления потока рабочей среды (релаксации накопленных напряжений).

Основным условием по обеспечению производительности ОАП закрытых каналов является максимальные радиальные деформации потока в обрабатываемых ЗК с минимизацией влияния на него местных сопротивлений.

Известно, что лучшие условия для обработки возникают на участке канала с наименьшей площадью поперечного сечения [115]. Это явление обусловлено вязкоупругими свойствами РС. В сечении с минимальной площадью в потоке среды возникают наибольшие деформации растяжения - сжатия, что приводит к увеличению, как нормальных (в радиальном направлении), так и касательных (в осевом направлении) напряжений.

Сложный профиль поперечного сечения закрытого канала определяет выбор модели течения на основе укороченных уравнений Навье-Стокса. Однако аналитическое определение точных значений величин скорости и динамического давления потока в таком канале невозможно. В связи с этим, для определения численных величин скорости и динамического давления потока предложено использовать конечно-элементное моделирование [84, 115, 116].

Для этого был сделан ряд допущений [118]: объем РС, участвующей в моделировании обработки, не меняется и имеет определенное значение; для верификации результатов моделирования использованы результаты визуальных исследований характера потока рабочей среды в круглых каналах (касательные напряжения: $\tau \approx 0,28 \dots 0,3$ МПа, нормальные напряжения: $\sigma \approx 0,25 \dots 0,3$ МПа) [119]. В качестве реологического уравнения рекомендована преобразованная модель Шведова— Бингама [11]

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \gamma'^n, \quad (2.24)$$

где τ — напряжение сдвига; τ_0 — предельное напряжение сдвига; γ' — скорость сдвига (градиент скорости сдвига); $\eta_{\text{пл}}$ — пластическая вязкость; n — индекс течения.

Граничные условия: скорость поршня на входе: в начальный момент времени 0,0054 м/с; в конечный момент 0,0205 м/с; сдвигающее давление 12 МПа; ход поршня 200 мм; на стенках каналов во всех зонах соблюдается условие прилипания потока $V_z = 0$.

Основным результатом моделирования является расчет поля распределения динамического давления потока РС в закрытых каналах. Полученные численные значения динамического давления потока среды в таких каналах подтвердили возникновения таких сил резания, которые обеспечивают все виды контактных взаимодействий между микронеровностями обрабатываемой поверхности и абразивных зерен рабочей среды.

В результате градиента скорости и динамического давления потока РС в точке контакта возникает тангенциальная сила $P_z = \sigma_c S_z$ и нормальная сила $P_y = \sigma_c S_y$, где σ_c – среднее напряжение стружкообразования (с учетом твердости материала литейных высоколегированных сталей $\sigma_c \approx 1,23$ НВ), S_z и S_y – проекции поверхности контакта на плоскости, нормальной к вектору скорости зерна и касательной к деформируемой поверхности соответственно [120].

Моделирование процесса обработки абразивным потоком для 2D и 3D моделей рабочих сред также подтверждает правильность выбора этого фактора для оценки процесса ОАП [121].

Уточнение шага 7 производится аналогично решению по уточнению шага 5, с учетом изменения направления потока рабочей среды при его возвратно-поступательном движении.

Результаты разработок этапа 1 по уточненной методике являются исходными данными для действий по этапам 2 – 6 общей методики оценки точности, качества и эффективности обработки абразивным потоком деталей.

Совершенствование методики направлено для обеспечения основного условия обеспечения равномерности обработки - перестройка профиля потока РС в направляющих аппаратах, а также минимальное упругое восстановление струи в зазоре между НА и закрытыми каналами.

2.4.2 Алгоритм усовершенствованной методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей

Алгоритм усовершенствованной методики разработки ТП обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей.

1. Определение характеристик обрабатываемых каналов.

1.1. Анализ исходной информации на основании рабочего чертежа детали с закрытыми каналами: габаритные размеры; количество закрытых каналов; угол наклона сечения входных отверстий закрытых каналов относительно направления потока рабочего тела; изменение углов наклона каналов по их длине; площадь S_z и форма сечений входных и выходных отверстий закрытых каналов; постоянство или изменчивость площади и формы поперечного сечения закрытых каналов; при изменчивости формы и площади поперечного сечения определяется участок, где площадь сечения S_z минимальна; ширина кромки лопатки; длина закрытого канала; исходная и требуемая величина шероховатости и твердости поверхности; точность геометрических размеров. Построение 2D или 3D модели детали с закрытыми каналами. Выбор типа модели определяется сложностью геометрии детали с закрытыми каналами и возможностями системы моделирования.

1.2. Принятие решения о целесообразности использования направляющего аппарата и его геометрических характеристиках. Построение 2D или 3D модели. Предварительный выбор длины зазора между кромками направляющего аппарата и обрабатываемой деталью.

1.3. Выделение зон течения потока рабочей среды с учетом многоканальности детали и радиуса рабочих цилиндров установки r_c .

1.4. Построение 2D или 3D модели зон течения потока рабочей среды с учетом уточнений шагов 5,6 и 7.

2. Выбор требуемого состава рабочей среды как абразивного инструмента.

2.1. На основе анализа свойств материала обрабатываемой детали и требуемого изменения шероховатости и твердости поверхностей закрытых

каналов определяется состав рабочей среды. Определяются следующие факторы: C – процентное содержание абразива в среде по весу; d_g и r_g – диаметр и радиус абразивного зерна (m); M – зернистость (дисперсность) абразивного зерна (m); V_a – объем абразива (m^3); ρ_c – плотность носителя (полимерной основы среды) (kg/m^3); ρ_m – плотность среды (в целом) (kg/m^3); η_a – кажущаяся вязкость рабочей среды или предел текучести материала (N/m^2).

2.1.1. Материал детали влияет на выбор вида абразивного зерна. Как правило, детали с закрытыми каналами получают литьем по выплавляемым моделям из сталей аустенитно-мартенситного типа и для их поверхностей характерно наличие литейной корки. Твердость поверхности 38,0...42 HRC. Рекомендуется выбирать зерна карбида кремния черного.

2.1.2. Литейная корка имеет исходную шероховатость $Ra \approx 8,5...10$ мкм. Для таких величин выбирается зерно размером 370...430 мкм (F46 и F40). При такой зернистости абразивного зерна M его размеры d_g и r_g обеспечивают лучшие условия контактных взаимодействий.

2.1.3. По результатам предыдущих экспериментальных исследований уточняется кажущаяся вязкость РС или предел текучести материала η_a .

2.1.4. Процентное (по весу) содержание АЗ в рабочей среде C имеет обратную зависимость от длины закрытого канала и прямую зависимость от минимальной площади поперечного сечения закрытого канала.

2.1.5. Кажущаяся вязкость рабочей среды η_a зависит от плотности полимерной основы ρ_c , плотности материала абразива и его объема V_a . Эти факторы определяют плотность среды в целом ρ_m , а следовательно, и η_a .

2.2. Выбор величины давления сдвига (экструзии) P , создаваемое гидравлической системой установки.

3. Аналитический расчет фактической площади контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью. Этот расчет фактической площади контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью ведется для различных видов контакта модели контактных взаимодействий [71].

Например, для пластического контакта фактическая площадь контакта

$$A_r = \frac{P_y}{c\sigma_T} = \frac{P_y}{HB}, \quad (2.25)$$

где P_y - величина прижимающей силы, σ_T - предел текучести; c - коэффициент стеснения ($c \approx 3$); HB – твердость материала по Бриннелю.

Величина прижимающей силы варьируется в зависимости от требуемых значений сил резания.

4. Аналитический расчет шероховатости обработанной поверхности и производительности обработки выбранной рабочей средой в базовом канале.

4.1. Производительность ОАП по удалению объема материала для пластического контакта находится из выражения [71]:

$$V_{cm} = \left[\left(\frac{1}{2b} \right)^{1/v} - \left(\frac{P_y}{A_c c \sigma_T b} \right)^{1/v} \right] R \max A_c, \quad (2.26)$$

где A_c - контурная площадь контакта; b и v - коэффициенты для расчета опорной кривой профиля шероховатости; $R \max$ – максимальная величина шероховатости (для детали).

4.2. Шероховатость обработанной поверхности может быть рассчитана при условии заданной производительности по формулам [28]. Для пластического контакта максимальная шероховатость поверхности детали

$$R \max_d = \frac{1}{A_c} \left[\frac{V_{cm}}{\left(\frac{1}{2b} \right)^{1/v} - \left(\frac{P_y}{A_c c \sigma_T b} \right)^{1/v}} - R \max_{и} A_c \right] \quad (2.27)$$

где $R \max_{и}$ – максимальная шероховатость инструмента (рабочей среды).

Показатель $R \max_{и}$ носит комплексный характер и зависит от факторов, определяющих состав рабочей среды (пункты 2.1 и 2.2 данной методики).

5. Уточнение аналитических расчетов из этапов 3 и 4 в исследуемом канале с учетом расходно-напорных характеристик потока рабочей среды.

5.1. Моделирование потока рабочей среды для определения численных величин скорости и динамического давления потока. Для установленной в результате 2D или 3D моделирования конфигурации зон течения и выбранных показателей давления сдвига и состава РС в системе моделирования производится симуляция процесса течения. В результате моделирования получают поля распределения скорости и динамического давления потока РС как в закрытых каналах, так и во всех других зонах в целом.

Сравниваются картины течения потока на рисунке 2.16 в m отдельных зонах течения в закрытых каналах (3-1, 3-2, 3-3, ..., 3- m). Они должны быть подобны друг другу. Определяется влияние длины зазора на перестройку профиля потока рабочей среды. При необходимости ведется корректировка этого показателя на основании (2.22) с дальнейшим изменением модели направляющего аппарата и перестройке зон течения 2а, 2б и 2в.

Особое внимание уделяется к участкам с наибольшим градиентом скоростей и давлений потока. По результатам оценки равномерности течения потока РС, а следовательно, и равномерности условий обработки, принимается окончательное решение о конфигурации зон течения.

Далее уточняются численные значения следующих показателей: из распределения динамического давления – воздействие давления на абразивные зерна по нормали во всех зонах течения; из распределения скорости - скорость течения среды в зонах v_f . По результатам уточнения при неудовлетворительных результатах принимается решение об изменении показателей давления сдвига P и/или состава рабочей среды (C, M, η_a). Повторное моделирование проводится с учетом окончательного решения по конфигурации зон течения.

6. Верификация расчетов и экспериментальная отработка ОАП на образцах

6.1. Процесс моделирования является итерационным. Его целью является достижение таких показателей динамического давления и скорости потока РС в закрытых каналах, при которых обеспечивались требуемые значения производительности ОАП и требуемой шероховатости поверхности.

К режимам технологического процесса ОАП относятся следующие факторы: T – время обработки (с); N – количество циклов обработки (шт.); n – номер цикла обработки; P – давление сдвига (экструзии) (МПа); V – общий объем удаленного материала (m^3); V_i – объем материала, удаленного на i -м цикле (m^3); TC – температура рабочей среды ($С^\circ$).

Контролируется изменение состояния обрабатываемой заготовки: шероховатость, твердость и величина снимаемого при обработке слоя материала. Также оценивается равномерность обработки по всей длине закрытого канала.

При расхождении результатов расчетов и экспериментальной отработки определяются причины их возникновения, вносятся изменения в исходные данные. Процесс разработки ТП повторяется на другом уровне.

При положительных итогах верификации расчетов и экспериментальной отработки технологии ОАП на образцах разработанный технологический процесс внедряется в опытное производство.

2.5 Выводы по главе

При рассмотрении теоретических основ процесса обработки абразивным потоком основное внимание уделено особенностям расчета характеристик потока РС высокой вязкости и особенности контактных взаимодействий при ОАП деталей из труднообрабатываемых материалов.

Моделирование процесса ОАП закрытых каналов сложнопрофильных деталей проведено на основе визуальных исследований потока РС в каналах различных конфигураций. Установлено, что 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.

Результаты моделирования позволили сформулировать предложения по разработке научных рекомендаций для совершенствования ОАП закрытых каналов СД с использованием новой схемы обработки, обеспечивающей равномерную обработку за счет снижения погрешности базирования и закрепления детали в приспособлении и уточнения величины зазора между

направляющим аппаратом как элементом технологической оснастки и обрабатываемой деталью, а также выбора эффективного объема рабочей среды.

Предложены рекомендации по созданию направляющих аппаратов как элементов технологической оснастки для ОАП закрытых каналов СД на основе их цифровых двойников.

Описаны основные шаги по совершенствованию существующей методики разработки ТП обработки абразивным потоком относительно закрытых каналов сложнопрофильных деталей, разработан алгоритм усовершенствованной методики.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ

Результаты моделирования ОАП подтвердили применимость данного технологического процесса для обеспечения требуемой величины шероховатости поверхности ЗК. Предложения по совершенствованию технологии ОАП и методики разработки ТП обработки абразивным потоком закрытых каналов СД позволили уточнить направления экспериментальных исследований.

Эти исследования направлены на получение регрессионных зависимостей производительности, шероховатости и твердости поверхности литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей от режимов обработки, а также описания контактных взаимодействий АЗ с микронеровностями ПС каналов деталей из аустенитно-мартенситных сталей.

Для получения численных значений исследуемых факторов применено современное измерительное оборудование. Карта метрологического обеспечения качества приведена в приложении А.

3.1 Особенности обработки абразивным потоком рабочей среды высокой вязкости

Конструктивные формы деталей и их габаритные размеры, геометрические параметры и профиль поверхностей деталей, точность размеров и взаимного расположения поверхностей деталей, физико-химические свойства основного материала деталей и их поверхностного слоя, а также шероховатость и волнистость поверхностей как исходные (до обработки), так и требуемые (обеспечиваемые обработкой) – все эти факторы влияют на выбор технологии финишной обработки [122].

Известно, что для используемых для ОАП рабочих сред высокой вязкости, дополнительное применение вибрационных и ультразвуковых колебаний не дает существенного эффекта [123].

3.1.1 Исследование условий сдвига рабочих сред в зависимости от их состава

Для практического применения ОАП необходимо определить условия, при которых начинается устойчивое течение РС в отверстии. Влияние основных факторов на величину давления P_T , при которой начинается процесс течения, можно записать в функциональной форме [11]:

$$P_T = f(Ka, Kf, L/D), \quad (3.1)$$

где Ka и Kf – концентрация абразива и добавок в рабочей среде, L и D – длина и диаметр отверстия (канала для течения РС).

Для определения P_T создан капиллярный вискозиметр (рисунок 3.1), состоящий из корпуса 1 с цилиндрами разных диаметров $\varnothing 40$ и $\varnothing 10$.

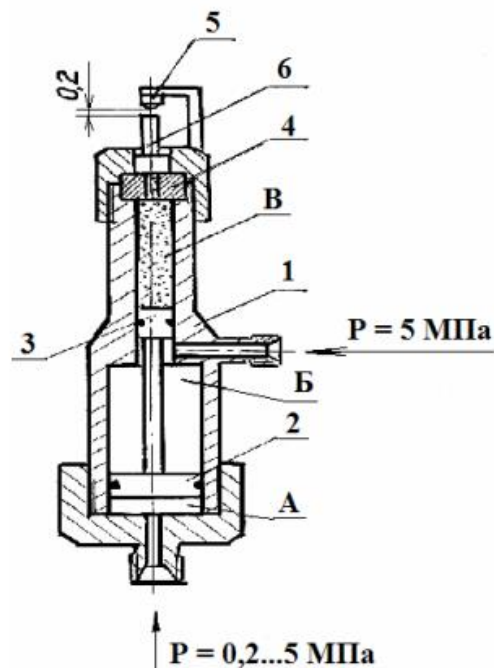


Рисунок 3.1 – Капиллярный вискозиметр [124]

В большем цилиндре перемещается поршень управления 2, соединенный штоком с рабочим поршнем 3, выталкивающим РС из полости В через отверстие в образце 4. Время установившегося движения РС $T_{ср}$ зависит от давления смеси при различном содержании абразива в РС (рисунок 3.2). Время $T_{ср}$ определялось по срабатыванию выключателя 5 вискозиметра после подъема штока сигнализатора 6. Электросхема и пневмосхема управления вискозиметром позволяют после замыкания контактов выключателя 5 обеспечивать сброс управляющего давления из полости А с подачей давления в полость Б и быстро отводить рабочий поршень вниз. Время подачи давления и срабатывания контактов выключателя 5 фиксировали электронным секундомером с точностью до 0,1 с.

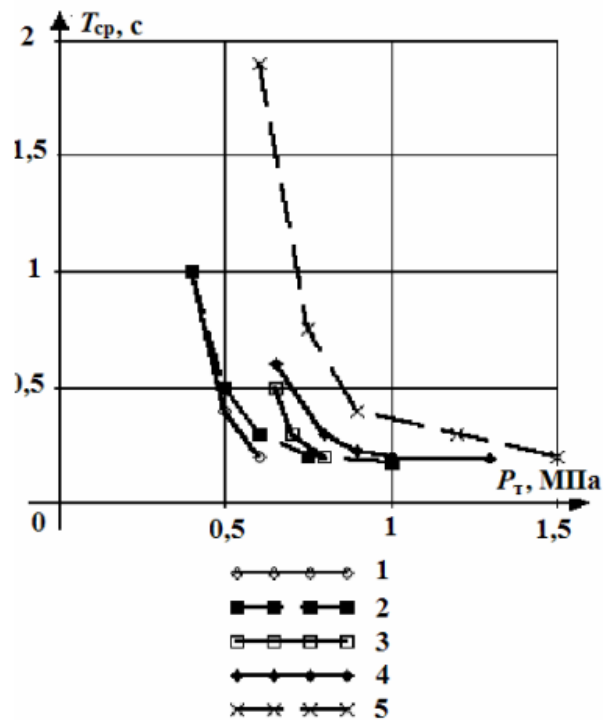


Рисунок 3.2 – Зависимость давления P_T , при котором срабатывает сигнализатор $T_{ср}$, от содержания абразива в полимере (в массовых частях): 1 – 1; 2 – 1,5; 3 – 2; 4 – 2,5; 5 – 3
[124]

Установлен следующий порядок выполнения опытов по определению порогов сдвига: отвод поршневой группы вискозиметра вниз; заправка абразивной смесью камеры В; монтаж образца и выключателя; настройка по щупу зазора между выключателем и втулкой 0,2 мм; включение подачи давления

управления в полость А от электропневмоклапана (ЭПК) на пульте управления с одновременным включением секундомера; автоматическое переключение ЭПК (дренаж из полости А и подача управляющего давления воздуха в полость В) и отключение секундомера. Если $T_{ср} \leq 0,25$ с, то опыт считался завершенным.

Эксперименты по определению влияния основных факторов на P_T проведены с использованием униформ–ротатабельного плана для четырех факторов с трехразовым повторением опыта на каждом уровне плана: $Ka - 1 \dots 2$ м. ч.; $Kf - 3 \dots 12$ %; $L - 3 \dots 10$ мм; $D - 1 \dots 9$ мм. По результатам математической обработки экспериментальных данных получена зависимость P_T от основных факторов в диапазоне их варьирования [124]:

$$P_T = -1,98 + 1,93Ka + 0,76Kf + 0,81L - 1,18D + 0,05KaKf + 0,04KaL - 0,21KaD - 0,04Kf^2 + 0,01KfD - 0,06L^2 - 0,01LD + 0,15D^2 \quad (3.2)$$

По результатам экспериментов и на основании эмпирической зависимости (3.2) сформированы графики зависимости P_T от основных факторов при некоторых характерных условиях течения РС (рисунки 3.3 3.4).

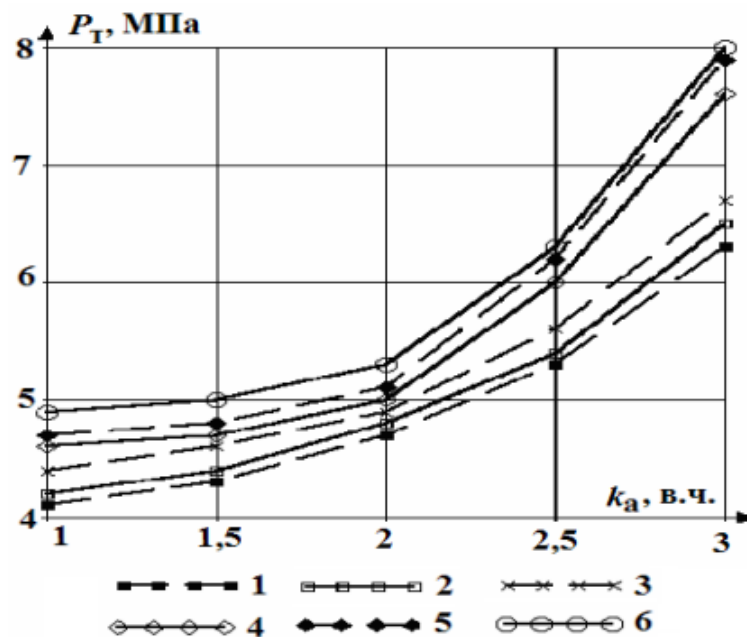


Рисунок 3.3 – Зависимость P_T от содержания абразива в РС (добавки 9 %) при различных диаметрах D (мм) и длинах L (мм) отверстий: $D = 5$: 1 – $L = 4$; 2 – $L = 7$; 3 – $L = 10$; $D = 9$: 4 – $L = 4$; 5 – $L = 7$; 6 – $L = 10$ [124]

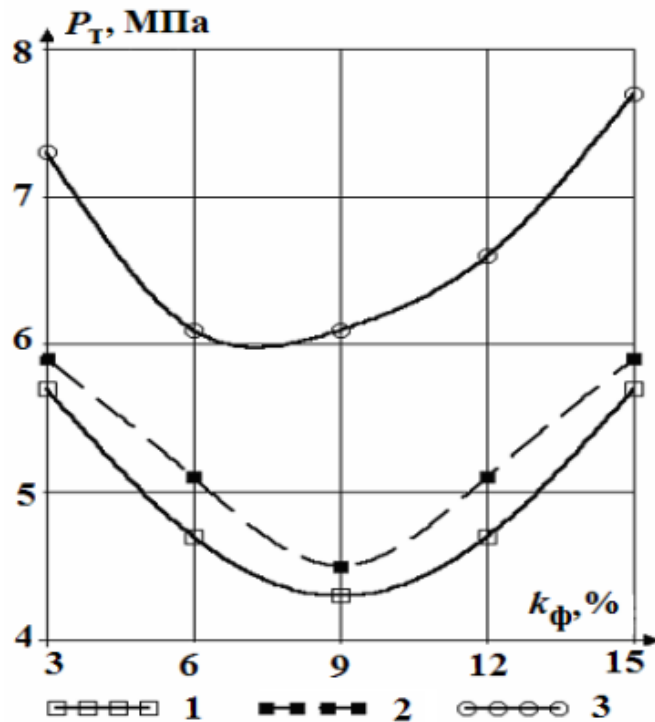


Рисунок 3.4 – Зависимость P_T от содержания добавок на поток РС через отверстие диаметром 5 мм и длиной 7 мм при содержании абразива (в массовых частях): 1 – 1,5; 2 – 2; 3 – 3 [124]

Заметно существенное влияние геометрических характеристик обрабатываемой поверхности: с увеличением длины канала и уменьшением его диаметра необходимо большее давление в подающем цилиндре для обеспечения сдвигового течения [125].

Зависимость P_T от содержания абразива в РС (рисунок 3.3) для всех длин и диаметров отверстий капилляра имеет прямую зависимость от Ka . Определена точка экстремума зависимости P_T от Kf – 9%. Такое содержание добавок рекомендовано для ОАП каналов относительно большой длины [124].

3.1.2 Исследование влияния зернистости и углов при вершине единичного абразивного зерна на процесс обработки абразивным потоком

При ОАП процесс микрорезания реализуется микровыступами единичного абразивного зерна, внедренного в вязкоупругую полимерную основу. На режущую способность АЗ влияет форма микровыступов, а именно радиус

скругления ρ и угол при вершине γ . Анализ статистических данных позволил определить средние значения углов при вершине АЗ и радиусов скругления в зависимости от зернистости абразива (таблица 3.1).

Таблица 3.1. Средние значения углов γ при вершине абразивного зерна и радиусов скругления ρ в зависимости от зернистости абразива [126]

Зернистость, мкм	Среднее значение ρ , мкм	Углы при вершине зерна γ , град.
40	25	110
25	19	108,5
26	13	106
3	0,65	-

Для описания взаимодействия в качестве модели выбрана трехэлементная механическая модель Бингама (рисунок 3.5, а), состоящая из элементов Гука с модулем упругости G , Ньютона с вязкостью η и Сен-Венана с пределом текучести σ_T . При этом принято допущение, что при ОАП напряжение сдвига направлено перпендикулярно модулю упругости (рисунок 3.5, б). Выбранная модель позволяет моделировать процесс резания и пластического отеснения индентором. В качестве критерия оценки влияния геометрии АЗ на шероховатость поверхности выбрана глубина царапины $h_{ц}$.

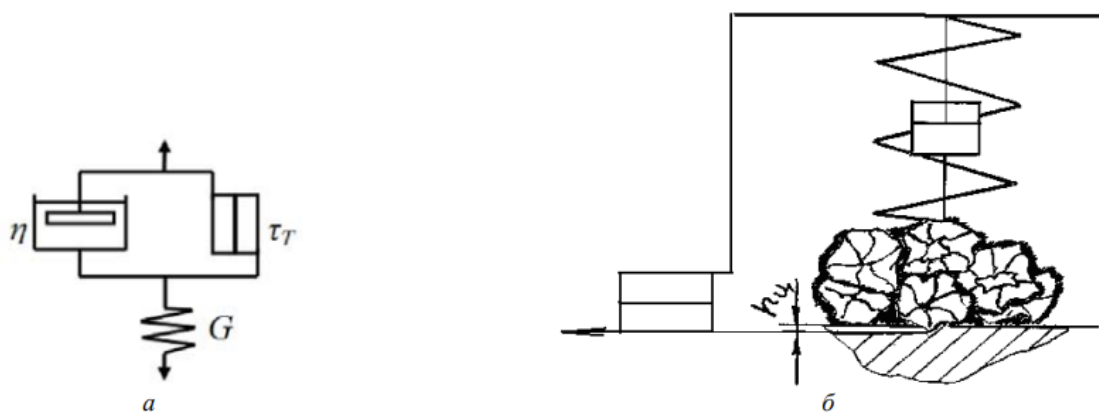


Рисунок 3.5 – Модель контактных взаимодействий единичного абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью при ОАП: а) схема; б) приложение нагрузки [126]

Исследование влияние геометрических характеристик АЗ на качество поверхности проведены на установке МР-1 (рисунок 3.6, а) с подпружиненным

индентором, изготовленным из твердого сплава ВК-10М ($HKA = 88$) (рисунок 3.6, б). Углы заточки индентора варьировались с шагом в 30° (60° , 90° и 120°), что соответствует средним статистическим значениям углов микровыступов АЗ. Исследуемые образцы изготовлены из стали 45, стали 12Х18Н10Т и сплава ХН70Ю. После операции тонкого шлифования их поверхность представлена структурой с поперечной шероховатостью $Ra = 0,2$ мкм.

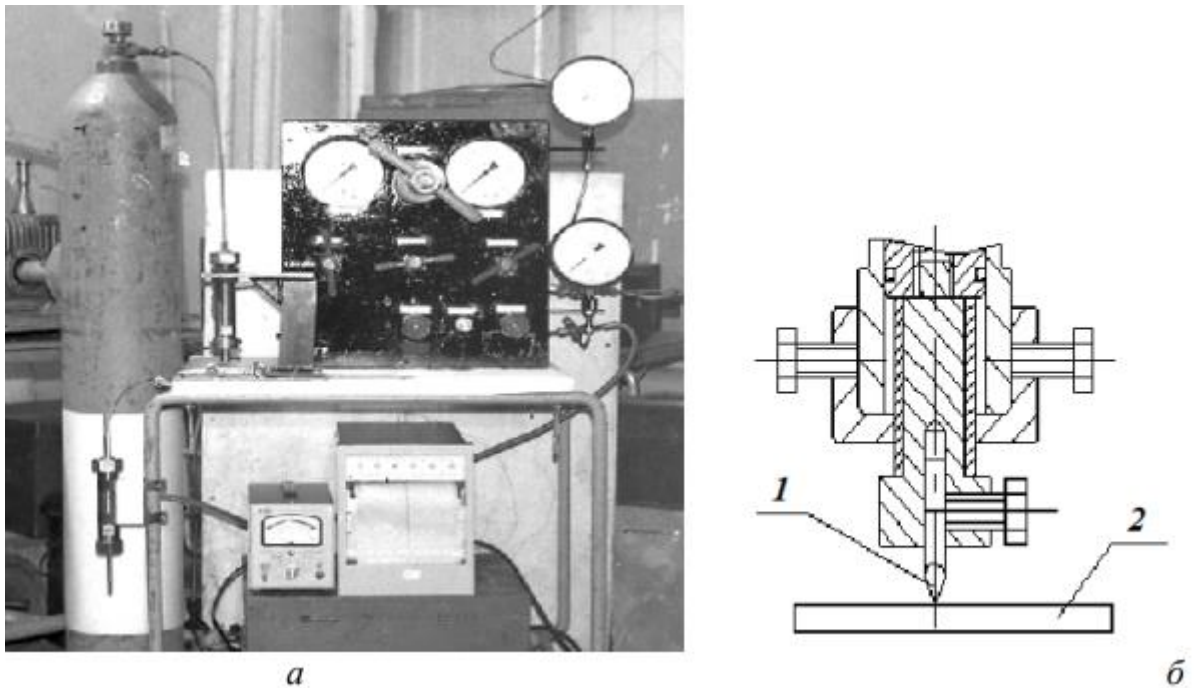


Рисунок 3.6 – Установка МР 1: а) общий вид; б) схема закрепления индентора в штоке прижимного цилиндра, где 1 – индентор; 2 – образец [126]

В результате исследования выяснено, что на начальном этапе кривых независимо от угла заточки индентора наблюдается замедленное углубление царапины вследствие недостаточности силы резания (рисунок 3.7). С увеличением угла заточки индентора начальная сила формообразования стружки пропорционально ему возрастает. С ростом силы резания (пластического оттеснения) глубина царапины также пропорционально увеличивается.

Таким образом, изменение угла заточки индентора существенно изменяет силы резания. Например, при изменении угла элемента, контактирующего с

поверхностью обработки, с 60° до 120° сила резания увеличивается в 1,5...2 раза (рисунок 3.8) [126].

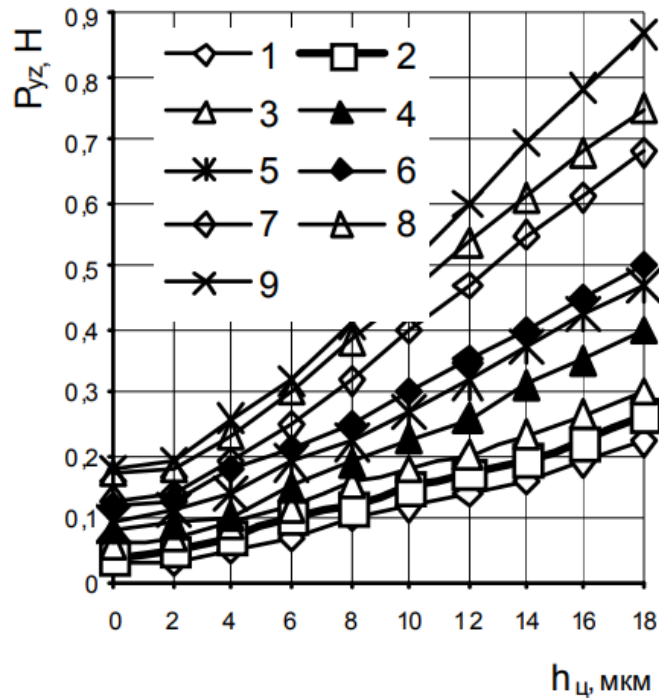


Рисунок 3.7 – Зависимость глубины царапины $h_{ц}$ от результирующей силы резания $P_{уз}$ при углах резания: 120° - кривые 1,2,3; 90° - кривые 4,5,6; 60° - кривые 7,8,9 и материалов: сталь ХН70Ю - кривые 3,6,9; сталь 12Х18Н10Т - кривые 2,5,8; сталь 45 - кривые 1,4,7. [126]

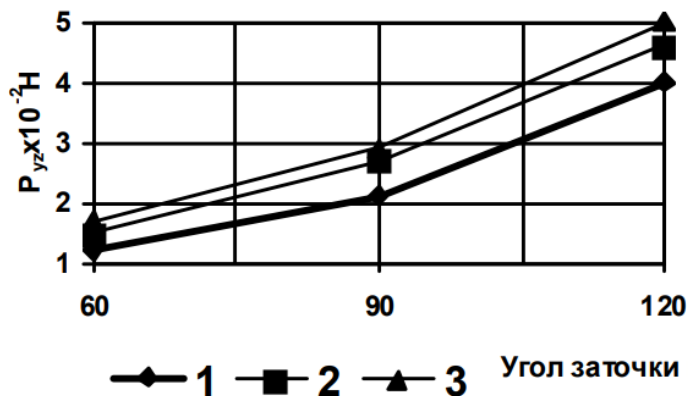


Рисунок 3.8 – Зависимость силы резания $P_{уз}$ от угла заточки индентора при глубине царапины $h_{ц} = 1,0$ мкм: 1 – сталь 45, 2 – сталь 12Х18Н10Т, 3 – ХН70Ю [126]

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

3.2 Экспериментальные исследования процесса обработки абразивным потоком литых образцов из стали 08X14H7МЛ

По результатам исследований предела текучести и изменения условий сдвига РС в зависимости от их состава, а также влияния зернистости и углов при вершине АЗ выбраны перспективные технологические режимы ОАП. На основании проведенной ранее обработки технологии ОАП закрытых каналов крыльчаток [48,49] 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 Ra 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 Ka – 40, 50, 60 % и каучука СКТ – 60, 50 и 40 % соответственно; давление сдвига гидравлической системы P – 8, 10, 12 МПа. Для математической обработки произведено кодирование переменных $x_1 = Ka$, $x_2 = P$, $y_1 = Ra$, $y_2 = h$ [127].

Обработка проведена на установке УЭШ-100 (рисунок 1.10), количество циклов при обработке – 60, время одного цикла ≈ 40 с. Для проведения ОАП было создано приспособление, имитирующее внутренний канал литой заготовки (рисунок 3.9). Корпус приспособления 1 имеет сквозной внутренний канал, а также паз для размещения съемной части приспособления. На торцах корпуса 1 есть две сопрягаемых поверхности, которые устанавливаются в рабочие цилиндры установки для обработки абразивным потоком. Съемная часть состоит из плиты 2, основания 3 с выполненным в нем криволинейным каналом 6. В пазы канала размещаются съемные литые образцы 4 и 5. Сверху канал 6 с образцами 4 и 5 закрывается крышкой (на рисунке 3.9 не показана) при помощи винтов. В крышке выполнены пазы под верхнюю часть образцов.

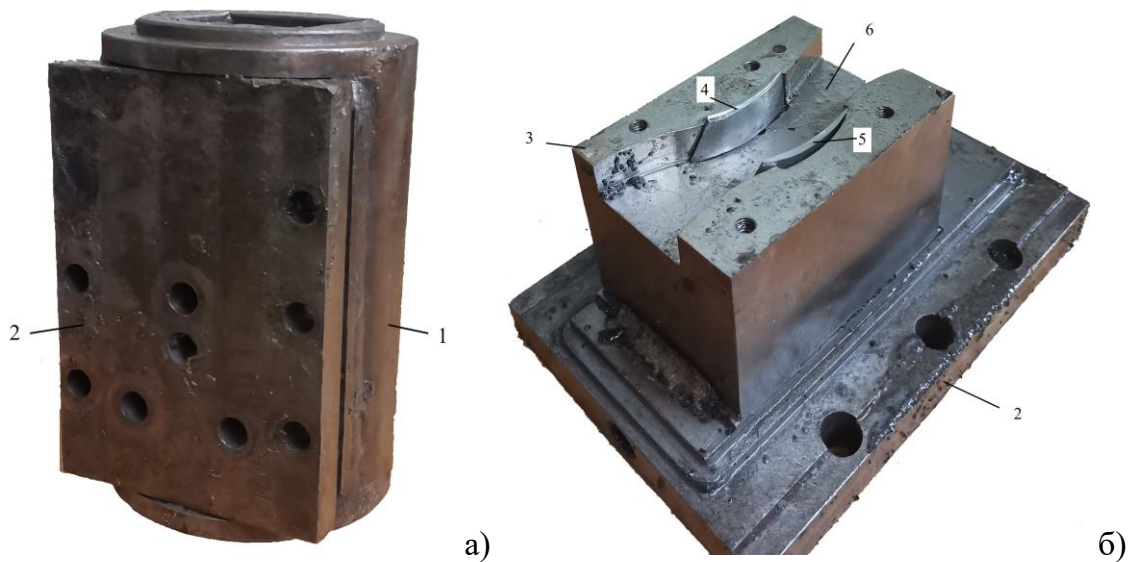


Рисунок 3.9 - Приспособление – имитатор внутреннего канала литой заготовки: а) общий вид; б) съемная часть [2]

При установке собранной съемной части приспособления в корпус 1 криволинейный канал 6 совместно с внутренним каналом корпуса образует полость для течения РС (имитирует закрытый канал). В свою очередь, съемные литые образцы имитируют перо лопатки и показаны на рисунке 3.10.

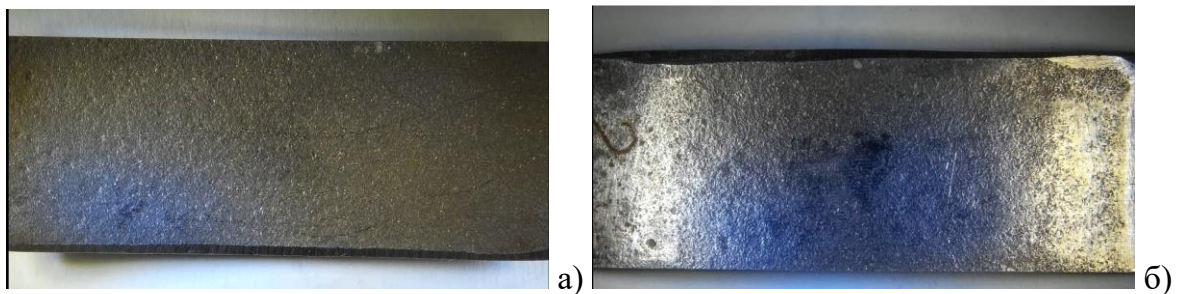


Рисунок 3.10 - Съемный литой образец – имитатор пера лопатки из стали 08X14H7МЛ: а) вогнутая часть; б) выпуклая часть [2]

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 ПС образцов определялись на профилометре модели *MarSurf* M300. Фактическая твердость ПС образцов измерена на приборе *BUEHLER MICROMET* 5100.

Исходная шероховатость ПС вогнутых образцов $Ra = 8,9...9,3$ мкм, выгнутых образцов – $Ra = 8,7...9,1$ мкм. Исходная твердость ПС вогнутых образцов $38,5...40,4 HRC$, выгнутых образцов – $39,5...40,5 HRC$.

Результаты обработки абразивным потоком 54 образцов в зависимости от факторов X1 и X2 приведены в таблицах 3.2, 3.3, 3.4 и 3.5.

Таблица 3.2. Шероховатость ПС вогнутых образцов после обработки абразивным потоком в зависимости от процентного содержания абразивного наполнителя и давления сдвига гидравлической системы

Факторы		Шероховатость Ra , мкм						Среднее значение по 6 опытам Ra , мкм
X1	X2	1	2	3	4	5	6	
1	1	2,80	2,77	2,82	2,81	2,78	2,82	2,80
-1	1	2,89	2,87	2,91	2,91	2,90	2,92	2,90
1	-1	2,74	2,77	2,74	2,74	2,76	2,75	2,75
-1	-1	2,83	2,80	2,81	2,77	2,78	2,81	2,80
1	0	2,59	2,60	2,59	2,61	2,61	2,60	2,60
-1	0	2,83	2,85	2,82	2,88	2,86	2,86	2,85
0	1	2,70	2,68	2,72	2,71	2,69	2,70	2,70
0	-1	2,82	2,77	2,80	2,81	2,78	2,82	2,80
0	0	2,92	2,87	2,91	2,91	2,89	2,90	2,90

Таблица 3.3. Шероховатость ПС выгнутых образцов после обработки абразивным потоком в зависимости от процентного содержания абразивного наполнителя и давления сдвига гидравлической системы

Факторы		Шероховатость Ra , мкм						Среднее значение по 6 опытам Ra , мкм
X1	X2	1	2	3	4	5	6	
1	1	2,42	2,41	2,42	2,43	2,45	2,45	2,43
-1	1	2,45	2,45	2,46	2,47	2,47	2,46	2,46
1	-1	2,60	2,59	2,62	2,61	2,58	2,60	2,60
-1	-1	2,69	2,73	2,70	2,69	2,69	2,70	2,70
1	0	2,55	2,53	2,57	2,56	2,54	2,55	2,55
-1	0	2,57	2,60	2,60	2,57	2,58	2,56	2,58
0	1	2,37	2,38	2,37	2,37	2,39	2,40	2,38
0	-1	2,65	2,66	2,66	2,66	2,63	2,64	2,65
0	0	2,52	2,48	2,50	2,50	2,51	2,49	2,50

Таблица 3.4. Твердость ПС вогнутых образцов после обработки абразивным потоком в зависимости от процентного содержания абразивного наполнителя и давления сдвига гидравлической системы

Факторы		Твёрдость h , НВ						Среднее значение по 6 опытам h , НВ
X1	X2	1	2	3	4	5	6	
1	1	40,4	40,2	40,3	40,1	40,1	40,1	40,2
-1	1	40,1	40	39,9	39,9	40,10	40	40,0
1	-1	38,8	39,1	39	39,1	39,1	38,9	39,0
-1	-1	38,6	38,5	38,4	38,4	38,6	38,5	38,5
1	0	39,3	39,3	39,4	39,5	39,5	39,4	39,4
-1	0	39,2	39,2	39,2	39,1	39,3	39,2	39,2
0	1	40,4	40,5	40,5	40,3	40,4	40,3	40,4
0	-1	38,8	38,8	38,6	38,8	38,6	38,6	38,7
0	0	39,9	39,5	39,6	39,7	39,7	39,8	39,7

Таблица 3.5. Твердость ПС выгнутых образцов после обработки абразивным потоком в зависимости от процентного содержания абразивного наполнителя и давления сдвига гидравлической системы

Факторы		Твёрдость h , НВ						Среднее значение по 6 опытам h , НВ
X1	X2	1	2	3	4	5	6	
1	1	40,3	40,4	40,2	40,3	40,3	40,3	40,3
-1	1	40,2	40,1	40,2	40,1	40,30	40,3	40,2
1	-1	39,8	39,7	39,6	39,7	39,7	39,7	39,7
-1	-1	39,6	39,5	39,4	39,4	39,6	39,5	39,5
1	0	39,8	39,8	39,9	40	40	39,9	39,9
-1	0	39,8	39,8	39,7	39,7	40,1	39,7	39,8
0	1	40,5	40,6	40,6	40,4	40,4	40,5	40,5
0	-1	39,6	39,7	39,5	39,6	39,6	39,6	39,6
0	0	40,1	39,9	40,2	39,8	40,1	39,9	40,0

Графики зависимости изменения шероховатости ПС вогнутых образцов (рисунок 3.11) и выгнутых образцов (рисунок 3.12) от степени наполнения РС абразивом (X1) и давлением сдвига P демонстрируют наличие экстремумов эмпирических зависимостей в области 50% наполнения АЗ для всего рассматриваемого интервала P . При таких соотношениях регулируемых факторов X1 и X2 РС в обрабатываемом канале осуществляет сдвиговое течение

с лучшими сочетаниями вязких и упругих свойств. Изменение величины шероховатости ПС образцов имеет прямую зависимость от P .

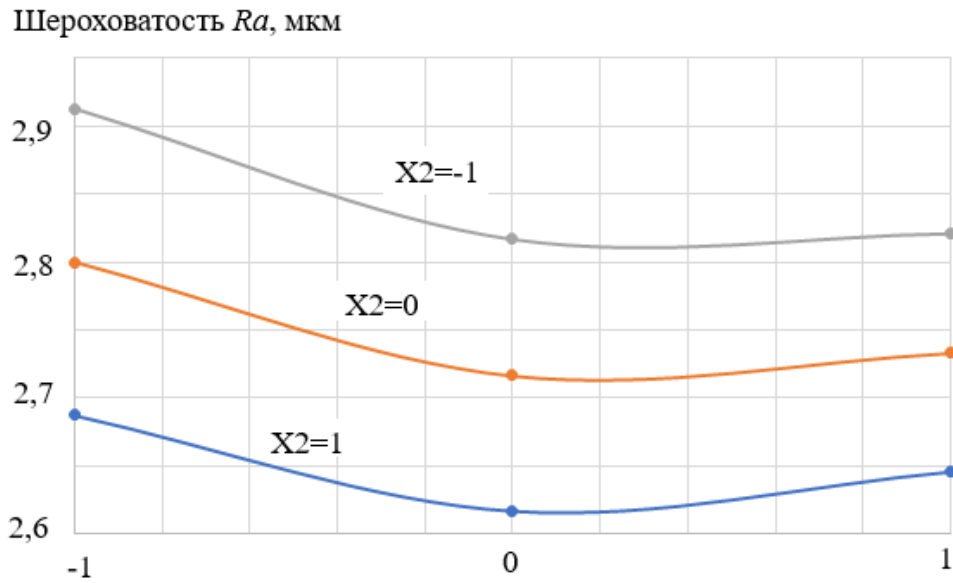


Рисунок 3.11 - График зависимости шероховатости ПС вогнутых образцов от степени наполнения рабочей среды абразивным зерном Ka ($X1$) и давлением сдвига P ($X2$) [127]

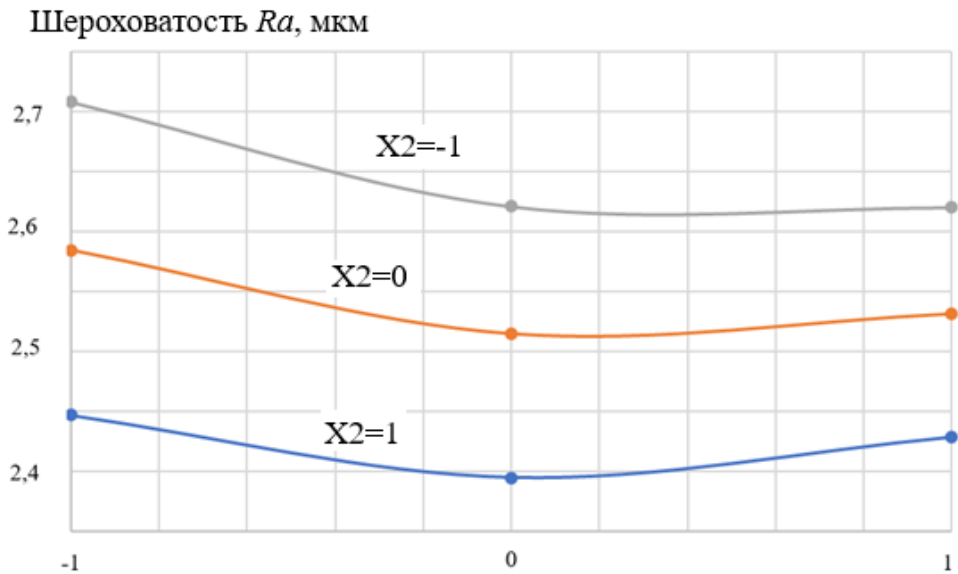


Рисунок 3.12 - График зависимости шероховатости ПС выгнутых образцов от степени наполнения рабочей среды абразивным зерном Ka ($X1$) и давлением сдвига P ($X2$) [127]

В кодированном выражении эмпирическая зависимость шероховатости ПС вогнутых образцов определена как

$$Y1 = 2,72 - 0,33X1 - 1,0X2 + 0,5X1^2 + 0,13X1X2 \quad (3.3)$$

Статистические характеристики: максимальная дисперсия $S^2_{\max} = 0,04$; дисперсия воспроизводимости среднего значения $S^2(y) = 0,162$; дисперсия откликов первого рода $S_1^2 = 608,1$ (отлична от нуля, т.к. $S_1^2/S^2(y) = 3573,5 > F_{0,05}(2;18) = 3,55$); дисперсия откликов второго рода $S_2^2 = 696104$ (значительно отлична от нуля, т.к. $S_2^2/S^2(y) = 4296938 > F_{0,05}(3;18) = 5,09$); остаточная дисперсия $S^2_{\text{ост}} = 7,93$; значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ равняется $F_{\text{ад}} = 7,93/1,564 = 5,07$, что меньше 5,09. Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

В кодированном выражении эмпирическая зависимость шероховатости ПС выгнутых образцов определена как

$$Y_1 = 2,51 - 0,27X_1 - 1,13X_2 + 0,43X_1^2 + 0,07X_2^2 + 0,18X_1X_2 \quad (3.4)$$

Статистические характеристики: максимальная дисперсия $S^2_{\max} = 0,023$; дисперсия воспроизводимости среднего значения $S^2(y) = 0,156$; дисперсия откликов первого рода $S_1^2 = 1220$ (отлична от нуля, т.к. $S_1^2/S^2(y) = 7820,5 > F_{0,05}(2;18) = 3,55$); дисперсия откликов второго рода $S_2^2 = 977868$ (значительно отлична от нуля, т.к. $S_2^2/S^2(y) = 6268385 > F_{0,05}(3;18) = 5,09$); остаточная дисперсия $S^2_{\text{ост}} = 7,61$; значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ равняется $F_{\text{ад}} = 7,61/1,564 = 4,87$, что меньше 5,09. Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

Графики зависимости изменения твердости ПС вогнутых образцов (рисунок 3.13) и выгнутых образцов (рисунок 3.14) от степени наполнения РС абразивом (X_1) и давлением сдвига P также показывают наличие экстремумов эмпирических зависимостей в области 50% наполнения АЗ для всего рассматриваемого интервала P . При таких соотношениях регулируемых факторов X_1 и X_2 РС в обрабатываемом канале осуществляет сдвиговое течение с лучшими сочетаниями вязких и упругих свойств. Изменение величины твердости ПС образцов имеет прямую зависимость от P .

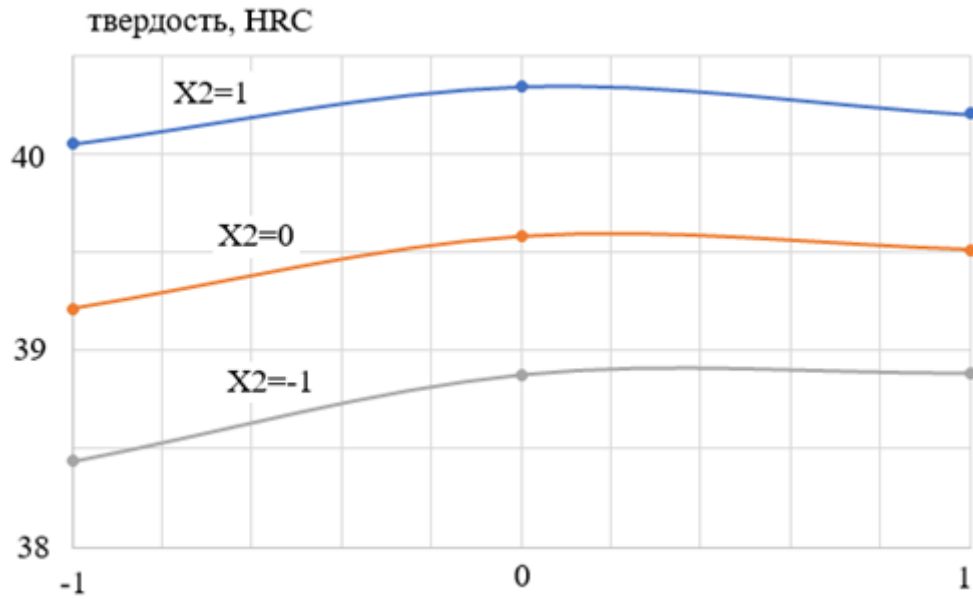


Рисунок 3.13 - График зависимости твердости ПС вогнутых образцов степени наполнения рабочей среды абразивным зерном Ka (X_1) и давлением сдвига P (X_2) [127]

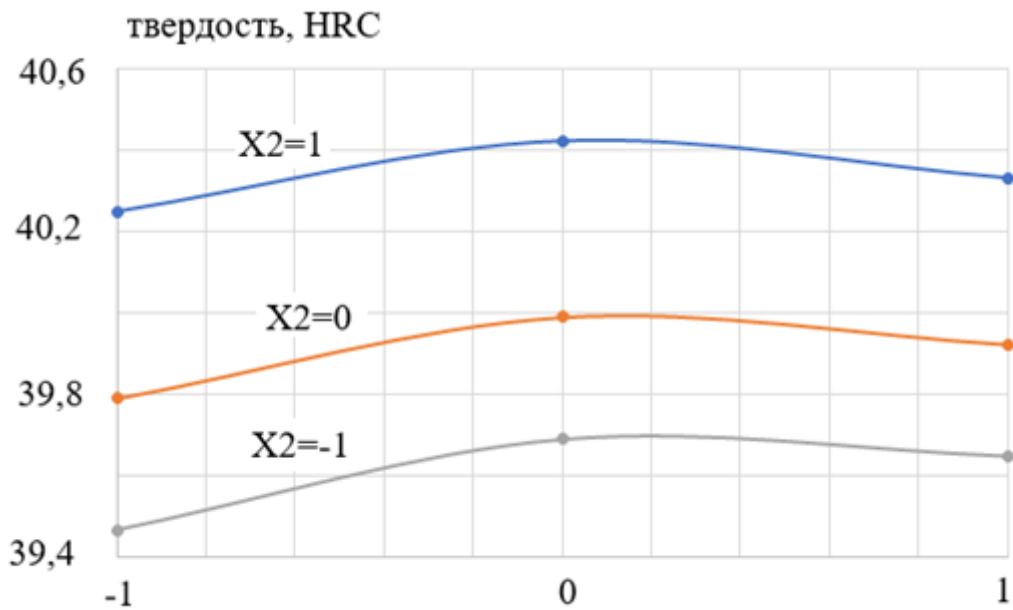


Рисунок 3.14 - График зависимости твердости ПС выгнутых образцов степени наполнения рабочей среды абразивным зерном Ka (X_1) и давлением сдвига P (X_2) [127]

В кодированном выражении эмпирическая зависимость твердости ПС вогнутых образцов определена как

$$Y_1 = 39,58 + 0,15X_1 + 0,73X_2 - 0,22X_1^2 + 0,03X_2^2 - 0,08X_1X_2 \quad (3.5)$$

Статистические характеристики: максимальная дисперсия $S^2_{\max} = 0,017$; дисперсия воспроизводимости среднего значения $S^2(y) = 0,2$; дисперсия откликов первого рода $S_1^2 = 907,7$ (отлична от нуля, т.к. $S_1^2/S^2(y) = 4538,5 > F_{0,05}(2;18) = 3,55$); дисперсия откликов второго рода $S_2^2 = 429898$ (значительно отлична от нуля, т.к. $S_2^2/S^2(y) = 2149490 > F_{0,05}(3;18) = 5,09$); остаточная дисперсия $S^2_{\text{ост}} = 0,027$; значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ равняется $F_{\text{ад}} = 0,027/1,564 = 0,02$, что меньше 5,09. Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

В кодированном выражении эмпирическая зависимость твердости ПС выгнутых образцов определена как

$$Y_1 = 39,99 + 0,07X_1 + 0,37X_2 - 0,13X_1^2 + 0,07X_2^2 - 0,03X_1X_2 \quad (3.6)$$

Статистические характеристики: максимальная дисперсия $S^2_{\max} = 0,02$; дисперсия воспроизводимости среднего значения $S^2(y) = 0,26$; дисперсия откликов первого рода $S_1^2 = 244,6$ (отлична от нуля, т.к. $S_1^2/S^2(y) = 940,8 > F_{0,05}(2;18) = 3,55$); дисперсия откликов второго рода $S_2^2 = 478096$ (значительно отлична от нуля, т.к. $S_2^2/S^2(y) = 1838830 > F_{0,05}(3;18) = 5,09$); остаточная дисперсия $S^2_{\text{ост}} = 0,07$; значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ равняется $F_{\text{ад}} = 0,07/1,564 = 0,05$, что меньше 5,09. Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

По результатам исследования и полученных зависимостей (3.3)...(3.6) ОАП деталей из стали 08Х14Н7МЛ рекомендовано проводить рабочей средой следующего состава: степень наполнения основы рабочей среды белым электрокорундом – 50 %. Максимальное давление сдвига гидравлической системы P 12 МПа ограничено техническими возможностями установки.

3.3 Анализ контактных взаимодействий абразивных зерен с микронеровностями поверхности каналов деталей из аустенитно-мартенситных сталей на основе исследований процесса обработки абразивным потоком литых образцов

Поверхностный слой образцов до обработки (рисунок 3.15) представлен литейной коркой с шероховатостью произвольного направления величиной $Ra = 8,7...9,1$ мкм (выгнутые образцы) и $Ra = 8,9...9,3$ мкм (вогнутые образцы). Твёрдость ПС 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.

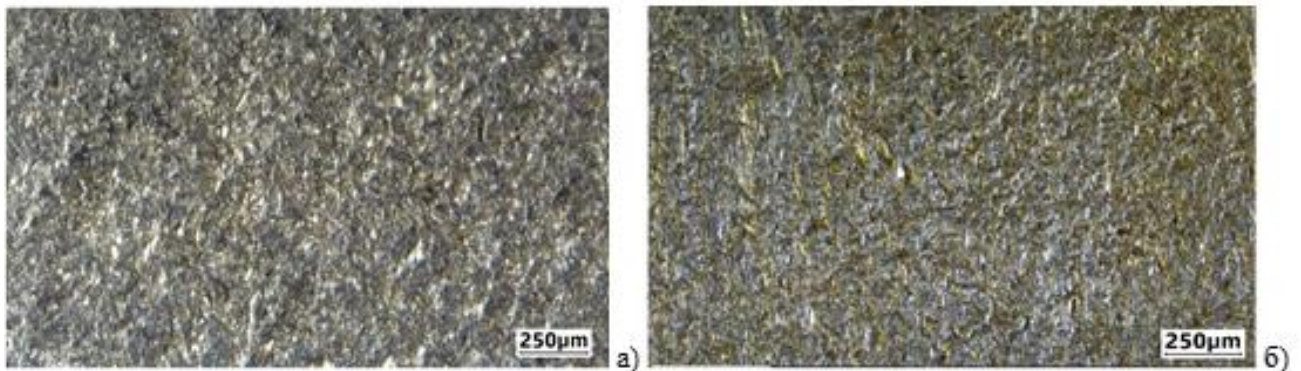


Рисунок 3.15 - Поверхность съемного литого образца до обработки: а) вогнутый; б) выгнутый

После тридцати циклов обработки структура поверхности образцов (рисунок 3.16) изменилась. Большая часть выступов исходной литейной корки удалено. На поверхности виден комплекс отдельных царапин. Приблизительная ширина царапин $5...20$ мкм. Наблюдаются отдельные выступы со срезанными вершинами, а также ряд впадин исходной литейной корки. Шероховатость ПС 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 ПС образцов возросла до $41,5...43,3$ HRC (выгнутые образцы) и до $41,0...42,8$ HRC (вогнутые образцы).

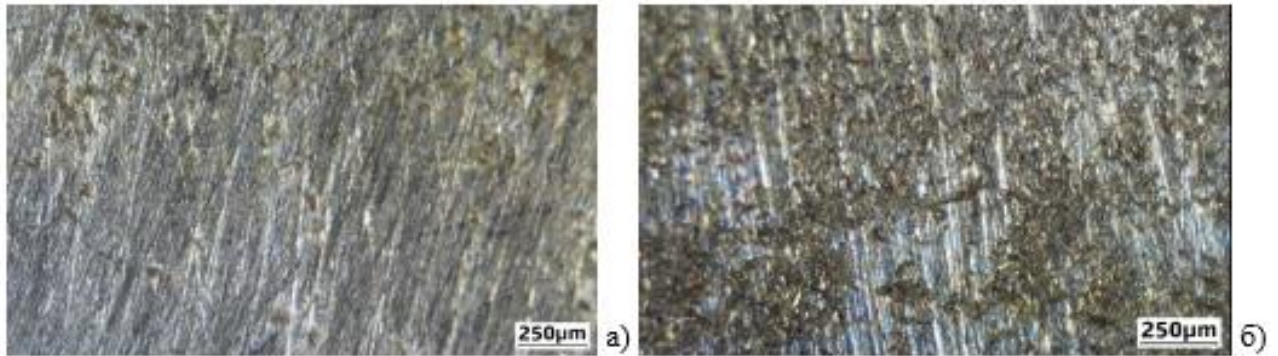


Рисунок 3.16 - Поверхность съемного литого образца после 30 циклов ОАП: а) вогнутый; б) выгнутый.

После 60 циклов ОАП структура ПС образцов (рисунок 3.17), в основном, представлена комплексом царапин, направление которых совпадает с направлением течения рабочей среды. Приблизительная ширина царапин 3-5 мкм. Наблюдаются локальные зоны со остаточными впадинами исходной литейной корки. Шероховатость ПС приобрела направление, параллельное направлению потока рабочей среды при обработке. Величина измеренной шероховатости для выгнутых образцов $Ra = 2,4 \dots 2,6$ мкм, для вогнутых образцов - $Ra = 2,6 \dots 2,8$ мкм. Твёрдость образцов достигла величины 44,5...45,5 HRC на выгнутых образцах и 43,5...45,0 HRC на вогнутых образцах.

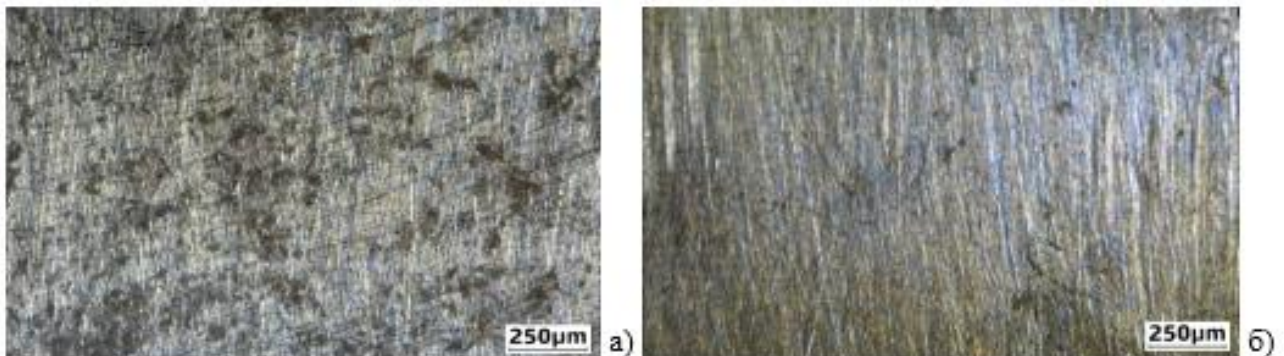


Рисунок 3.17 - Поверхность съемного литого образца после 60 циклов ОАП: а) вогнутый; б) выгнутый

Профилограмма литейной корки (рисунок 3.18, 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 сердцевины 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 3.18, б) свидетельствует о существенном выравнивании профиля и увеличении его опорной длины. Показатель Rp уменьшился до диапазона от 3,2 до 4 мкм, а показатель Rk также снизился до значений от 2,5 до 3,2 мкм. Материальная составляющая $Mr1$ увеличилась до 11 %, а $Mr2$ – до 85 % [2].

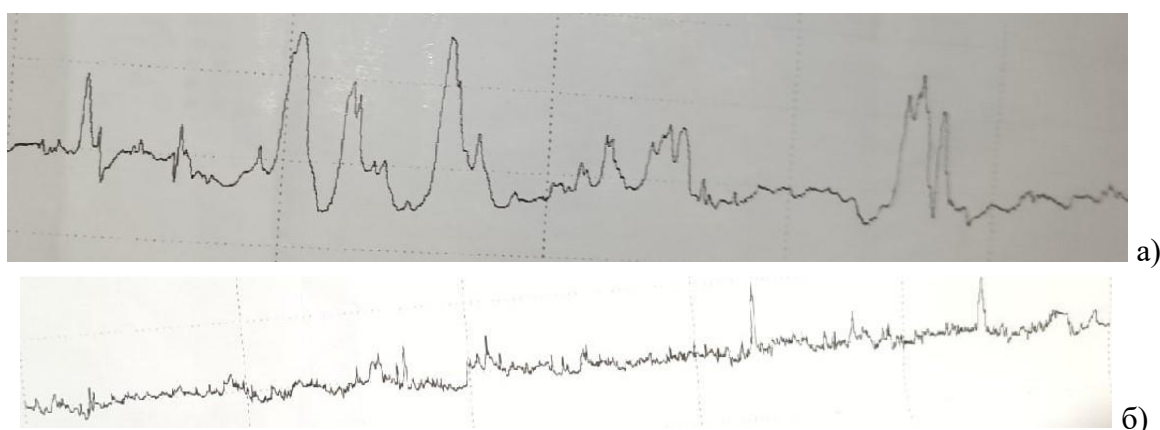


Рисунок 3.18 – Профилограмма поверхности выгнутого съемного литого образца: а) до обработки; б) после 60 циклов ОАП

Известно, что единичное АЗ при ОАП представляет собой многогранный керамический инструмент. При его контакте с микронеровностями обрабатываемой поверхности могут возникать различные виды контакта. Вид контакта зависит от твёрдости и шероховатости обрабатываемой поверхности и абразивного зерна. Как правило, на уровне микровыступов зерна происходят микрорезание и пластическое оттеснение, а на уровне абразивного зерна – упругая и пластическая деформации [128].

Изображение единичного зерна электрокорунда белого 25А F70 на поверхностной литевой корки вогнутого образца (рисунок 3.19) демонстрирует, что из-за больших размеров АЗ может одновременно вступать в контакт с несколькими микронеровностями. При этом на каждой микронеровности

образуется элементарная фактическая площадь касания A_{ri} . Суммарная площадь контактных зон микронеровностей абразивного зерна и обрабатываемой поверхности образует фактическую площадь касания [128].



Рисунок 3.19 - Единичное зерно электрокорунда белого 25А F70 на поверхностной литьевой корке вогнутого образца

Схема процесса контактного взаимодействия АЗ с микронеровностями обрабатываемой поверхности (рисунок 3.20) показывает, что составляющие силы резания обусловлены касательными и нормальными напряжениями, возникающими в потоке РС. При установившемся течении величина напряжений зависит от градиента скорости потока от точки контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью к верхней грани зерна.

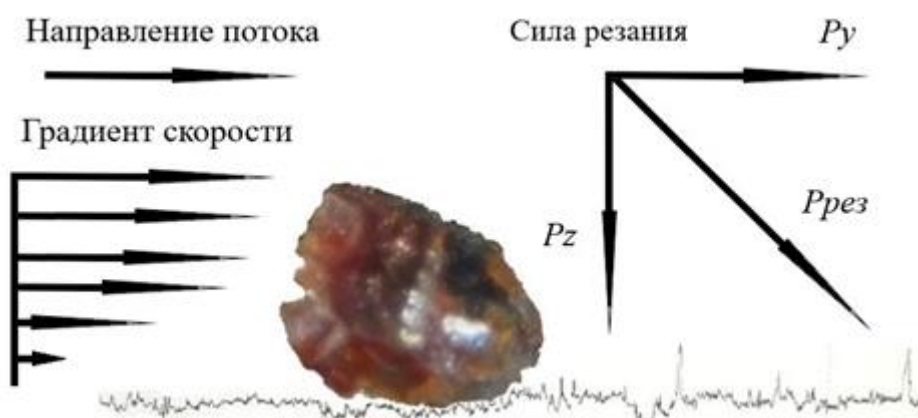


Рисунок 3.20 - Схема процесса контактного взаимодействия абразивного зерна с микронеровностями обрабатываемой поверхности

Возникновение градиента скорости потока вызвано как гидродинамикой процесса (условие «прилипания» потока к стенке канала), так и внешним трением при контакте зерна с обрабатываемой поверхностью.

Известные из трибологии условия перехода с одного вида контакта на другой при ОАП получены на основе общеизвестных зависимостей трибологии. Эти условия выполняются на всех уровнях фактической площади касания. При этом составляющие силы резания P_z и P_y могут достигать величин от 2,1 Н до 2,28 Н на контурной площади касания [72].

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

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 A_{ri} образуются, как на вершинах, так и боковых поверхностях местных выступов корки. На этих участках преобладают механизмы микрорезания на уровне отдельных микровыступов зерна. Характер царапин на ПС литого образца (рисунок 3.21) свидетельствует, что вышеназванные микровыступы могут иметь различные размеры.

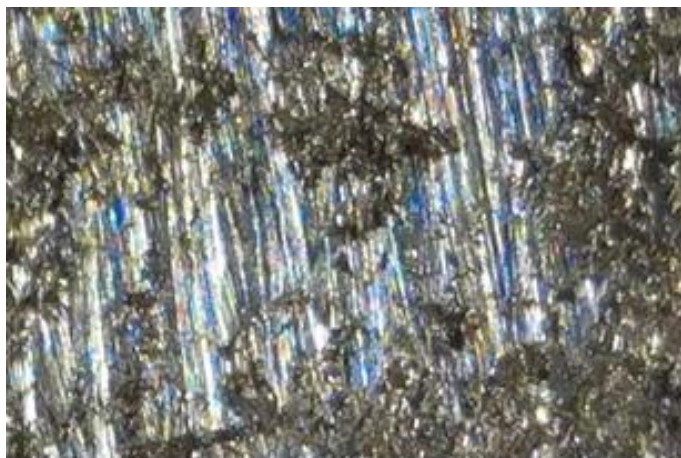


Рисунок 3.21 - Царапины на поверхности литого образца

Впадины профиля не меняют своей конфигурации, что говорит об отсутствии процесса пластической деформации оснований выступов профиля шероховатости. Возрастание величины твёрдости ПС образца на этом этапе ОАП вызвано увеличением процента материальной составляющей средней линии профиля шероховатости из-за снятия слоя металла с локальных выступов литевой корки.

В процессе обработки постепенно удаляется материал с вершук локальных выступов и с боковых поверхностей. При этом элементарные фактические площади касания A_{ri} уменьшаются.

После того как слой литевой корки удаляется практически полностью (присутствуют лишь отдельные остаточные впадины) меняется механизм контактных взаимодействий. АЗ контактирует уже не с материалом корки, а с основным металлом заготовки в условиях равновесного контакта потока рабочей среды и поверхностного слоя образца. В контакт вступает существенно меньшая часть АЗ, при этом съём металла (микрорезание) осуществляется на уровне ее микровыступов, а площадь A_{ri} 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 ПС в зоне контакта.

Необходимо учитывать влияние изменения условий контактных взаимодействий на условия обработки. В связи с этим обстоятельством выделен второй (окончательный) этап обработки, на котором формируется требуемое состояние поверхностного слоя. Это предположение подтверждается глубиной и шириной рисок на обработанной поверхности (рисунок 3.17, б). 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.

3.4 Выводы по главе

В ходе экспериментальных исследований особенностей и производительности ОАП рабочей среды высокой вязкости установлены эмпирические зависимости предела текучести и изменения условий сдвига рабочих сред от их состава, а также влияния зернистости и углов при вершине единичного абразивного зерна на процесс обработки.

После 60 циклов ОАП с поверхности образцов полностью удалена литейная корка, а шероховатость приобрела направление, параллельное направлению потока РС при ОАП. Результатом обработки является уменьшение исходной шероховатости выгнутых образцов с $Ra = 8,7 \dots 9,1$ мкм до $Ra = 2,4 \dots 2,6$ мкм, для вогнутых образцов с $Ra = 8,9 \dots 9,3$ мкм до $Ra = 2,6 \dots 2,8$ мкм. Еще одним результатом обработки является повышение твердости образцов от $38,5 \dots 40,5$ HRC до величины $44,5 \dots 45,5$ HRC на выгнутых образцах и $43,5 \dots 45,0$ HRC на вогнутых образцах, что превышает определяемую ОСТ 1 90005-91 твердость поверхности литых заготовок из стали 08X14H7МЛ – $33 \dots 39$ HRC.

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, которые в отличие от предыдущих режимов обработки, позволяют реализовывать ее в один этап, тем самым повышая производительность обработки на 20%.

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.

4. ОТРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Результаты экспериментальных исследований ОАП подтвердили, что этот процесс обеспечивает требуемую величину и равномерность шероховатости поверхности закрытых каналов СД, а также повышает твердость поверхностного слоя.

Следующим этапом является практическая отработка технологического процесса ОАП закрытых каналов крыльчаток. Обобщение результатов исследований положено в основу рекомендаций по совершенствованию по производству крыльчаток ТНА.

4.1 Повышение производительности и равномерности обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчатки насоса турбонасосного агрегата за счет использования усовершенствованного технологического процесса

При обработке заготовок из аустенитно-мартенситных сталей в отожжённом состоянии получить поверхности высокого класса шероховатости затруднительно [12]. Сталь 08X14H7MЛ плавят в открытых или вакуумных индукционных печах. Отливки отвечают требованиям по прочностным и пластическим характеристикам, однако в них обнаружены такие макродефекты, как зональные рыхлоты площадью до 10-14 мм² [13].

Усовершенствование технологического процесса ОАП закрытых каналов крыльчатки ТНА осуществлено на основании разработанного нами способа обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток (рисунок 2.12) [99].

Обработка крыльчатки проведена на опытно-промышленной установке УЭШ-100 (рисунок 4.1). В качестве основы рабочей взят каучук синтетический

диметилсилоксановый термостойкий СКТ (ГОСТ 14680–74, ТУ 38.103694–89). 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 [130].

Повышенное содержание АЗ карбида кремния, по сравнению с составами рабочих сред предыдущих исследований [2] позволило повысить жесткость рабочей среды с сохранением способности сдвигового течения (образования абразивного потока) во всех каналах крыльчатки. Такое повышение *Ka* обусловлено повышением суммарной площади сечений всех закрытых каналов крыльчатки.



Рисунок 4.1 - Обработка абразивным потоком крыльчатки на опытно-промышленной установке УЭШ-100

Использование в схеме ОАП крыльчаток (рисунок 2.12) технологической оснастки в виде созданного направляющего аппарата (рисунок 4.2, а) позволило также создать равномерный расход во всех 12 закрытых каналах крыльчатки (рисунок 4.2, б). Направляющий аппарат создан на основе ЦД технологией *SLA* с последующей металлизацией.

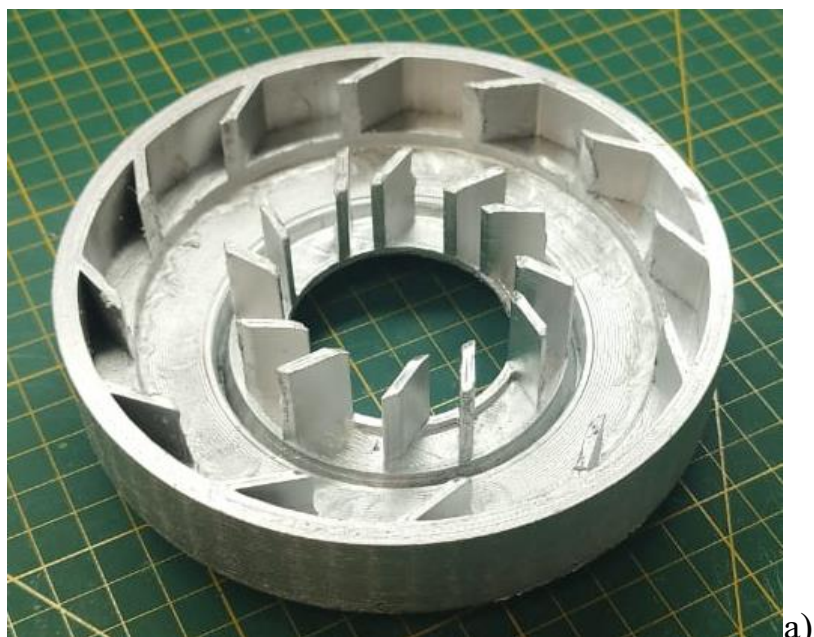


Рисунок 4.2 – Технологическая оснастка направляющий аппарат: а) направляющий аппарат; б) крыльчатка в сборе с направляющим аппаратом

Обработка абразивным потоком партии крыльчаток, в отличие от аналогов, проведена в один этап 60 циклами для каждой крыльчатки с использованием давления сдвига (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.

В процессе извлечения обработанной детали из оснастки и сборки оснастки для обработки следующей детали температура среды уменьшалась до 22...24 °C.

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 4.3, а) и после обработки (рисунок 4.3, б) показал наличие равномерной обработки всех двенадцати каналов. При этом существенного изменения профиля входных кромок лопаток не обнаружено.

Дальнейший анализ топографии поверхности с применением микроскопа, профилометра и твердомера установил, что поверхность до обработки абразивным потоком (рисунок 4.4, а) представлена литейной коркой с шероховатостью произвольного направления величиной $Ra = 8,7...10,2$ мкм. Твёрдость входной части варьировалась в интервале 38,5...40,5 HRC.

После 60 циклов обработки структуре поверхности (рисунок 4.4, б) присущ комплекс царапин, направление которых совпадает с направлением течения

рабочей среды. Видны остатки впадин исходной литейной корки. Средняя ширина царапин 3-5 мкм.

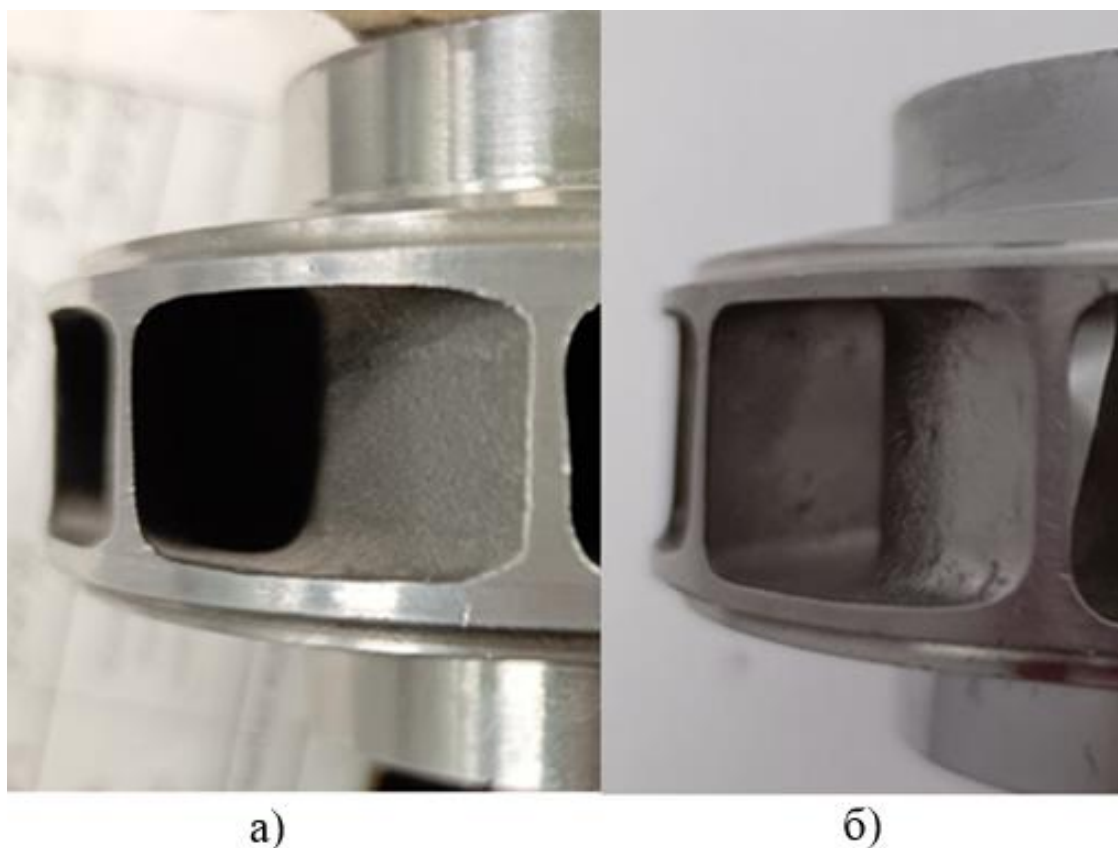


Рисунок 4.3 – Поверхность закрытых каналов крыльчатки: а) до обработки абразивным потоком; б) после обработки абразивным потоком

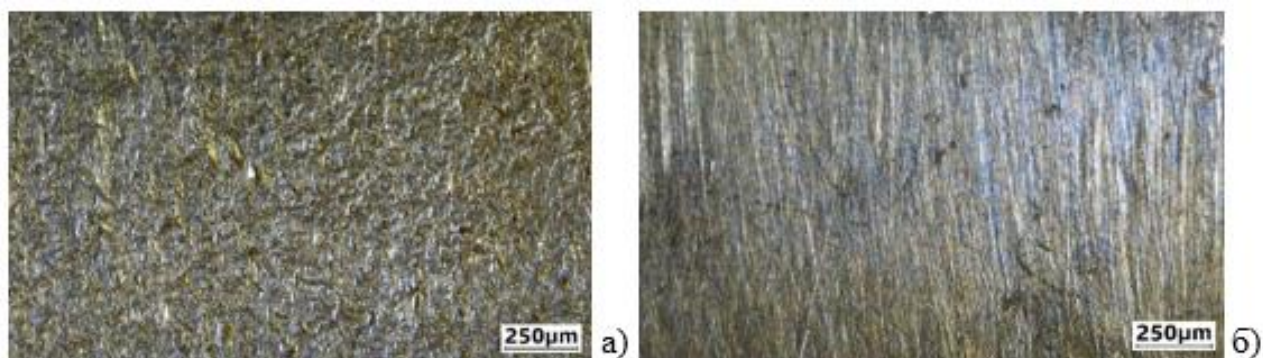


Рисунок 4.4 – Структура поверхностного слоя лопаток крыльчатки: а) до обработки абразивным потоком; б) после обработки абразивным потоком

Шероховатость поверхности для всех каналов приобрела направление, параллельное направлению потока рабочей среды при обработке. Величина

измеренной шероховатости поверхности $Ra = 2,4...2,9$ 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 $43,5...45,5$ HRC.

Сравнение результатов изменения шероховатости и твёрдости поверхности двенадцати закрытых каналов крыльчатки (таблица 4.1) показало, что в результате обработки абразивным потоком осуществлено равномерное уменьшение шероховатости поверхности всех закрытых каналов в 3,5 раза с одновременным упрочнением их поверхностного слоя на 40...43%.

Таблица 4.1. Показатели изменения шероховатости и твёрдости поверхности закрытых каналов крыльчатки

Показатель	Твёрдость HRC		Шероховатость Ra, мкм	
	До ОАП	60 циклов ОАП	До ОАП	60 циклов ОАП
Канал 1	38,5...39,6	43,5...44,5	9,7...10,2	2,7...2,9
Канал 2	38,8...40,3	43,7...44,7	9,3...9,8	2,6...2,9
Канал 3	38,9...40,2	43,8...44,9	9,4...9,9	2,7...2,9
Канал 4	38,6...40,1	43,6...44,5	9,6...10,0	2,7...2,9
Канал 5	39,3...40,4	44,2...45,3	9,0...9,5	2,5...2,7
Канал 6	39,5...40,5	44,5...45,5	8,9...9,3	2,4...2,7
Канал 7	39,0...40,2	44,0...45,0	9,0...9,5	2,5...2,8
Канал 8	39,2...40,2	44,2...45,2	8,9...9,5	2,4...2,7
Канал 9	38,9...40,0	43,8...44,7	9,2...9,7	2,6...2,8
Канал 10	39,1...40,3	44,1...45,0	9,1...9,6	2,5...2,8
Канал 11	39,0...40,1	44,0...45,0	9,0...9,4	2,5...2,7
Канал 12	39,4...40,4	44,3...45,4	8,7...9,2	2,4...2,6

Производительность обработки удалось обеспечить за счет применения рабочей среды одного состава и обработки детали за один этап. Это позволило уменьшить вспомогательное время на перезагрузку разных составов рабочих сред при одинаковом количестве циклов обработки.

Акт о промышленных испытаниях улучшения шероховатости и параметров твердости поверхности закрытых каналов сложнопрофильных деталей обработкой абразивным потоком, приведен в приложении Б.

4.2 Расчет и моделирование влияния шероховатости проточной части межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на энергетические параметры насоса

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 [131, 132]. В таблице 4.2 представлены основные геометрические параметры исследуемого насоса. Следует отметить, что для проводимого расчета геометрия вспомогательных трактов не оказывает значительного влияния, что будет учтено при построении 3D-модели для расчета течения с помощью CFD.

Таблица 4.2. Геометрические параметры насоса

Наименование параметра	Значение параметра
Вход в шнек	
Диаметр корпуса над шнеком, мм	79,3
Наружный диаметр, мм	78,0
Диаметр втулки, мм	35,0
Угол установки на среднем диаметре, град	10,2
Выход из шнека	
Наружный диаметр, мм	78,0
Диаметр втулки, мм	35,0
Толщина лопасти на расчетном диаметре, мм	4,00
Угол установки на среднем диаметре, град	12,5
Число лопастей	2
Вход в крыльчатку	
Периферийный диаметр, мм	78,0
Диаметр втулки, мм	35,0
Средний диаметр кромки лопасти, мм	67,5
Ширина кромки, мм	23,0
Толщина кромки, мм	1,00
Угол установки лопасти, град	18,0
Число лопастей	6
Выход из крыльчатки	
Наружный диаметр (расчетный), мм	116,0
Ширина кромки, мм	15,0
Толщина кромки, мм	0,700
Угол установки лопасти, град	25,0
Число лопастей	12
Спиральный отвод	
Количество каналов отвода	1

Диаметр начала отвода, мм	123,0
Ширина (высота) отвода, мм	23,0

Таблица 4.2. Продолжение

Переднее уплотнение	
Диаметр, мм	84,0
Максимальный рабочий зазор (радиальный), мм	0,110
Длина, мм	7,50
Заднее уплотнение	
Диаметр, мм	81,6
Максимальный рабочий зазор (радиальный), мм	0,110
Длина, мм	7,00
Разгрузочные отверстия	
Диаметр отверстия, мм	7,00
Диаметр средней линии отверстия, мм	60,0
Количество отверстий	6
Диаметр вала	48,0

По результатам расчета по методике [131, 132] получены следующие параметры насоса для величины шероховатости поверхности от Ra 0,8 мкм (полированная) до 8,6 мкм (исходная литая корка), представленные в таблице 4.3.

При расчетах варьировалась шероховатость шнека, крыльчатки и отвода.

Таблица 4.3. Гидравлические параметры насоса

Наименование параметра	Шероховатость поверхности Ra , мкм			
	0,8	3,2	6,3	8,6
Давление (полное), бар:				
-на входе	7,65	7,65	7,65	7,65
-на выходе	306,4	300,2	296,3	294,3
Температура, К:				
-на входе	289,1	289,1	289,1	289,1
-на выходе	302,6	302,7	302,8	302,8
Массовый расход через насос, кг/с	52,9	52,9	52,9	52,9
Объемный расход через насос, дм ³ /с	36,3	36,3	36,3	36,3
Напор насоса, м	2091,1	2047,9	2020,6	2006,3
Частота вращения ротора, об/мин	31085,0	31085,0	31085,0	31085,0
Коэффициент быстроходности	69,9	71,0	71,7	72,1
Вход в шнек (параметры на среднем диаметре)				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	10,8	10,7	10,7	10,6
Окружная скорость, м/с	92,0	92,0	92,0	92,0
Относительная скорость, м/с	92,6	92,6	92,6	92,6
Относительная скорость с учетом загромождения, м/с	71,9	71,9	71,9	71,9

Расходный параметр $q = C_m/(u \cdot \operatorname{tg}(\beta_{\text{атак}}))$	0,654	0,647	0,643	0,640
Угол атаки, град	3,50	3,56	3,61	3,64

Таблица 4.3. Продолжение

Выход из шнека (параметры на расчетном диаметре)				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	11,1	11,1	11,1	11,1
Окружная скорость на расчетном диаметре, м/с	98,4	98,4	98,4	98,4
Теоретический напор, м	437,3	437,3	437,3	437,3
Гидравлические потери, м	144,0	174,1	194,1	204,9
Напор шнека, м	293,2	263,2	243,2	232,3
Статический напор, м	185,6	155,6	135,6	124,7
Вход в крыльчатку				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	8,43	8,43	8,43	8,43
Расходная составляющая абсолютной скорости с учетом загромождения, м/с	9,28	9,28	9,28	9,28
Окружная составляющая абсолютной скорости, м/с	39,0	39,0	39,0	39,0
Абсолютная скорость, м/с	39,9	39,9	39,9	39,9
Окружная скорость на среднем диаметре кромки, м/с	109,9	109,9	109,9	109,9
Относительная скорость, м/с	71,3	71,3	71,3	71,3
Угол потока в относительном движении, град	6,79	6,79	6,79	6,79
Угол потока с учетом загромождения, град	7,46	7,46	7,46	7,46
Угол атаки, град.	11,2	11,2	11,2	11,2
Угол атаки с учетом загромождения, град.	10,5	10,5	10,5	10,5
Выход из крыльчатки				
Расходная составляющая абсолютной скорости, м/с	7,52	7,52	7,52	7,52
Расходная составляющая абсолютной скорости с учетом загромождения, м/с	7,95	7,95	7,95	7,95
Окружная составляющая абсолютной скорости, м/с	137,4	137,4	137,4	137,4
Абсолютная скорость, м/с	137,6	137,6	137,6	137,6
Абсолютная скорость с учетом загромождения, м/с	137,6	137,6	137,6	137,6
Окружная скорость на наружном диаметре, м/с	188,8	188,8	188,8	188,8
Относительная скорость, м/с	52,0	52,0	52,0	52,0
Угол потока в относительном движении, град	8,32	8,32	8,32	8,32
Гидравлические потери в крыльчатке, м	115,6	115,9	116,1	116,3
Спиральный отвод				
Скорость в минимальном сечении отвода, м/с	68,7	68,7	68,7	68,7
Суммарные потери в отводе, м	293,8	306,7	313,7	317,0
Переднее уплотнение				
Давление, бар:				
-на входе в уплотнение	175,9	171,6	168,7	167,1
-на выходе из уплотнения	34,2	29,9	27,0	25,5
Расход через уплотнение				
- объёмный, $\text{дм}^3/\text{с}$	2,39	2,39	2,39	2,39
- массовый, $\text{кг}/\text{с}$	3,48	3,48	3,48	3,48
Коэффициент расхода	0,590	0,590	0,590	0,590

Таблица 4.3. Продолжение

Заднее уплотнение				
Давление, бар:				
-на входе в уплотнение	174,0	169,6	166,7	165,2
-на выходе из уплотнения	54,0	49,7	46,8	45,3
Расход через уплотнение				
- объёмный, $\text{дм}^3/\text{с}$	2,25	2,25	2,25	2,25
- массовый, $\text{кг}/\text{с}$	3,28	3,28	3,28	3,28
Коэффициент расхода	0,622	0,622	0,622	0,622
Разгрузочные отверстия в крыльчатке				
Давление, бар:				
-на входе в отверстия	38,5	34,2	31,3	29,8
-на выходе из отверстий (на среднем диаметре)	34,2	29,9	27,0	25,5
Расход через отверстия, $\text{дм}^3/\text{с}$	2,40	2,40	2,40	2,40
Диски крыльчатки				
Мощность трения дисков крыльчатки, кВт:				
-основного	16,1	16,1	16,1	16,1
-покрывного	13,8	13,8	13,8	13,8
Мощность механических потерь, кВт	49,0	49,0	49,0	49,0
Кавитационные параметры				
Шнек				
Коэффициент кавитации шнека по 1-му режиму	0,0976	0,0981	0,0984	0,0986
Кавитационный запас шнека по 1-му режиму, м	51,7	51,7	51,7	51,7
Коэффициент кавитации шнека по 2-му режиму	0,0292	0,0291	0,0290	0,0290
Кавитационный запас по 2-му режиму, м	21,7	21,5	21,4	21,3
Коэффициент запаса по 2-му режиму	2,24	2,27	2,28	2,29
Колесо				
Коэффициент кавитации	0,112	0,112	0,112	0,112
Срывной кавитационный запас колеса, м	110,3	110,3	110,3	110,3
Кавитационный запас на входе в центробежное колесо (при $dh_{вх} = 0$), м	182,9	152,9	132,9	122,1
Параметры ступени				
Относительный расход $Q/n \cdot 10^7$, $\text{м}^3 \cdot \text{мин}/(\text{с} \cdot \text{об})$	11,7	11,7	11,7	11,7
Относительный напор $H/n^2 \cdot 10^7$, $\text{м} \cdot \text{мин}^2/\text{об}^2$	21,6	21,2	20,9	20,8
Гидравлическая мощность насоса, кВт	1555,2	1552,6	1550,7	1549,7
Потребляемая насосом мощность, кВт	1634,0	1631,4	1629,6	1628,5
КПД насоса:				
-гидравлический	0,791	0,774	0,764	0,759
-объёмный	0,883	0,884	0,885	0,886
-дисковый	0,981	0,981	0,981	0,981
-механический	0,970	0,970	0,970	0,970
-суммарный	0,664	0,652	0,644	0,639

По результатам расчета построена зависимость КПД насоса и напора насоса от величины шероховатости проточной части. Полученные зависимости показаны на рисунке 4.5 [133].

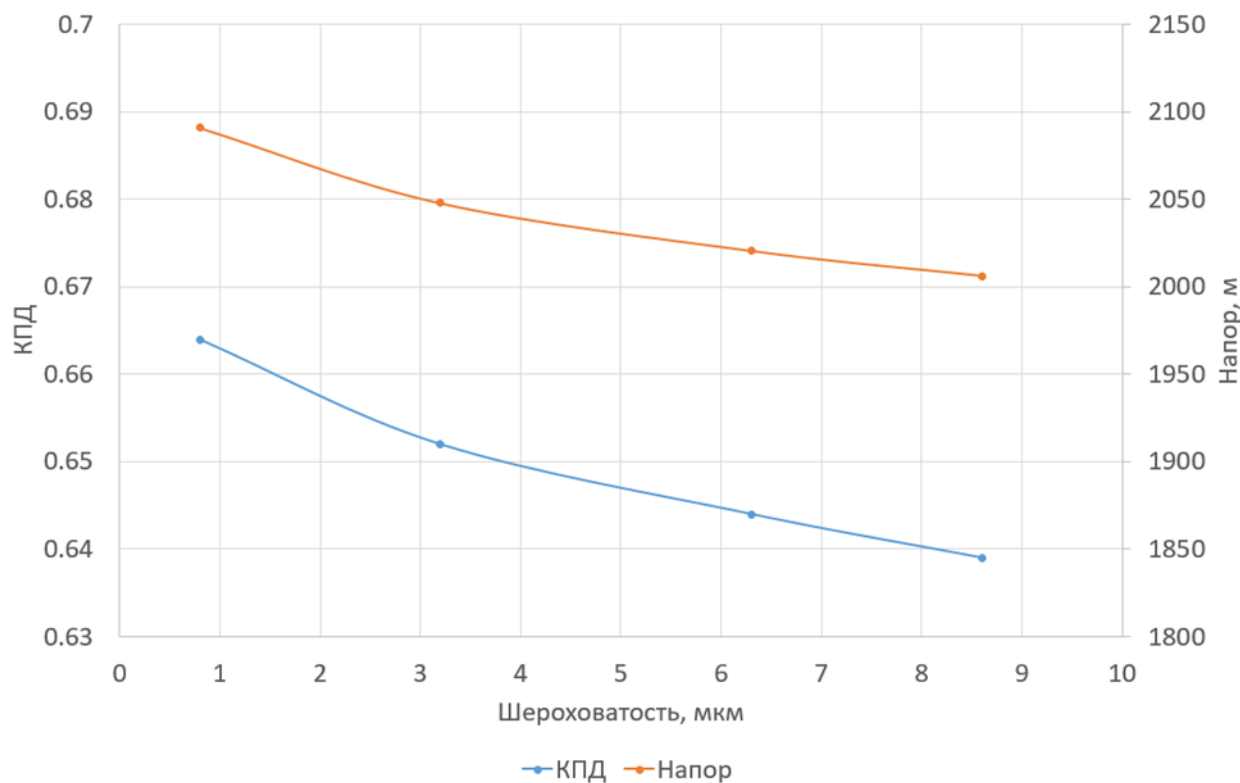


Рисунок 4.5 – Зависимость напора и КПД насоса от шероховатости проточной части

Для верификации результатов расчетов проведено CFD моделирование с использованием пакета ANSYS CFX. Проточная часть исследуемого насоса показана на рисунке 4.6.

Геометрия разделена на 2 домена – роторный (шnek и центробежная крыльчатка) и статорный (полости у основного и покрывного дисков, спиральный отвод и диффузор). Для моделирования построена неструктурированная сетка с призматическими слоями элементов. Причем так как сферой исследования является влияние шероховатости на параметры насоса, то дискретизации расчетных доменов у стенок нужно уделить особое внимание. На рисунке 4.7 представлена сетка в области интерфейса между роторным и статорным доменами.

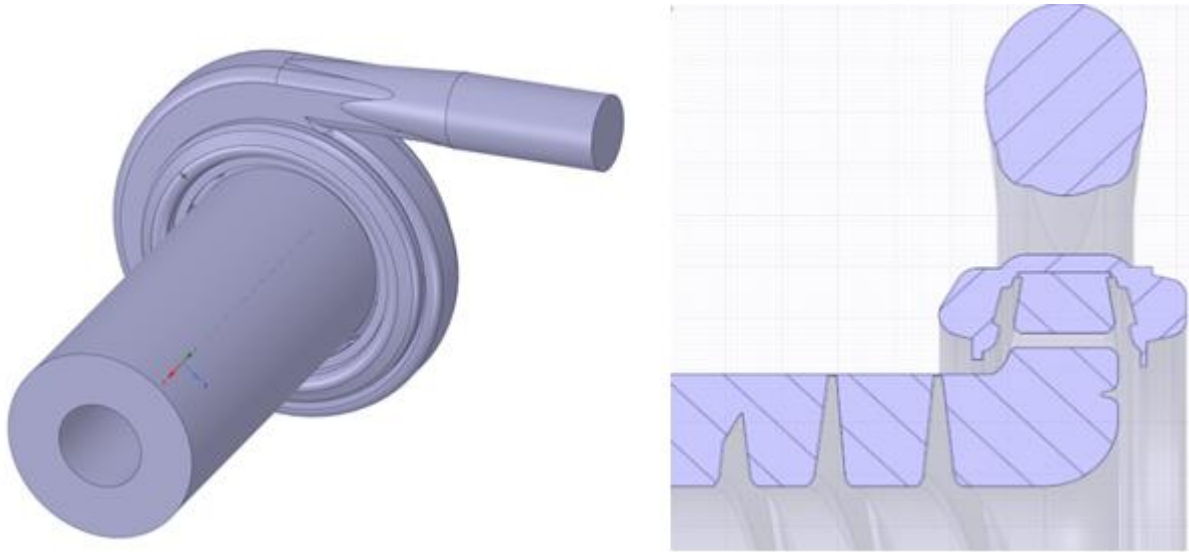


Рисунок 4.6 – Зависимость напора и КПД от шероховатости проточной части

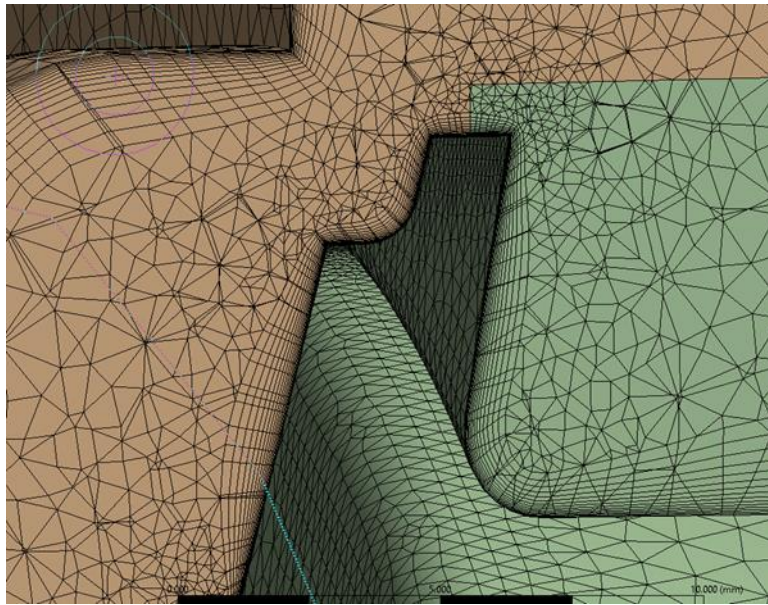


Рисунок 4.7 – Сетка с призматическими слоями элементов

При моделировании в ANSYS CFX использовались следующие параметры математической модели:

- квазистационарная модель;
- интерфейс «Заторможенный ротор» (Frozen rotor);
- несжимаемая жидкость с независящими от температуры свойствами;

- модель турбулентности Shear Stress Transport с автоматической функцией стенки;
- полное давление на входе с интенсивностью турбулентности 5%;
- массовый расход на выходе;
- пересчет окружной скорости в роторном домене (Alternate rotation model).

Общий вид построенной математической модели в CFX-Pre показан на рисунке 4.8. Следует отметить, что неструктурированная сетка состоит из 21696692 узлов, 54886974 элементов среди которых 15 слоев призматических элементов, которые должны обеспечить приемлемое значение параметра Y^+ .

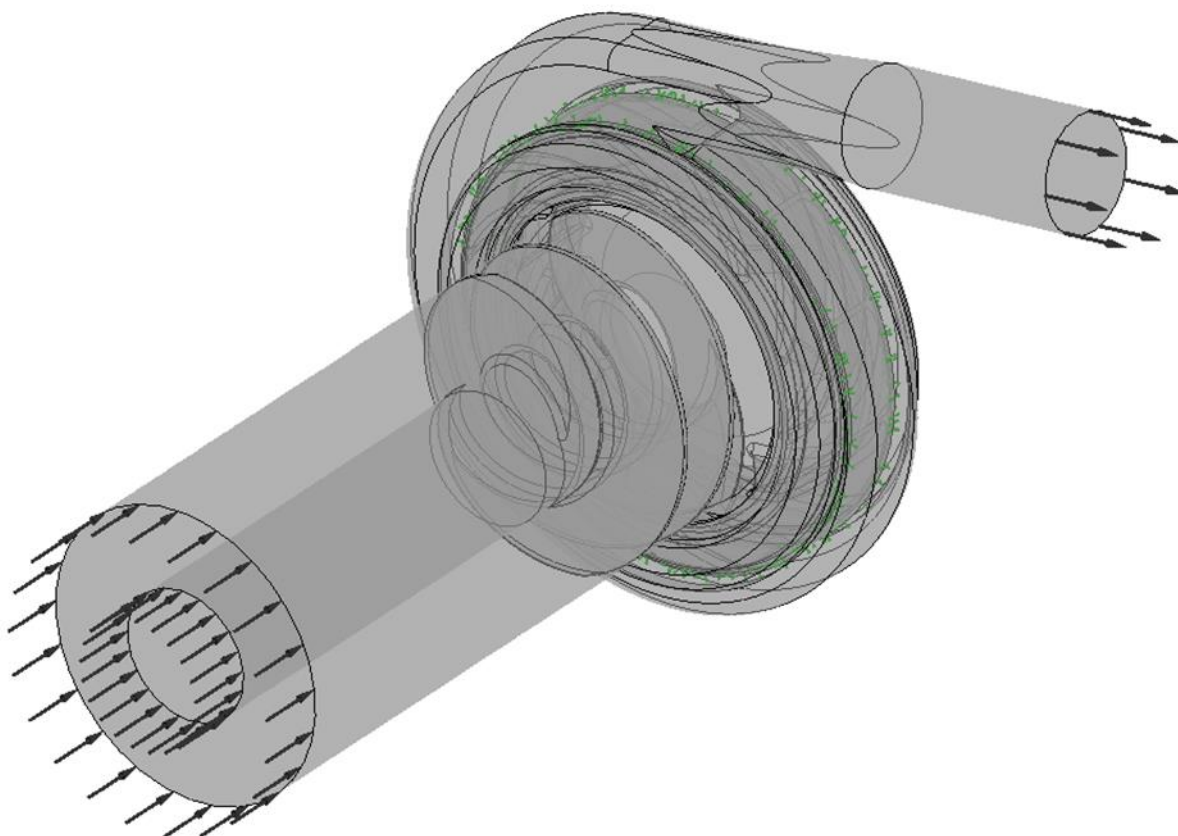


Рисунок 4.8 – Модель насоса с приложенными граничными условиями

При моделировании шероховатости в ANSYS CFX применяется так называемая "песочная" модель. В этой модели неровности стенки

представляются как совокупность плотно прилегающих друг к другу сфер. На рисунке 4.9 представлено графическое изображение подобной шероховатости.

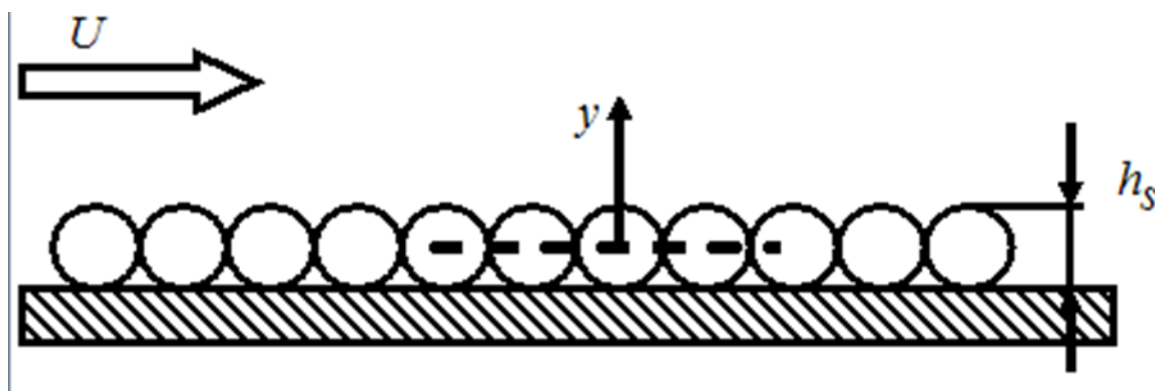


Рисунок 4.9 – Песочная шероховатость

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.

Для насосов вопрос о переходе от "песочной" шероховатости к реальным профилям шероховатости ранее не был исследован, но существует множество экспериментальных исследований, проведенных для круглых труб. Результатом данных исследований является эмпирическая формула, хорошо согласующаяся с результатами экспериментов Никурадзе:

$$\lambda = \left(2 \lg \frac{R}{h_s} + 1,74 \right)^{-2}, \quad (4.1)$$

где λ – коэффициент сопротивления, R – радиус трубы.

Естественно, что для проточной части рабочего колеса невозможно задать радиус. Но, как и для случая круглой трубы, следует задать характерный размер, так как под знаком логарифма в формуле (4.1) должна быть получена

безразмерная величина. В качестве характерного размера был выбран средний гидравлический диаметр каналов центробежной крыльчатки равный 30,96 мм.

Существенным недостатком формулы (4.1) является отсутствие зависимости коэффициента сопротивления от режима течения (числа Рейнольдса). Формула (4.2), полученная К.Ф. Колбруком и Ф.М. Уайтом лишена данного недостатка.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 - 2 \lg \left(\frac{h_s}{R} + \frac{18,7}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (4.2)$$

Число Рейнольдса для данного насоса $Re=3320741$. С помощью формулы (4.2) возможно приближенно оценить влияние шероховатости на гидравлические сопротивление. Зависимость коэффициента сопротивления от шероховатости представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Зависимость коэффициента потерь на трение от величины песочной шероховатости

Шероховатость, мкм	Коэффициент потерь на трение
0	0,0096
1,6	0,0107
6,4	0,0126
12,6	0,0141
17,2	0,0149

Таким образом, в исследуемом диапазоне шероховатости при использовании модели эквивалентной песочной шероховатости расчетный коэффициент потерь на трение растет на 55%.

По результатам CFD моделирования получено распределение основных параметров в проточной части насоса, представленное на рисунках 4.10 – 4.14.

Результаты CFD моделирования показали хорошую корреляцию с расчетами, проведенными по инженерным методикам. В среднем напор получался 5-7% выше, что связано с меньшим объемным расходом через крыльчатку – в трехмерной постановке не учитывались утечки через уплотнения. Потребляемая насосом мощность в свою очередь оказалась ниже на ~8%.

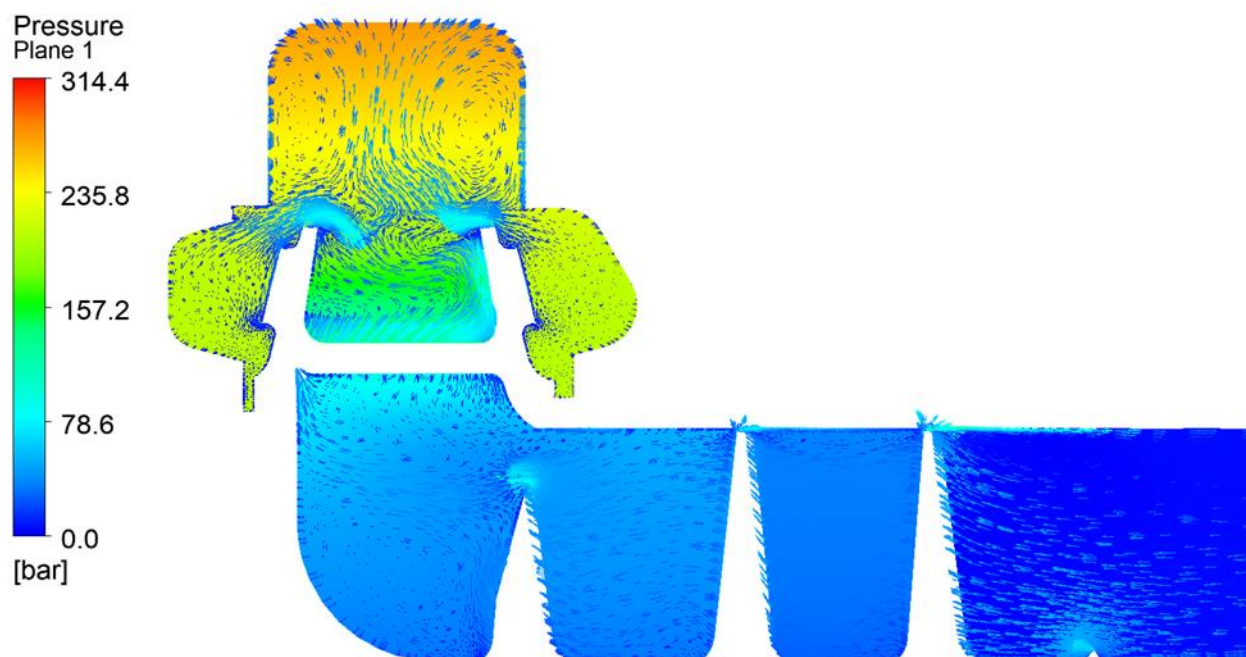


Рисунок 4.10 – Распределение статического давления и векторное поле меридиональной скорости в характерном продольном сечении

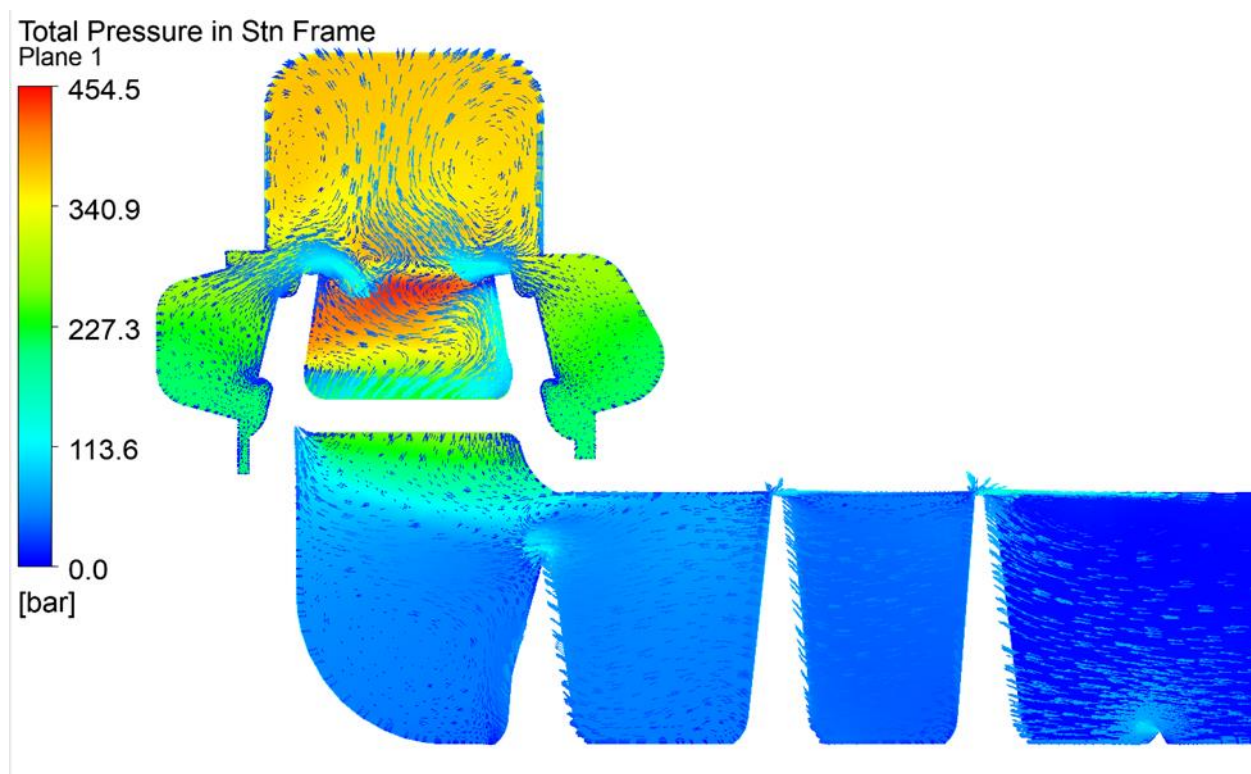


Рисунок 4.11 – Распределение полного давления и векторное поле меридиональной скорости в характерном продольном сечении

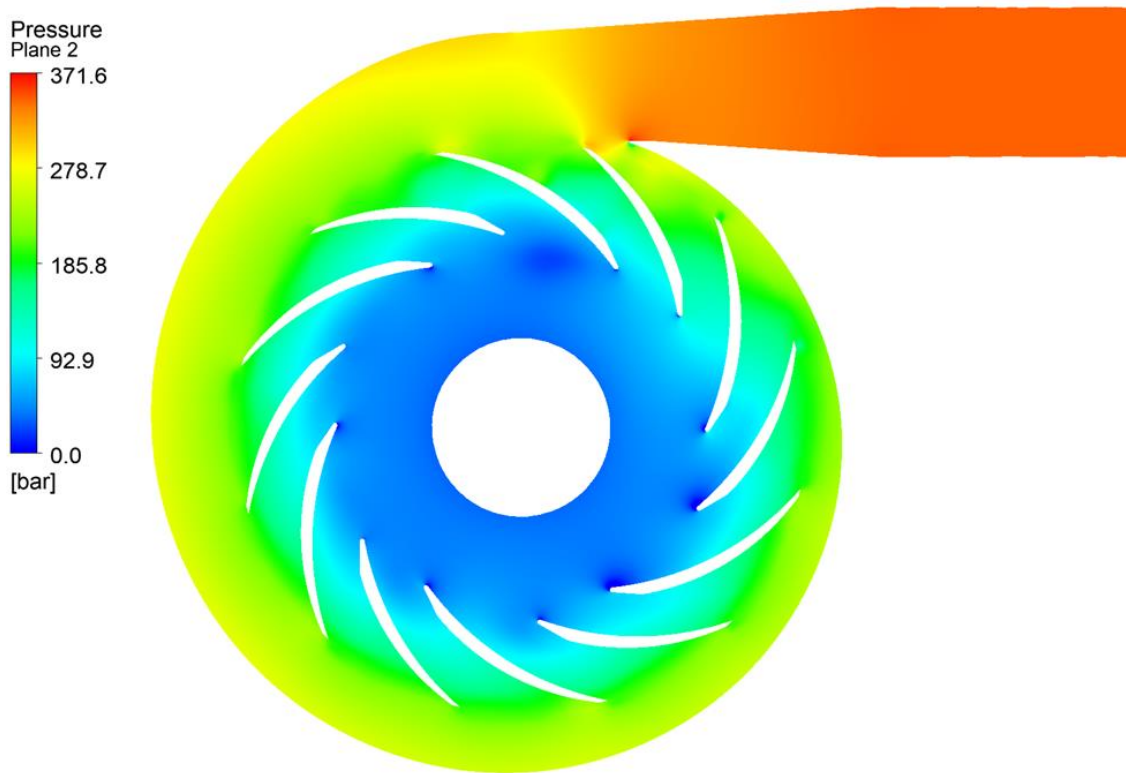


Рисунок 4.12 – Распределение статического давления в рабочем колесе и спиральном отводе

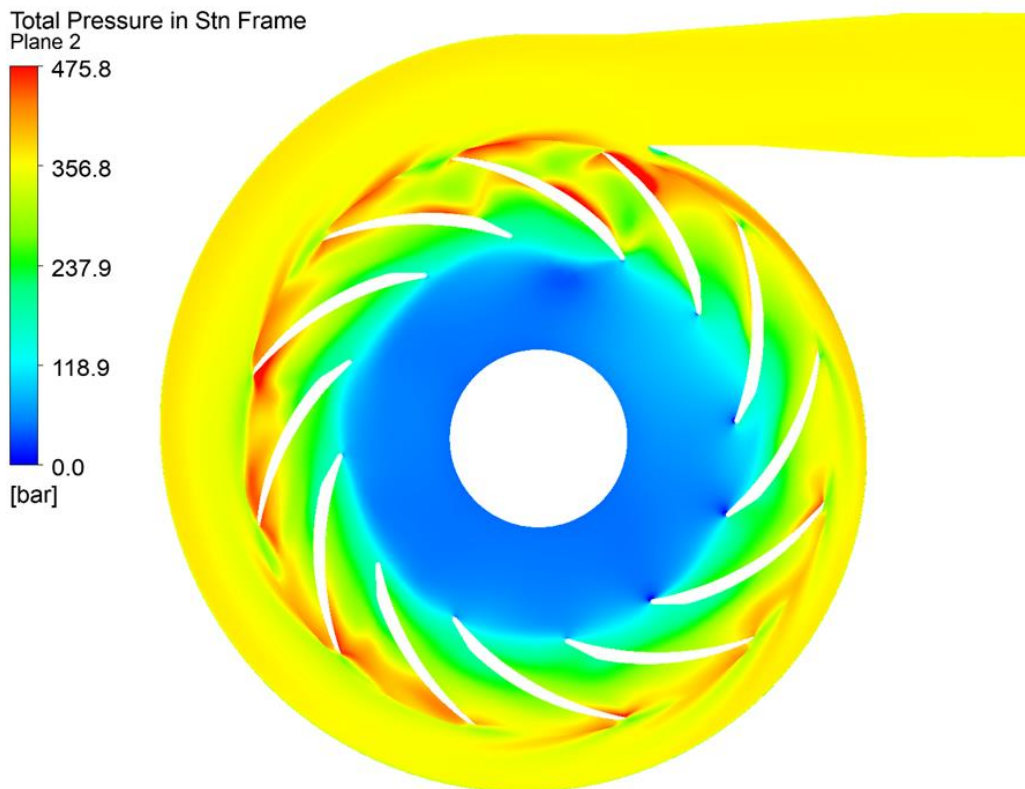


Рисунок 4.13 – Распределение полного давления в рабочем колесе и спиральном отводе

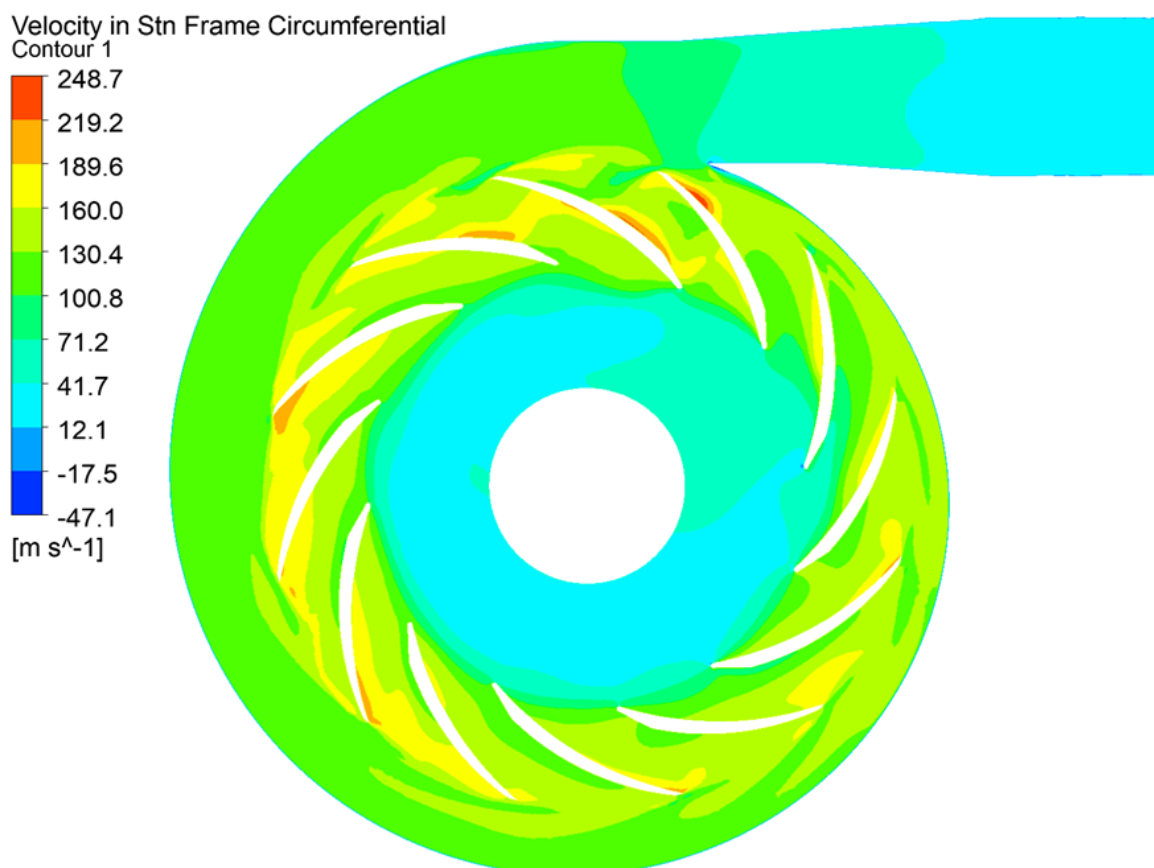


Рисунок 4.14 – Распределение окружной компоненты абсолютной скорости в рабочем колесе и спиральном отводе

Проведено сравнение относительного снижения напора и КПД для различных величин шероховатости. В качестве точки отсчета выбран расчет, проведенный для гидравлически гладкой проточной части. Сводный график представлен на рисунке 4.15.

Использованная методика расчета [131, 132] показывает большее значение снижения как напора, так и КПД насоса в сравнении с CFD. При этом графики относительного снижения КПД и напора наглядно демонстрируют, что улучшение чистоты поверхностей проточной части от литых (8,6 мкм) к полированным (0,8 мкм) позволяет повысить как напор, так и КПД насоса на 1,5-2,5%/

Проведен расчет параметров насоса с целью определения влияния шероховатости проточной части на энергетические параметры насоса.

Получена зависимость коэффициента потерь на трение от величины песочной шероховатости, которая показывает, что с увеличением шероховатости проточной части до Ra 8,6 мкм расчетный коэффициент потерь на трение растет на 55% [133].

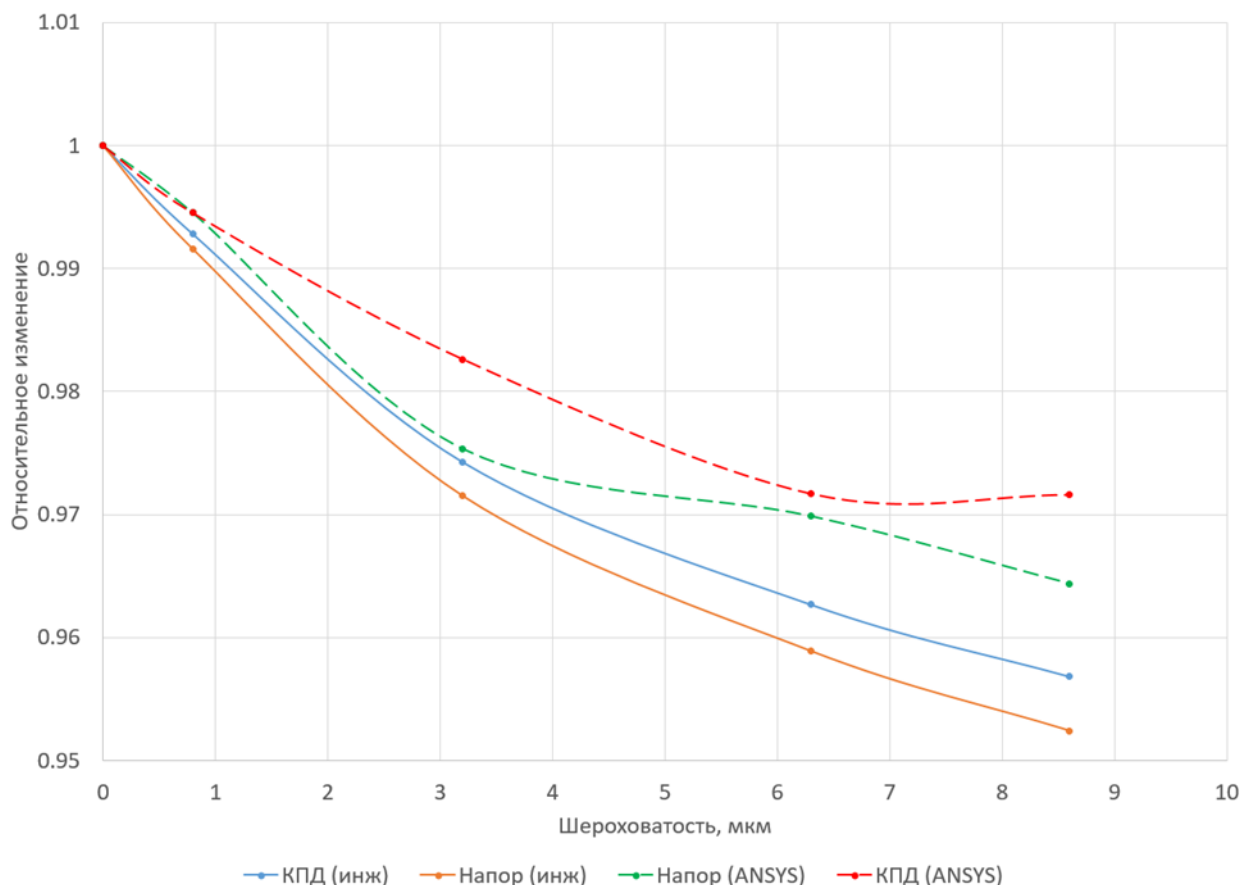


Рисунок 4.15 – Относительное снижение энергетических параметров насоса при различной величине шероховатости проточной части [133]

На основе результатов конечно-элементного моделирования и расчета подтверждено повышение напора и КПД насоса ТНА с одновременным уменьшением потребляемой мощности до 8 % при изменении величины шероховатости поверхностей проточной части насоса, в том числе закрытых каналов крыльчатки, от $Ra = 8,6$ мкм до $Ra = 2,4 \dots 2,9$ до $Ra = 0,8$ мкм на 1,5...2,5 % [133].

4.3 Рекомендации по совершенствованию производства сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей насосов за счет внедрения обработки абразивным потоком

Разработка ТП обработки абразивным потоком конкретной детали проводится с применением алгоритма усовершенствованной методики (параграф 2.4.2).

На этапе 1 при определении характеристик обрабатываемых каналов при анализе исходной информации (шаг 1.1) применяется 3D модели детали. Для ОАП проточной части шнека и крыльчатки рекомендуется использование направляющего аппарата (шаг 1.2). Предварительный выбор длины зазора между кромками направляющего аппарата и обрабатываемой деталью выбирают по зависимости (2.22) и уточняют исходя из технологических возможностей изготовления НА по точности формы и размеров.

Для обработки рекомендуется использовать схему нового способа обработки абразивным потоком межлопаточных закрытых каналов крыльчаток с применением направляющего аппарата (рисунок 2.12). Изготовление направляющего аппарата и других элементов технологической оснастки рекомендуется проводить на основе их цифровых двойников с применением аддитивных технологий.

На этапе 2 выбор требуемого состава рабочей среды (шаг 2.1) рекомендуется проводить на основе полученных эмпирических зависимостей. Так зависимость предела текучести от содержания абразива и добавок в составе рабочей среды (3.2) позволяет скорректировать процентное содержание компонентов рабочей среды в случае существенных изменений размеров обрабатываемой детали. Основой выбор состава среды проводится по зависимостям шероховатости поверхности литых образцов от степени наполнения рабочей среды абразивным зерном и давлением сдвига P (3.3) и (3.4). Зависимости твердости поверхности литых образцов от степени наполнения рабочей среды абразивным зерном и давлением сдвига P (3.5) и (3.6)

используются для прогностического расчета твердости проточной части. Применение зависимостей (3.2) ... (3.6) позволяет пропустить остальные шаги 2.1.

На шаге 2.2. Выбора величины давления сдвига P рекомендуется применять давление 12 МПа.

Аналитические расчеты фактической площади контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью (этап 3) и шероховатости обработанной поверхности и производительности обработки выбранной рабочей средой в базовом канале (этап 4) позволяют уточнить требуемое количество циклов обработки. Количество циклов обработки можно уточнить экспериментально при обработке опытного образца.

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

На основном этапе происходит непосредственный процесс обработки ЗК 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.

На заключительном этапе проводится сопоставление полученных значений шероховатости ЗК крыльчаток с графиком зависимости КПД и расходно-напорных характеристик насоса. График зависимости представлен в 4.2. При необходимости (если не обеспечена требуемая шероховатость ЗК)

возможна дополнительная ОАП с рекомендуемым числом циклов обработки и возможным изменением состава РС.

На всех этапах технологического процесса реализуется процедура операционного контроля ОАП. При этом контролируются три группы факторов.

Первая группа факторов относится к контролю состояния РС. Ко второй группе факторов относится контроль режимов ТП обработки абразивным потоком. Третья группа факторов операционного контроля характеризует изменение состояния обрабатываемой заготовки [134].

Первая и третья группа факторов контролируются дискретно. Вторая группа факторов контролируется непрерывно в ходе технологического процесса ОАП. Непрерывный контроль над второй группой факторов позволяет осуществлять процесс управления ТП обработки абразивным потоком ЗК крыльчаток.

Применение ТП обработки абразивным потоком литых заготовок крыльчаток с ЗК перед основными операциями механической обработки позволит выявить такие дефекты, не применяя операции рентген-контроля и ультразвукового контроля.

Рекомендации по режимам обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей приведены в таблице 4.5. 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.

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

Конструкция выравнивающего устройства для ОАП крышки насоса создается на основе технического решения [135].

Таблица 4.5. Рекомендуемые режимы обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей

Наименование, способ получения, материал, требуемая шероховатость Ra , мкм	Количество обрабатываемых поверхностей и их вид	Режимы обработки					
		$P_{вх}$, МПа	V_a , мкм	K_a , %	Кол-во циклов	T , $^{\circ}C$	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

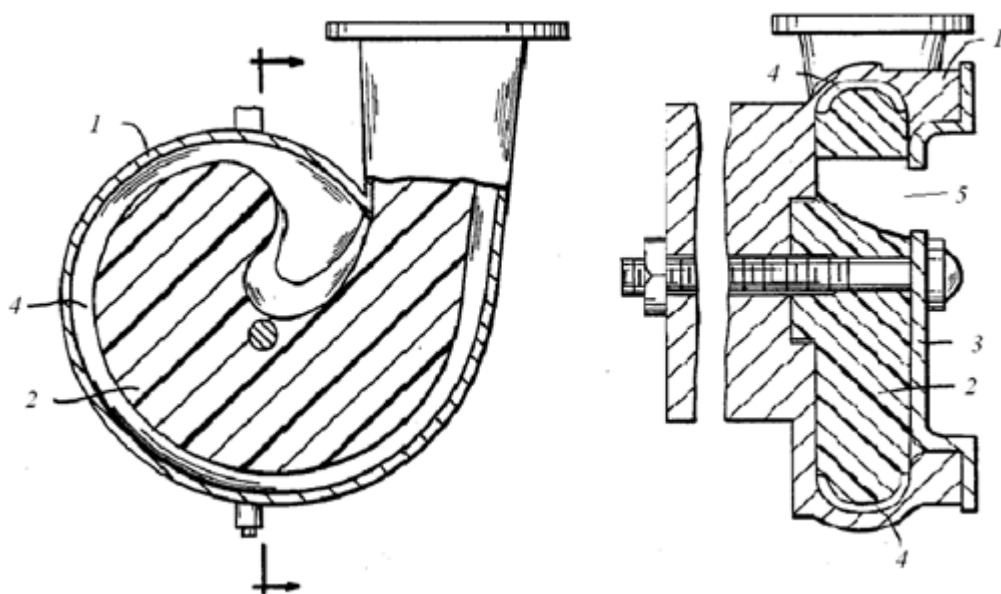


Рисунок 4.16 – Схема обработки внутренней поверхности центробежного насоса с выравнивающим приспособлением [135]

Выравнивающее устройство для ОАП шнека создается таким образом, чтобы между его внутренней стенкой и наружной поверхностью шнека создавался винтовой проточный канал.

Используя результаты данного исследования возможно решить все основные проблемы обработки абразивным потоком закрытых каналов литых заготовок [136].

В состав производственного участка обработки абразивным потоком помимо установки необходимо включить верстак для сборки приспособлений, рабочее место для извлечения остатков рабочей среды из обработанных деталей и их продувки сжатым воздухом, а также ванну для ультразвуковой мойки и обезжиривания. Так же в состав участка входит склад для хранения приспособлений и оснастки, заготовок и обработанных деталей, а также емкостей с готовыми составами рабочих сред.

В условиях единичного и мелкосерийного производства изготовление рабочих сред рекомендуемого состава возможно производить непосредственно на установке для обработки с использованием специальных приспособлений. Для других типов производства в состав участка дополнительно включается устройство для смешивания компонентов рабочей среды требуемого состава.

В результате в соответствии с результатами отработки усовершенствованного ТП обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей данная технология планируется к внедрению в условиях опытного производства в АО «Красмаш». Акт внедрения представлен в Приложении В.

4.4 Выводы по главе

Для совершенствования технологического процесса ОАП закрытых каналов крыльчатки насоса ТНА предложено использовать РС с повышенным содержанием АЗ карбида кремния. Саму обработку осуществлять по новой схеме с использованием технологической оснастки в виде созданного на основе ЦД технологией *SLA* с последующей металлизацией направляющего аппарата.

В результате отработки усовершенствованного ТП обработки абразивным потоком закрытых каналов крыльчатки рабочей средой одного состава за 60 циклов обработки удалось полностью удалить литейную корку с поверхности всех закрытых каналов и обеспечить уменьшение величины шероховатости $Ra = 8,7...10,2$ мкм до $Ra = 2,4...2,9$ мкм. При этом твердость входной части увеличилась с $38,5...40,5 HRC$ до величины $43,5...45,5 HRC$.

Результаты расчета влияния шероховатости проточной части межлопаточных закрытых каналов крыльчаток на энергетические параметры насоса и конечно-элементного моделирования 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 %.

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.

Предложены рекомендации по совершенствованию производства сложнопрофильных литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей насосов за счет внедрения обработки абразивным потоком. Данная технология планируется к внедрению в условиях опытного производства в 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, 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) $Ra = 8,7 \dots 9,3$ 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.

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 увеличится на 1,5-2,5 % с одновременным уменьшением потребляемой насосом мощности до 8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуйко, Д. А. Турбонасосные агрегаты жидкостного ракетного двигателя : учебное пособие / Д. А. Жуйко. — Красноярск : СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2017. — 218 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/147506>
2. 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.
3. Обеспечение точности расхода компонентов топлива через каналы деталей, обработанных экструзионным хонингованием / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко [и др.] // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 48-52.
4. Cheng, K., Shao, Y., Bodenhorst, R., and Jadva, M. Modeling and Simulation of Material Removal Rates and Profile Accuracy Control in Abrasive Flow Machining of the Integrally Bladed Rotor Blade and Experimental Perspectives. ASME. J. Manuf. Sci. Eng. December 2017; 139(12): 121020. <https://doi.org/10.1115/1.4038027>
5. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 4(25). – С. 138-145.
6. C.W. Kum, C.H. Wu, S. Wan, C.W. Kang. Prediction and compensation of material removal for abrasive flow machining of additively manufactured metal components. Journal of Materials Processing Technology. V. 282. 2020, 116704. ISSN 0924-0136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116704>.
7. Research the influence finishing canal shape to flow media for abrasive flow machining process / V. A. Levko, M. A. Lubnin, P. A. Snetkov [et al.] // Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems. – 2009. – No 5(26). – P. 93-99.

8. Авторское свидетельство № 1161359 А1 СССР, МПК В24С 1/08. Способ обработки деталей абразивной массой : № 3652014 : заявл. 11.07.1983 : опубл. 15.06.1985 / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Г-4778.

9. Fu, Y., Wang, X., Gao, H. et al. Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining. *Int J Adv Manuf Technol* 84, 1725–1735 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8270-0>

10. Методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко, М. А. Лубнин, С. К. Сысоев [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 4(37). – С. 173-178.

11. Сысоев, С. К. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов : теория, исслед., практика : монография / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев ; С.К. Сысоев, А.С. Сысоев ; Федер. агентство по образованию, Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева, 2005. – ISBN 5-86433-245-3.

12. Зубарев, Ю. М. Специальные методы обработки заготовок в машиностроении / Ю. М. Зубарев. – Санкт-Петербург : Издательство "Лань", 2015. – 400 с. – ISBN 978-5-8114-1856-5.

13. Оборин, Л. А. Влияние способа выплавки жидкой стали 08Х14Н7МЛ (ВНЛ-1) на степень ее равновесности и параметры термовременной обработки расплава / Л. А. Оборин, Г. В. Тягунов, А. И. Черепанов // Литейщик России. – 2013. – № 7. – С. 25-29.

14. Adiaconitei A, Vintila IS, Mihalache R, Paraschiv A, Frigioescu TF, Popa IF, Pambaguian L. Manufacturing of Closed Impeller for Mechanically Pump Fluid Loop Systems Using Selective Laser Melting Additive Manufacturing Technology. *Materials* (Basel). 2021 Oct 9;14(20):5908. doi: 10.3390/ma14205908. PMID: 34683501; PMCID: PMC8538438.

15. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. - М.: Машиностроение, 1985. - 175 с.

16. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review. Mali H.S., Manna A. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2009;223(7):809-820. doi: 10.1243/09544054JEM1311

17. S. Bonb. Laser transformation hardening of steel. Advances in Laser Materials Processing Technology, Research and Application. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. 2010, Pages 291-326 <https://doi.org/10.1533/9781845699819.4.291>

18. Особенности формирования структуры сталей при лазерном термическом цикле / Г. Н. Гаврилов, В. А. Кастро, И. Б. Брауэр, Е. С. Беляев // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 12. С. 38-41.

19. Исследование влияния воздействия лазерного излучения на микроструктуру и свойства коррозионно-стойкой стали / Т. В. Тарасова, С. Д. Кузьмин, И. С. Белашова [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 5(149). С. 221-225

20. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении : Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе, А. Н. Воронцова [и др.]. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2015. 240 с.

21. Лобода, А. А. Электрохимическая доводка аэродинамических профилей лопаточных колес / А. А. Лобода, С. А. Мозгов, Б. П. Саушкин // Известия МГТУ МАМИ. 2013. Т. 2. № 2(16). С. 251-257.

22. Мозгов, С. А. Улучшение качества поверхностей лопаток моноколёс турбокомпрессорных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / С. А. Мозгов, Д. В. Панов, Б. П. Саушкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 4(42). С. 206-212.

23. Журавлев, О. С. Обработка поверхности детали перед нанесением покрытия с использованием технологии DRYLYTE / О. С. Журавлев, И. М. Смирнова // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. № 2(25). С. 36-38.

24. Бойченко, О. В. О внедрении технологии электролитно-плазменного полирования деталей, изготавливаемых из нержавеющей сталей / О. В. Бойченко, А. П. Воленко // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства : Труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения), Тольятти, 27–29 мая 2015 года / Редакционная коллегия: А.В. Гордеев, В.И. Малышев, Л.А. Резников, А.С. Селиванов. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2015. С. 166-172.

25. Оценка возможности полирования нержавеющей сталей струйной электролитно-плазменной обработкой / М. В. Новоселов, Н. Г. Шиллинг, А. А. Рудавин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20. № 1. С. 94-102. DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.10.

26. Патент № 2699137 С1 Российская Федерация, МПК С25F 3/16. Способ обработки внутренней и внешней поверхности изделий, изготовленных аддитивным методом, и устройство, его реализующее : № 2019105336 : заявл. 25.02.2019 : опубл. 03.09.2019 / А. Х. Гильмутдинов, К. Ю. Нагулин, Э. С. Якшибаев.

27. Володин, А. Ю. Способ электролитно-плазменной обработки внутренних пространственно-сложных поверхностей различной кривизны корпусных деталей центробежных насосов жидкостных ракетных двигателей / А. Ю. Володин, Д. С. Заруба, Н. В. Величко // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 549-550.

28. Волков, Д. И. Методика определения параметров динамического взаимодействия абразивной гранулы и пера лопатки в круговых виброполировальных установках / Д. И. Волков, А. В. Толкачев // Вестник

Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2015. № 1(32). С. 94-99.

29. Патент № 2686395 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/06. Способ вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей и вибрационный станок для отделочно-упрочняющей обработки деталей : № 2017146980 : заявл. 29.12.2017 : опубл. 25.04.2019 / А. Г. Березкин, Н. А. Исайкин, А. Ю. Лобанов.

30. Тищенко И.В., Рожков А.С., Богуцкий В.Б. Оптимизация технологических схем финишной обработки ЛВМ-отливок с применением вибрационно-роторных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. №14. С. 43-46.

31. Авторское свидетельство № 867617 А1 СССР, МПК В24В 31/00. Способ обработки деталей в свободном абразиве и устройство для его осуществления : № 2894836 : заявл. 18.03.1980 : опубл. 30.09.1981 / В. М. Мигунов, Г. Н. Зацепин, А. Я. Качан, А. И. Попенко.

32. Авторское свидетельство № 1803308 А1 СССР, МПК В24В 31/104. Способ обработки деталей : № 4897925 : заявл. 29.12.1990 : опубл. 23.03.1993 / А. Н. Мартынов, В. А. Лемин, В. А. Скрябин [и др.].

33. Исследование процесса отделочной абразивной обработки внутренних поверхностей с применением эффекта вибрационной кавитации / А. С. Асаев, А. В. Иванайский, Н. В. Аверин, Д. И. Волков // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2021. № 4(59). С. 57-62.

34. Скрябин, В. А. Особенности обработки деталей из жаропрочных литейных сплавов незакрепленным мелкодисперсным шлифовальным материалом / В. А. Скрябин, А. Г. Схиртладзе, Е. В. Зотов // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 2(45). С. 25-28.

35. Скрябин, В. А. Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности / В. А. Скрябин // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 4. С. 552-561. DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.552-561.

36. Авторское свидетельство № 1555115 А1 СССР, МПК В24С 1/00, В24С 3/08. Способ обработки рабочих колес насосов и устройство для его осуществления : № 4421417 : заявл. 10.05.1988 : опубл. 07.04.1990 / В. Л. Парамей, С. Г. Парфененко, В. В. Калюжный [и др.].

37. Патент № 2158671 С2 Российская Федерация, МПК В24С 1/00, В24С 3/18, В24С 7/00. Способ обработки поверхностей проточных каналов крыльчаток и устройство для его осуществления : № 97120635/02 : заявл. 10.12.1997 : опубл. 10.11.2000 / А. В. Левченко.

38. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей / А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 7(109). С. 20-23. DOI 10.30987/2223-4608-2020-7

39. Некрылов, А. М. Импульсно-ударная обработка сужающихся межлопаточных каналов / А. М. Некрылов, С. Н. Коденцев, А. О. Родионов // Воронежский научно-технический Вестник. 2021. Т. 3. № 3(37). С. 36-41. DOI 10.34220/2311-8873-2022-36-41.

40. 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.

41. Rhoades L. J. Abrasive flow (machining and its use) // Nontraditional Mach: Cont. Proc. Cincinnati, Ohio, 1985. [Metal Park (Ohio)], 1986. P. 111–120.

42. Petare A.C., Jain N. K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. Issue 1-4. P. 741–782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>

43. Авторское свидетельство 738837 СССР. МКИ В24В 1/00. Способ снятия заусенцев и отделки поверхностей абразивной массой / А.И. Попенко, В.М. Мигунов, П.В. Ширкевич, А.И. Ковган. Заявл. 16.12.1977; Оpubл. 05.06.80, Бюл. № 21. – 6 с.: ил.

44. 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 Publishing Ltd, 2021. – P. 12029. – DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029.

45. Rhoades, L.J. (1990). Abrasive Flow Machining for Automatic Surface Finishing and Capacitance Technology for In-Process Surface and Dimensional Metrology. В: Meguid, S.A. (eds) Surface Engineering. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7_46

46. Tao, Z., Yaoyao, S., Xiaojun, L. et al. Optimization of abrasive flow polishing process parameters for static blade ring based on response surface methodology. Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. V. 30, no. 3. P. 1085–1093. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0213-7>

47. Abdul Wahab Hashmi, Harlal Singh Mali, Anoj Meena. A critical review of modeling and simulation techniques for loose abrasive based machining processes. Materials Today: Proceedings. V 56. Part 4. 2022. P. 2016-2024, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.349>.

48. 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.

49. 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.

50. Guo, J., Song, C., Fu, Y., Au, K. H., Kum, C. W., Goh, M. H., Ren, T., Huang, R., and Sun, C. (June 4, 2020). Internal Surface Quality Enhancement of

Selective Laser Melted Inconel 718 by Abrasive Flow Machining. ASME. J. Manuf. Sci. Eng. October 2020; 142(10): 101003. <https://doi.org/10.1115/1.4047141>

51. M.S. Duval-Chaneac, S. Han, C. Claudin, F. Salvatore, J. Bajolet, J. Rech. Characterization of maraging steel 300 internal surface created by selective laser melting (SLM) after abrasive flow machining (AFM). *Procedia CIRP*. Volume 77, 2018, Pages 359-362, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.035>.

52. Sangil Han, Ferdinando Salvatore, Joël Rech, Julien Bajolet, Joël Courbon. Effect of abrasive flow machining (AFM) finish of selective laser melting (SLM) internal channels on fatigue performance. *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 59, 2020, Pages 248-257, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.065>.

53. M.S. Duval-Chaneac, S. Han, C. Claudin, F. Salvatore, J. Bajolet, J. Rech. Experimental study on finishing of internal laser melting (SLM) surface with abrasive flow machining (AFM). *Precision Engineering*. Volume 54, 2018, Pages 1-6, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.03.006>.

54. Sangil Han, Ferdinando Salvatore, Joël Rech, Julien Bajolet, Joël Courbon. Surface integrity in abrasive flow machining (AFM) of internal channels created by selective laser melting (SLM) in different building directions. *Procedia CIRP*. Volume 87, 2020, Pages 315-320, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.022>.

55. Левко, В. А. Абразивно-экструзионная обработка. Современный уровень, проблемы и направления развития / В. А. Левко // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 6. – С. 125-129.

56. Jain R. K., Jain V. K. Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network. *Journal of Materials Processing Technology*. V.108, Iss.1, 2000, pp 62-67. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00621-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00621-X).

57. Petri K. L., Billo R. E., Bidanda B. A neural network process model for abrasive flow machining operations. *Journal of Manufacturing Systems*. V.17, Iss.1, 1998, pp 52-64. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(98\)80009-5](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(98)80009-5).

58. Jain R.K., Jain V.K. Finite element simulation of abrasive flow machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003;217(12):1723-1736. doi:10.1243/095440503772680640

59. Howard M., Cheng K. An industrially feasible approach to process optimisation of abrasive flow machining and its implementation perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013;227(11):1748-1752. doi:10.1177/0954405413491957

60. Uhlmann E., Mihotovic V., Szulczynski H., Kretzschmar M. (2010). Developing a Process Model for Abrasive Flow Machining. In: Aurich, J., Dornfeld, D. (eds) *Burrs - Analysis, Control and Removal*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00568-8_8

61. Jain V.K., Kumar R., Dixit P.M., Sidpara A. Investigations into abrasive flow finishing of complex workpieces using FEM. *Wear*. V.267, Iss.1–4, 2009. pp 71-80, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.005>.

62. Zhang K. H. et al. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM). *Advanced Materials Research*. V. 797, 2013, pp. 390–395. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.797.390.

63. Song G, Li Y, Ya G. Temperature Dependence and Effect on Surface Roughness in Abrasive Flow Machining. *Advanced Materials Research*. V. 53–54, 2008, pp. 375–80. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.53-54.375>.

64. Swarn Singh, Harish Kumar, Santosh Kumar, Saurabh Chaitanya. A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM). *Materials Today: Proceedings*. V 56. Part 5. 2022. P. 3108-3116, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.273>.

65. Aneesh Goyal, Harvinder Singh, Rachin Goyal, Rajdeep Singh, Swarn Singh. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. *Materials Today: Proceedings*. Volume 56, Part 5, 2022, pp. 3065-3072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.109>.

66. 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.

67. Сысоева, Л. П. Методика обеспечения качества каналов деталей летательных аппаратов с использованием абразивно-экструзионной обработки / Л. П. Сысоева, С. К. Сысоев, А. С. Сысоев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 2(48). – С. 228-232.

68. Левко, В. А. Научные основы абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко. – Красноярск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2015. – 222 с. – ISBN 978-5-86433-654-0.

69. Experimental determination factor to viscosity, elasticity and plasticity media for abrasive flow machining process / P. A. Snetkov, V. A. Levko, E. B. Pshenko, M. A. Lubnin // Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems. – 2009. – No. 5(26). – P. 99-103.

70. Экспериментальное определение коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / П. А. Снетков, В. А. Левко, Е. Б. Пшенко, М. А. Лубнин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 4(25). – С. 134-138.

71. Levko, V. A. Calculation of surface roughness in abrasive-extrusion machining on the basis of contact-interaction model / V. A. Levko // . – 2009. – Vol. 52, No. 1. – P. 94-98. – DOI 10.3103/S1068799809010164.

72. Левко, В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий / В. А. Левко // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2009. – № 1. – С. 59-62.

73. Левко, В. А. Абразивно-экструзионная обработка. Современный уровень и теоретические основы процесса : монография / В. А. Левко ; В. А. Левко ; Федеральное агентство по образованию, Сибирский гос.

аэрокосмический ун-т им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмический ун-т, 2007.

74. Youzhi Fu, Hang Gao, Qiusheng Yan, Xuanping Wang. A new predictive method of the finished surface profile in abrasive flow machining process. *Precision Engineering*. Volume 60, 2019, Pages 497-505, ISSN 0141-6359, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.08.011>.

75. Abdul Wahab Hashmi, Harlal Singh Mali, Anoj Meena. A critical review of modeling and simulation techniques for loose abrasive based machining processes. *Materials Today: Proceedings*. Volume 56, Part 4, 2022, Pages 2016-2024, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.349>.

76. Williams, R. E., and Rajurkar, K. P. (February 1, 1992). Stochastic Modeling and Analysis of Abrasive Flow Machining. *ASME. J. Eng. Ind.* February 1992; 114(1): 74–81. <https://doi.org/10.1115/1.2899761>

77. Ravi Butola, Rishabh Jain, Priyesh Bhangadia, Ashwani Bandhu, R.S Walia, Qasim Murtaza. Optimization to the parameters of abrasive flow machining by Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*. Volume 5, Issue 2, Part 1, 2018, Pages 4720-4729, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.044>.

78. Li Junye, Liu Weina, Yang Lifeng, Sun Fengyu. Study of Abrasive Flow Machining Parameter Optimization Based on Taguchi Method. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. Volume 10, Number 12, December 2013, pp. 2949-2954(6) <https://doi.org/10.1166/jctn.2013.3307>

79. Yang, L. F., Dong, C. Y., & Liu, W. N. Numerical Investigation on the Effect of Abrasive Property for Abrasive Flow Machining. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 574, Trans Tech Publications, Ltd., July 2014, pp. 406–410. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.574.406.

80. Liu, Wei Na, Shi Min Xie, Li Feng Yang, and Lei Zhao. Design for Experiment Device for Abrasive Flow Machining Based on Pro/E and ANSYA. *Advanced Materials Research*, vol. 197–198, Trans Tech Publications, Ltd., Feb. 2011, pp. 69–73. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/amr.197-198.69.

81. Ali-Tavoli, M., Nariman-Zadeh, N., Khakhali, A., & Mehran, M. (2006). Multi-objective optimization of abrasive flow machining processes using polynomial neural networks and genetic algorithms. *Machining Science and Technology*, 10(4), 491–510. <https://doi.org/10.1080/10910340600996126>
82. Mali, H.S., Manna, A. Simulation of surface generated during abrasive flow finishing of Al/SiCp-MMC using neural networks. *Int J Adv Manuf Technol* 61, 1263–1268 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4091-6>
83. Fountas NA, Vaxevanidis NM. Optimization of Abrasive Flow Nano-Finishing Processes by Adopting Artificial Neural Intelligence. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021; 5(1):22. <https://doi.org/10.3390/jmmp5010022>
84. Schmitt, Joachim & Diebels, Stefan. (2013). Simulation of the abrasive flow machining process. *ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*. 93. 10.1002/zamm.201200111.
85. Fletcher, A.J., Hull, J.B., Mackie, J., Trengove, S.A. (1990). Computer Modelling of the Abrasive Flow Machining Process. In: Meguid, S.A. (eds) *Surface Engineering*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7_59
86. Hull J, O'Sullivan D, Fletcher A, Trengove S, Mackie J (1992). Rheology of carrier media used in abrasive flow machining. *Key Eng Mater* 72-74:617–626. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.72-74.617>
87. Jain VK, Ranganatha C, Muralidhar K (2001). Evaluation of rheological properties of medium for AFM process. *Mach Sci Technol* 5(2):151–170. <https://doi.org/10.1081/MST-100107841>
88. Левко, В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2005. – № 4. – С. 96-100.
89. Левко, В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины / В. А. Левко // Вестник Чувашского государственного педагогического

университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2008. – № 2(5). – С. 85-94.

90. Свиридюк, Г. А. Заметки о линейных моделях вязкоупругих сред / Г. А. Свиридюк, Т. Г. Сукачева // Вестник Челябинского государственного университета. – 1996. – Т. 3, № 1(3). – С. 135-147.

91. Снетков, П. А. Исследование энергетических процессов в зоне резания при абразивно-экструзионной обработке / П. А. Снетков, Е. Б. Пшенко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 6(13). – С. 100-103.

92. The research of thermophysical properties of the working environment for abrasive-extrusion processing / E. B. Pshenko, I. Ya. Shestakov, I. A. Remizov, T. A. Veretnova // Siberian Journal of Science and Technology. – 2019. – Vol. 20, No. 2. – P. 277-283. – DOI 10.31772/2587-6066-2019-20-2-277-283.

93. Михин, Н.М. Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин. – М. : Наука, 1977. – 219 с.

94. Справочник по триботехнике : в 3 т. Т.1. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе – М. : Машиностроение, 1989. – 400 с.

95. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

96. Безъязычный, В.Ф. Расчет режимов обработки, обеспечивающих комплекс параметров поверхностного слоя и точность обработки / В.Ф. Безъязычный. // Инженерный журнал. – 1998. – № 9 (18). – С. 13–19.

97. Чеповецкий, И.Х. Основы финишной алмазной обработки / И.Х. Чеповецкий. – Киев : Наук. думка, 1980. – 468 с.

98. Сысоев, С. К. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. – 1-е, Новое. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2011. – 352 с. – ISBN 978-5-8114-1140-5.

99. 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".

100. 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.

101. Хохлов, А. В. Анализ свойств нелинейной модели сдвигового течения тиксотропных сред, учитывающей взаимное влияние эволюции структуры и процесса деформирования / А. В. Хохлов, В. В. Гулин // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 41-63. – DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_4_41.

102. 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.

103. 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.

104. Пономарев, К. С. Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия / К. С. Пономарев, М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов // Вестник МГТУ "Станкин". – 2019. – № 4(51). – С. 19-23.

105. Бильданов, Р. Г. Интеллектуализация процессов подготовки высокотехнологичных производств / Р. Г. Бильданов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 451-458. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-446-447.

106. DebRoy, T., Mukherjee, T., Milewski, J.O. et al. Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions. *Nat. Mater.* 18, 1026–1032 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0408-2>

107. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники : Учебное пособие / Н. В. Коберник, А. С. Филимонов, А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев. – 1-е изд.. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 1 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-12043-1.

108. Косушкин, П. Новые возможности литейного производства с применением промышленных 3D-принтеров / П. Косушкин // Литейщик России. – 2017. – № 9. – С. 40-42.

109. Металлизация методом магнетронного напыления пластин из пластика, изготовленных на 3D-принтере / В. А. Семенов, С. В. Работкин, А. С. Гренадеров [и др.] // *Materials. Technologies. Design.* – 2023. – Т. 5, № 3(13). – С. 61-70. – DOI 10.54708/26587572_2023_531361.

110. Filonov D., Kolen S., Shmidt A., Shacham-Diamand Y., Boag A., Ginzburg P. Volumetric 3D-Printed Antennas, Manufactured via Selective Polymer Metallization // *Phys. Status Solidi RRL Rapid Res. Lett.* 2019. V. 13, Iss. 6. DOI: 10.1002/pssr.201800668.

111. Lammel P., Whitehead A. H., Simunkova H., Rohr O., Gollas B. Droplet erosion performance of composite materials electroplated with a hard metal layer // *Wear.* 2011. V. 271, Iss. 9–10. P. 1341–1348. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.034.

112. Любимов, В. В. Технология изготовления технологической оснастки с применением прототипированных оправок / В. В. Любимов, Д. Г. Пермяков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7-2. – С. 272-285.

113. 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.

114. 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.

115. Loveless T.R., Williams R.E., Rajurkar K.P. A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*. V. 47, Iss. 1–2. 1994. P. 133-151. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90091-4).

116. Wan, Y. J. Ang, T. Sato, G. C. Lim. Process modeling and CFD simulation of two-way abrasive flow machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Volume 71. Issue 5-8. pp 1077-1086. DOI 10.1007/s00170-013-5550-4

117. Zhang L., Yuan Z., Qi Z., Cai D., Cheng Z., Qi H. CFD-based study of the abrasive flow characteristics within constrained flow passage in polishing of complex titanium alloy surfaces. *Powder Technology*. V. 333. 2018. P. 209-218. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.046>.

118. Иванов, П. А. Моделирование и экспериментальная отработка обработки абразивным потоком внутренней поверхности заготовок некруглого сечения / П. А. Иванов, В. А. Левко, О. В. Литовка // Металлообработка. – 2022. – № 3(129). – С. 24-34. – DOI 10.25960/mo.2022.3.24.

119. Виноградов, Г.В. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин. - М.: Химия, 1977. - 438 с.

120. 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.

121. Dash R., Maity K. Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models. *Front. Mech. Eng.* 10, 424–432 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0366-6>

122. 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.

123. Анализ применимости обработки абразивным потоком с помощью вибрации или ультразвуковых колебаний труднообрабатываемых деталей / А. Е. Симакова, В. А. Левко, Д. И. Савин, Н. С. Теряев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т. 1, № 14. – С. 63-66.

124. 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.

125. 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.

126. 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.

127. Определение регрессионных зависимостей шероховатости и микротвердости поверхности литых образцов из стали 08Х14Н7МЛ 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

128. Левко, В. А. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена / В. А. Левко, Д. И. Савин, О. В. Литовка // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 1(150). – С. 36-51. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51

129. Левко, В. А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко // Металлообработка. – 2008. – № 3(45). – С. 19-23.

130. Коротков, А. Н. Повышение работоспособности шлифовальных инструментов на основе эффективного использования свойств зерен : специальность 05.03.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Коротков Александр Николаевич. – Москва, 1993. – 38 с.

131. Афанасьев, А. А. Применение суперэвм для трехмерного моделирования работы турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А. А. Афанасьев, Ю. В. Демьяненко, В. К. Першин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 9(131). – С. 10-15.

132. Афанасьев, А. А. Применение кавитационной модели Релея-Плессета для исследования течения криогенной жидкости в трактах шнекоцентробежного насоса / А. А. Афанасьев, Ю. В. Демьяненко, А. Н. Попков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 44-49.

133. 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.

134. Левко, В. А. Особенности операционного контроля при обработке абразивным потоком / В. А. Левко, П. А. Иванов, О. В. Литовка // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 24–26 февраля 2022 года. – Красноярск: "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 48-50.

135. Pat. 4936057 U.S. ISC B24B 57/02. Finish machining the surface of irregularly shaped fluid passages / L.J. Rhoades. 09.09.1985; 26.06.1990. – Т. 1115. – № 4.

136. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Карта метрологического обеспечения качества и достоверности измерений

Техническое средство измерения	Профилометр	Твердомер	Микроскоп
Модель, тип	MarSurf M300	BUEHLER MICROMET 5100	Olimpus GX 41
Диапазон измерения, min	90	0,25	12,5
Диапазон измерения, max	350	62,5	1000
Единица измерения	мкм	кгс	мкм
Погрешность измерения, min	0,01	0,5%	0,1
Погрешность измерения, max	0,1	2%	0,5
Измеряемый параметр отклика	Шероховатость	Твердость, HV	Изображение (снимок)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о промышленных испытаниях улучшения шероховатости и параметров твердости поверхности закрытых каналов сложнопрофильных деталей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя абразивным потоком

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор СибГУ им. М.Ф. Решетнева
по НИД, д. ф.-м. н., профессор
Ю.Ю. Логинов
(Ф.И.О.)



УТВЕРЖДАЮ:
И.о. технического директора
АО «Красмаш»
В.В. Худогов
(Ф.И.О.)



АКТ

о промышленных испытаниях улучшения шероховатости и параметров микротвердости поверхности закрытых каналов сложнопрофильных деталей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя абразивным потоком

Комиссия в составе представителей АО «Красмаш» заместителя главного технолога – начальника отдела механической обработки И.С. Преда, заместителя начальника отдела – начальника бюро механической обработки А.С. Германа, и представителя СибГУ им. М.Ф. Решетнёва заведующего кафедрой технологии машиностроения Л.В. Ручкина составила заключение о результатах промышленных испытаний улучшения шероховатости и параметров микротвердости поверхности закрытых каналов сложнопрофильных деталей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя абразивным потоком доцента кафедры технологии машиностроения Теряева Николая Сергеевича.

Для обработки представлена крыльчатка с закрытыми изогнутыми межлопаточными каналами, изготовленная методом литья по выплавляемым моделям.

Обработка произведена на лабораторно-промышленной установке УЭШ-100 в соответствии с технологическими параметрами, установленными в ходе исследований И.С. Теряева (сдвигающее давление – 12 МПа, время обработки 28 - 30 мин (60 циклов)) по способу обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток (патент № 2751073 С1 Российская Федерация).

Контроль результатов испытаний осуществлялся в соответствии с утвержденной заводской методикой АО «Красмаш».

В ходе промышленных испытаний установлено:

- равномерное по всей длине и сечению канала снижение шероховатости поверхности всех межлопаточных каналов крыльчатки с исходной $Ra = 8,9...10,2$ мкм до $Ra = 2,4...2,8$ мкм (литейная корка удалена полностью), при этом шероховатость обработанной поверхности приобрела направление параллельное направлению потока рабочей среды;

- увеличение микротвёрдости входных кромок лопаток от 38,5-40,5 HRC до 43,5-45,5 HRC.

От СибГУ им. М.Ф. Решетнева:

Зав. каф. «ТМС»
Л.В. Ручкин
(подпись)

От АО «Красмаш»:

Зам. главного технолога –
начальник отдела механической
обработки

И.С. Преда
(подпись)

Зам. начальника отдела –
начальник бюро механической
обработки

А.С. Герман
(подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о планируемом внедрении в опытное производство научно-технических результатов исследований

УТВЕРЖДАЮ:
И.о. технического директора
АО «Красмаш»
В.В. Худонеров



АКТ о планируемом внедрении в опытное производство научно-технических результатов исследований

Комиссия в составе представителей АО «Красмаш» заместителя главного технолога – начальника отдела механической обработки И.С. Преда, заместителя начальника отдела – начальника бюро механической обработки А.С. Германа, составила настоящий акт в том, что научно-технические результаты исследований «Улучшение шероховатости и параметров микротвердости поверхности закрытых каналов сложнопольных деталей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя абразивным потоком», проведенных доцентом кафедры технологии машиностроения СибГУ им. М.Ф. Решетнева Теряевым Николаем Сергеевичем планируется к внедрению в опытное производство.

Научно-технические результаты исследований включают в себя:

- способ обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток с применением направляющего аппарата, заключающийся в многократном возвратно-поступательном продавливании абразивного потока вдоль обрабатываемых поверхностей крыльчаток с помощью направляющего аппарата, образующего канал совместно с обрабатываемой поверхностью и имеющего лопатки с рабочей поверхностью, идентичной обрабатываемой поверхности крыльчатки, отличающийся, при этом выходные сечения каналов направляющего аппарата аналогичны по форме и размерам входным сечениям межлопаточных каналов крыльчатки или меньше его размеров на величину коэффициента упругого восстановления струи абразивного потока, причем между каналами направляющего аппарата и обрабатываемой крыльчатки образован зазор, который выполнен из условия предотвращения возникновения эффекта упругого восстановления струи абразивного потока, а обрабатываемая крыльчатка установлена в приспособление на цилиндрический палец и призматический палец для исключения проворачивания крыльчатки во время обработки;

- специальный состав рабочей среды: каучук синтетический диметилсилоксановый термостойкий СКТ – 50 %; карбид кремния зернистостью F70 (350 мкм) – 45 %, другие наполнители – 5%;

- рекомендации по выбору технологических режимов обработки абразивным потоком.

Использование результатов научно-технических исследований позволит обеспечить требуемые параметры шероховатости и микротвердости внутренней поверхности межлопаточных каналов крыльчаток, полученных методом литья по выплавляемым моделям. Использование данной технологии финишной обработки в перспективе позволит увеличить технологические возможности применения метода литья по выплавляемым моделям деталей турбонасосного агрегата.

От СибГУ им. М.Ф. Решетнева:

Зав. кафедрой «ТМС»
И.В. Ручкин


(подпись)

От АО «Красмаш»:

Зам. главного технолога –
начальник отдела механической
обработки


(подпись) И.С. Преда

Зам. начальника отдела –
начальник бюро механической
обработки


(подпись) А.С. Герман

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт об использовании научно-технических результатов исследований в учебном процессе кафедры «Технологии машиностроения» Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва

УТВЕРЖДАЮ
 Исполнительный директор СибГУ им. М.Ф. Решетнева
 по НИИ, д. ф.-м. н., профессор
 Логинюв Ю.Ю.
 (подпись) _____
 09 2023 г



АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы доцента кафедры технологии машиностроения Теряева Николая Сергеевича «Улучшение шероховатости и параметров микротвердости поверхности закрытых каналов сложнопрофильных деталей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя абразивным потоком», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, в учебном процессе СибГУ имени М. Ф. Решетнева.

Мы нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой технологии машиностроения, к.т.н., доцент Л. В. Ручкин и профессор кафедры технологии машиностроения д.т.н., доцент В.А. Левко составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Н. С. Теряева внедрены в учебный процесс кафедры технологии машиностроения СибГУ имени М.Ф. Решетнева, при обучении студентов по направлению 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств магистерской программы «Технологические процессы а машиностроении».

Результаты диссертационной работы внедрены при преподавании следующих учебных дисциплин:

- «Новые методы финишной обработки» в раздел 2 курса лекций и практическую работу «Односторонняя обработка абразивным потоком»;
- «Обработка абразивным потоком» в раздел 2.2 курса лекций и практическую работу «Односторонняя обработка абразивным потоком. Номенклатура обрабатываемых деталей и материалов. Технологическое оборудование и оснастка».

Заведующий кафедрой ТМС, к.т.н.,
 доцент

Профессор кафедры ТМС, д.т.н., доцент

Л.В. Ручкин

(подпись)

В.А. Левко

(подпись)