

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-3-12



УДК 621.048.7

UDC 621.048.7

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ИЗ ГРАНУЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

PROBLEM-ORIENTED OPTIMIZATION OF MACHINING TECHNOLOGY FOR POWER PLANT COMPONENTS FROM GRANIT BLANKS

Таскинбаев Андрей Артурович, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: andrey.taskinbaev@yandex.ru

Taskinbaev Andrey Arturovich, postgraduate student in the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: andrey.taskinbaev@yandex.ru

✉¹ **Сухочев Геннадий Алексеевич**, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

✉¹ **Sukhochev Gennady Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Коденцев Сергей Николаевич, к.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: kodentsev.sergey@mail.ru

Kodentsev Sergey Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: kodentsev.sergey@mail.ru

Подгорнов Сергей Николаевич, конструкторское бюро химавтоматики, г. Воронеж, e-mail: s.n.podgornov.vmz@gmail.com

Podgornov Sergey Nikolaevich, chemical automation design bureau, Voronezh, e-mail: s.n.podgornov.vmz@gmail.com

Смольяникова Евгения Геннадьевна, к.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Smolyannikova Evgeniya Gennadyevna, candidate of technical sciences, associate professor, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Аннотация. Целью исследований данной работы являются комплексные технологические процессы комбинированной доводки ответственных деталей из гранульных заготовок с целью оптимизации качества постобработки рабочих поверхностей.

Annotation. The objective of this study is to explore comprehensive combined finishing techniques for high-precision components produced from granular preforms, targeting improved surface quality after final processing.

Ключевые слова: ОПТИМИЗАЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ, КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, МИКРОШАРИКИ, НАКЛЕП, ШЕРОХОВАТОСТЬ.

Keywords: OPTIMIZATION, MANUFACTURABILITY, COMBINED EFFECT, MICROSPHERES, WORK HARDENING, ROUGHNESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Экстремальные условия работы агрегатов перспективных образцов двигательных энергоустановок в агрессивных водородосодержащих эксплуатационных средах определяют особенности конструктивного исполнения отдельных деталей сложной формы и сборочных единиц, и выдвигают специальные условия к процессам их изготовления, специфику проведения отдельных операций и их контроля. Для технологического обеспечения эксплуатационных показателей агрегатов перспективных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) необходимо особое внимание обратить на наиболее уязвимые агрегаты и детали с точки зрения эксплуатации в экстремальных условиях.

К числу таких агрегатов относится турбонасосный агрегат (ТНА), который занимает особое место при разработке ЖРД. Он требует наряду с такими агрегатами, как камера сгорания, самого длительного цикла доводочных работ на всех этапах создания: проектирование, изготовление и отработка. Пространственная конструкция, высокая частота вращения, тесная взаимосвязь условий работы агрегата с процессами, протекающими в двигателе, являются причинами того, что количество дефектов по наиболее нагруженным ТНА может составлять 50-70 % от количества дефектов по всему двигателю в период его отработки. Сложность выявления причин дефектов, возникающих в процессе отработки двигателя, заключается в том, что процессы, происходящие в ТНА, быстротекущие: ротор ТНА совершает за одну секунду до 2000 оборотов, а процесс развития дефектов, связанный с высокотемпературным воздействием от горения топлива, длится сотые доли секунды. В связи с этим, создание ТНА современных ЖРД является сложной технической задачей [1].

Наличие в конструкции ТНА технологически труднодоступных элементов, в ряде случаев, исключает допуск инструмента в зону обработки для реализации финишных отделочно-упрочняющих операций и требует разработки принципиально новых подходов к технологии обеспечения заданных показателей качества рабочих поверхностей роторных деталей [2].

Значительный объем отработки характерен для таких деталей, как турбины закрытого типа с неразъемным бандажом, имеющие криволинейные участки сужающихся или расходящихся стенок межлопаточного пространства [3]. В этом случае каналы не имеют сквозного просвета и получение заготовок турбин технологически большей частью ограничено методами литья в оболочковые формы с последующей высокотемпературной газостатической обработкой. Межлопаточные пространства в заготовках формируются литейными формами в условиях трудно прогнозируемой кристаллизации жаропрочных сплавов и усадочных явлений, способствующих образованию корок с трещинами и пористости. Такие заготовки передают на последующие операции технологии изготовления наследованный поверхностный слой на лопатках с недопустимыми для эксплуатации дефектами. Широко известные отечественные научные школы (ИМАШ РАН, НИАТ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, СГАУ им. С.П. Королёва, г. Самара, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, ВГТУ г. Воронеж и др.) для обработки литых поверхностей отдадут предпочтение традиционным эффективным, но непроизводительным виброударным технологиям [4].

В последнее время колесо турбины с валом изготавливают из заготовки, полученной горячим изостатическим прессованием (ГИП) в индивидуальной капсульной оснастке из гранул сплава ЭП741НП. После извлечения заготовки из оснастки проводится электроэрозионная

обработка по формированию профиля лопаток, окончательная механическая обработка, нанесение покрытий и параметрические испытания. В результате функционально-стоимостного анализа сквозного технологического процесса было установлено, что самой трудоемкой и длительной являются операции электроэрозионного прошивания межлопаточных каналов в гранульной заготовке турбины. Трудоемкость данной операции доходит до 500 н/ч и длится более 30 календарных дней при полной загрузке низкопроизводительного дорогостоящего электроэрозионного оборудования с ЧПУ [5].

После выполнения электроэрозионной обработки межлопаточных каналов образуется поверхностный измененный слой до 300 мкм, что негативно влияет на эксплуатационные характеристики детали и надежность ТНА в целом. Все это снижает уровень прогнозируемой разработчиком технологичности в разы. Применительно к новым изделиям ситуация с механизированными технологиями отделки и упрочнения поверхностей роторных деталей по степени научного обоснования и оснащенности не обеспечивает требуемых параметров качества и не способствует повышению их производственной технологичности.

Остаются актуальными задачи выбора технологии получения заготовок детали и теоретического описания оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки цельных турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности при минимизации затрат. Решение этих научно-технических вопросов предлагается на основе обоснованной методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей выбором средств и режимов формообразования поверхностей межлопаточных каналов по конструктивно-технологическим признакам.

Целью работы является выбор оптимальной технологии изготовления, разработка теоретических основ и методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности роторных деталей выбором средств формообразования поверхностей по конструктивно-технологическим признакам.

Задачи:

1. Обосновать процесс выбора оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки гранульных заготовок цельных турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности труднообрабатываемого материала при минимизации затрат и при заданном уровне качества.

2. Установить область влияния технологических параметров и режимов процесса комплексного последовательного воздействия различных способов получения заготовки на стабильность показателей качества согласно технической документации.

3. По результатам экспериментальных сравнительных исследований процессов снижения шероховатости и упрочнения установить максимально производительные технологические операции обработки для различных роторных деталей, значительно различающихся по конструктивно-технологическим признакам.

4. Сформулировать регламент выбора наиболее технологичных отделочно-упрочняющих операций комбинированного технологического процесса обработки гранульных заготовок в соответствии с особенностями геометрии роторных деталей и требований к качеству их обработки.

Решение этих задач позволит теоретически и методически обосновать порядок оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности роторных деталей путем выбора методов и средств обработки по конструктивно-технологическим признакам [6, 7]. Результаты исследований дополняют достигнутый задел в области научно обоснованных методов и средств повышения производственной технологичности при изготовлении роторных деталей высокой конструктивно-технологической сложности.

Уже достаточно давно известна технология криогенной обработки сталей, применение которой способствует увеличению их твёрдости, износостойкости и прочности, в связи с чем, исследования влияния низких температур на свойства металлов представляют важное значение в контексте современных технологий и инженерных применений [1]. Одним из ключевых аспектов, требующих углублённого рассмотрения, является сдвиг ниже нуля точки окончания мартенситного превращения у легированных и высокоуглеродистых сталей после возвращения к нормальным эксплуатационным условиям. Следует отметить, что повышенное содержание углерода может быть обусловлено как процессом цементации, так и легированием сталей. Процентное содержание углерода и легирующих элементов напрямую влияет на температурные параметры закалки: увеличение содержания углерода выше 1 % и легирующих элементов может привести к снижению температуры около 25-45 °С на каждый процент содержания добавок [1, 2]. Следовательно, определение оптимального баланса между углеродом и легирующими элементами имеет существенное значение для процессов термической обработки металлов. Некоторые виды сталей могут обладать способностью претерпевать полное превращение аустенита в мартенсит при экстремально низких температурах, что также требует дополнительного изучения и понимания механизмов происходящих процессов.

Исследования по воздействию низких температур на металлы имеют значимость не только на практическом уровне, но и в рамках теоретических исследований [2-4]. Глубокое понимание изменений в структуре и свойствах металлов при экстремальных температурах позволяет разрабатывать новые технологии обработки материалов, уникальные сплавы с улучшенными механическими и физическими характеристиками. Дополнительно, анализ воздействия низких температур на металлы актуален в контексте разработки материалов для применения в космической и авиационной индустрии, где металлы подвергаются экстремальным условиям окружающей среды [5-7]. Поэтому системное изучение поведения металлов при низких температурах имеет стратегическое значение для создания высокопрочных и надёжных материалов для различных отраслей промышленности.

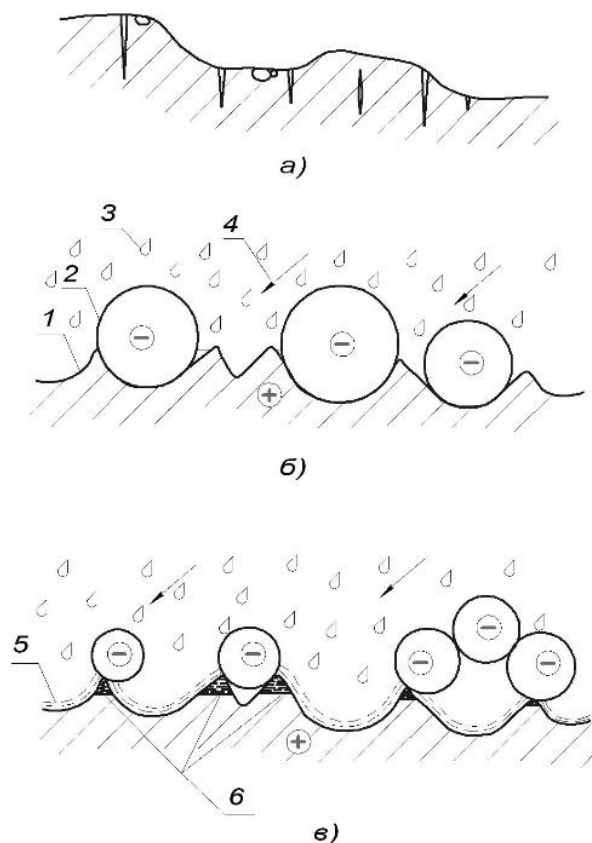
Таким образом, исследование фазового состава металлов в криогенном диапазоне температур становится актуальной задачей.

2 Материалы и методы

Объектами исследования являлись комплексные технологические процессы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей роторной группы.

Предметом исследования явились технологии обработки гранульных заготовок из труднообрабатываемых сплавов в условиях разной степени доступности обрабатываемых поверхностей сложного профиля и проблемно-ориентированное повышение технологичности производства с учетом конструктивных особенностей основных агрегатов двигательных энергоустановок.

Для решения поставленной задачи оптимизирован способ комбинированной обработки внутренних поверхностей деталей токопроводящими микрогранулами с наложением низковольтного электрического поля в условиях использования газожидкостной слабопроводящей среды [8, 9]. Предложенный способ, апробированный на прерывистых конструктивных элементах с отверстиями и пазами [10], позволяет организовать в протяженном отверстии поток постоянно и равномерно (не менее 95 % сплошности покрытия) воздействующего поэтапно на все участки поверхности, создавая равномерный наклеп, выравнивая и снижая технологически наследованную шероховатость за счет интенсивного анодного растворения с деформированных и уплотненных микрогранулами вершин микровыступов. Последнее позволяет обеспечить стабильность силовых и электрохимических параметров комбинированного воздействия микрогранул на всей длине проточной части деталей. На рис. 1 показаны основные стадии этого способа комбинированной обработки микрошариками.



1 – деталь; 2 – микрошарики; 3 – токопроводящая газожидкостная среда; 4 – направление движения микрошариков; 5 – жидкостная пленка; 6 – микровыступы

Рисунок 1 – Схема и этапы способа комбинированной обработки микрошариками

Предлагаемое решение направлено на получение равномерной степени наклепа и устранения микротрещин по всей обрабатываемой поверхности. Это достигается тем, что обработка поверхностей по предлагаемому способу заключается в подаче на обрабатываемые поверхности сжатым воздухом потока микрошариков, и процесс обработки проводят в газожидкостной слабопроводящей среде с наложением низковольтного электрического поля. На рис. 1, а показана нестабильность исходного макрорельефа поверхности. Микротрещины в поверхностном слое могут выходить на поверхность или оставаться замкнутыми в материале подповерхностного слоя и выходить на поверхность в процессе эксплуатации изделия под действием знакопеременных нагрузок из-за пульсаций давления рабочего тела. Внутренние рабочие поверхности, особенно длинномерных деталей, имеют в большинстве случаев различные пазы и полости, недопустимые уступы, трещины и погрешности формы, выходящие зачастую за допуски на номинальные размеры, что в случаях гидродинамического, абразивного трения, знакопеременных нагрузок в водородосодержащих средах резко снижают работоспособность дорогостоящего в изготовлении и эксплуатации оборудования.

Формирование благоприятного для различного рода эксплуатационных свойств поверхностного слоя проходит в несколько этапов. Во-первых, на исходную дефектную поверхность 1 (рис. 1, б) с направлением к ней 4 под углом не более 60° подают микрошарики 2 более крупной фракции (150-200 мкм), которые за счет деформационного сдвига перераспределяют выступы и впадины и залечивают микродефекты. Наличие жидкостной токопроводящей среды 3 образует постоянно обновляющуюся пленку жидкости и препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных напряжений растяжения, а также ускоряет процесс за счет явления анодного растворения материала. Затем, подают более

мелкую фракцию микрошариков 2 (до 50 мкм), которые окончательно выравнивает микроповерхность (рис. 1, в). Выравнивание микрогеометрии значительно зависит от скорости анодного растворения в месте микровыступа б, которая в момент контакта шарика с деталью через жидкостную токопроводящую пленку 5 резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения, и тогда время обработки составляет не более 15 с на участок пятна распыла.

3 Результаты исследований

При моделировании процесса принимаются исходные данные: физико-механические свойства материала микрогранул и детали; радиус кривизны (диаметр) обрабатываемого отверстия; исходная и требуемая величина наклепа поверхностного слоя и высота микронеровностей. Граничными условиями являются: предельно достижимые значения наклепа или высоты неровностей после обработки в условиях экранирования среды; предельные значения давления в потоке обрабатывающей среды, определяемые расходом сжатого воздуха и концентрацией микрогранул. Основным показателем импульсного механического воздействия на поверхность является скорость ее деформации.

Параметры оптимизации процесса – расход обрабатывающей среды и скорость деформирования микровыступов обрабатываемой поверхности. Учитывая при определении скорости смеси микрошариков, воздуха или жидкости на основе известных законов гидродинамики скорость истечения газожидкостной смеси через сопла под давлением можно представить в следующем виде.

Для твёрдых сферических частицах радиусом описанной окружности R , падающих на поверхность детали со средней скоростью V_{cp} , средняя скорость ее деформации составляет V/R . Средняя скорость потока гранул с газожидкостной средой:

$$V_{cp} = k_{ж}k_{мкш}Q / (F_c \cdot 3600), \quad (1)$$

где Q – расход сжатого воздуха, м³/ч; F_c – площадь поперечного сечения отверстия сопла, м²; $k_{ж}$ – коэффициент, учитывающий влияние подмешиваемой в поток на выходе из сопла жидкости ($k_{ж} = 0,95-0,97$); $k_{мкш}$ – коэффициент, экспериментально учитывающий влияние расхода склонных к слипанию микрошариков через дозатор ($k_{мкш} = 0,7-0,85$) на скорость потока обрабатывающей среды.

Уравнение движения в процессе контактирования:

$$\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \frac{dV}{dt} = -\pi R_a^2 \bar{P} \quad (2)$$

где R – радиус частицы, мм; R_a – радиус вмятины, мм, ρ – плотность материала детали, кг/м³; \bar{P} – среднее давление в зоне контакта, Па. Полная пластичность наступает при значениях $\bar{P} = 3\sigma_T$.

Среднее давление \bar{P} , оказывающее сопротивление движению, при соотношении параметра деформации $E/\sigma_T R \leq 36$, обеспечивает получение вмятины размером $0,004R$ для сталей, где отношение модуля текучести к модулю упругости $\sigma_T/E = 0,0024$, что установлено экспериментально. С учетом (2) после интегрирования при условии $\bar{p} = 3\sigma_T$

$$1/\Omega = \left\{ \left(0,2 + \frac{2}{9} \ln E / \sigma_T \right) + \frac{1}{9} \left[\ln(2\bar{Z}/R) - \frac{4\bar{Z}}{R} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где Ω – коэффициент, учитывающий степень предварительной деформации поверхности, \bar{Z}_{np} . Это уравнение описывает начальную стадию деформирования, как только величина давления

возрастет до $3\sigma_T$, для дальнейших расчетов следует пользоваться эмпирическими зависимостями для более многогранных условий при обработке труднообрабатываемых материалов.

У микрошарика диаметром 300-100 мкм есть в этом смысле ограничения по массе, к тому же ему необходимо присутствие жидкости от перегрева поверхности и удаления продуктов работы. Уравнение движения микрошариков с учетом экспериментальных исследований:

$$K = MV^2/2 - F_{св} - F_{тр} - g \cdot \cos\beta, \quad (4)$$

где M – масса шарика, кг; V – скорость вылета, м/с; $F_{св}$ – сила сопротивления воздуха среды, Н; $F_{тр}$ – сила трения в потоке, Н; $g \cdot \cos\beta$ – гравитационная составляющая, величина переменная, зависящая от массы шарика.

В итоге микрошарик при встрече с поверхностью достигал скорость только 10-12 м/с от требуемых 80-100 м/с, так что не удавалось разрушить образовавшуюся на поверхности окисную пленку и продолжить процесс деформирования. Соединение потока микрошариков с газожидкостным потоком при наложении тока низкого напряжения позволило сразу повысить скорость шариков при контакте до 30-40 м/с по нескольким причинам:

- снизилось на 14 % трение в потоке из-за уменьшения его плотности на 30 %;
- газовая среда, обладающая определенной (не более 1-1,15 % от $g \cdot \cos\beta$) несущей способностью в потоке пара, тоже вложила свою долю;
- микрошарик начинает пробивать окисную пленку, которая частично разрушается анодным низковольтным растворением.

Если принять в качестве исходной информации высоту микронеровностей до обработки, а граничными условиями – время действия анодного растворения при постоянной механической депассивации поверхности, то процесс съема неровностей с учетом известных выражений за единичный импульс контакта микрошариков в эффективном пятне распыла имеет вид:

$$(\Delta_1 + \Delta_2) = \Delta_0 - K_{гж} (\alpha/\gamma) \cdot \eta \cdot j_{ср} \cdot \tau_{и}, \quad (5)$$

где α – электрохимический эквивалент материала заготовки, кг/Кл; γ – удельная плотность материала заготовки, кг/м³; $j_{ср}$ – средняя за импульс плотность тока, А/м²; $\tau_{к}$ – длительность токопроводящего контакта при соударении, с; η – коэффициент выхода по току; $K_{гж}$ – концентрация жидкостной составляющей газожидкостной токопроводящей среды (по данным экспериментов 10-20 %).

Ток J в разряде, как известно, может достигать 100 А, площадь контактного действия F на первом этапе составляет всего 0,05-0,1 мм², а диаметр пятна распыла достигает 30 мкм. Тогда средняя плотность тока составляет $j_{ср} = 0,3J/F$, а плотность микрошариков в потоке – 20-30 %. Длительность токопроводящего контакта рассчитывается по зависимости:

$$t_{к} = K_{эж} r_{заг} \sqrt{\frac{\chi}{\mu \cdot f}}, \quad (6)$$

где $r_{заг}$ – радиус зоны обработки в заготовке (до 15 мм); μ – коэффициент Пуассона; f – постоянная частота соударений шариков с поверхностью.

На втором этапе площадь контакта гранулы с поверхностью заготовки составляет всего 0,02-0,05 мм². Расчет времени контакта позволяет получить несколько приближенные результаты, а прямые измерения, приведенные дают $t_{к} = 0,3-0,6$ мкс. Скорость съема вершин микронеровностей зависит от анодного растворения при наклепе, которая может быть откорректирована полученными экспериментально коэффициентом, учитывающим анодное растворение,

$K_{ap} = 1,05-1,15$ и коэффициентом механического удаления неровностей $K_{my} = 1,1-1,2$.

С учетом этого время выравнивания микрогеометрии в месте соударения составит:

$$t_e \leq t_k N = \frac{K_{эж} \delta_{пл} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{\frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi U K_{ap} K_{my}}, \quad (6)$$

где $\delta_{пл}$ – толщина окисной пленки в зоне контакта, мм; N – количество соударений шариков до полного насыщения поверхностного слоя пластическим деформированием.

Длительность обработки $t_{уч}$ участка одного распыла с учетом значений F составит:

$$t_{уч} = \frac{t_k \pi R^2}{F} = \frac{K_{эж} \pi R^2 \delta_{пл} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{F \frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi U K_{ap} K_{my}} \cdot N, \quad (7)$$

При соударении шариков с заготовкой известно, что когда разрушается окисная пленка и происходит небольшое анодное растворение контактной поверхности, то дальнейшее выравнивание микропрофиля поверхности микрошариками происходит в основном за счет динамического давления микрошариков на поверхность, определяемое нами под углом соударения α с поверхностью зависимостью:

$$\bar{p} = (3\sigma_T + \sigma^{++} + \sigma_{хруп}) \alpha, \quad (8)$$

где σ_T – предел текучести материала, МПа; σ^{++} – растягивающие напряжения от предыдущих этапов обработки (70-90 МПа). $\sigma_{хруп}$ – напряжение хрупкого разрушения окисных пленок после воздействия анодного растворения (до 40-50 % от \bar{p}).

Съем материала за 1 импульс тока (в промежутке между соударениями) на последнем этапе незначителен и составляет доли микрометра. Анодное воздействие в данном случае должно только удалять продукты деформационного воздействия и корректироваться напряжением U_0 в пределах 2-5 В.

Расчет технологических режимов комбинированной обработки:

1. Выбор диаметра микрошариков:

$$d_{ш} = 2R_{в пр} = R_a^2 / h_y, \text{ мм}, \quad (9)$$

где $R_{в пр}$ – вписанный в лунку и приведенный к среднему диаметру радиуса пластического отпечатка, мм; R_a – радиуса пластического отпечатка в горизонтальной плоскости, мм; h_y – глубина пластического отпечатка, мм.

Полученный результат после опытной обработки на имитаторе и сравнения с аналитическими расчетами округляют до стандартного значения. Если расчетное значение превышает размеры шариков, разделенных на фракции в вибрационном сите, то их величину берут с учетом имеющихся типоразмеров шариков.

2. Из технической документации на деталь устанавливаются требования по степени наклепа и шероховатости отверстия.

3. Если шероховатость заготовки отвечает требованиям чертежа, то расчет режимов ведут по заданному наклепу.

3. Если требуется снизить шероховатость от Δ_2 до R_{Zmin} , то припуск Z составит Δ_2 до R_{Zmin} и минимальное время обработки элементного участка ведут по (6) и (7).

4. Общее время обработки рассчитываем по формуле:

$$t_{\text{общ}} = \pi Dn / d, \quad (10)$$

где D – диаметр отверстия, мм; n – число оборотов детали с оснасткой, об/мин⁻¹; d – эффективное ядро распыла микрошариков, связанное с D .

4 Обсуждение и заключение

Предложены оптимальные режимы комбинированной обработки, включающие механическое воздействие и анодное растворение, что обеспечивает требуемые технологические показатели процесса. Оптимизированные режимы комбинированной доводки:

- напряжение источника питания – 5-10 В;
- время обработки каждого участка поверхности – 60 с;
- угол соударения потока микрошариков с поверхностью $\alpha = 60^\circ \pm 5^\circ$;
- диаметр сопла – 10 мм; скорость вращения шпинделя установки – 20-60 мин⁻¹;
- давление сжатого воздуха в струйном аппарате – 0,2-0,4 МПа;
- инструмент – металлические микрогранулы сферической формы диаметром 50–150 мкм в газожидкостной токопроводящей среде с использованием промышленной воды;
- расход газожидкостной слабопроводящей среды – 2 м³/мин.

Достигнутые технологические показатели: для легированных сталей $R_a = 0,16-0,32$ мкм, разброс по степени наклепа ± 3 %; для заготовок из жаропрочных сплавов $R_a = 0,16-0,25$ мкм, разброс по степени наклепа ± 3 %. Достигнутые показатели улучшают результаты, получаемые ранее. Испытания нагруженных деталей в условиях эксплуатации показали положительные результаты, что подтвердило правомерность результатов исследований, приведенных в работе.

Список литературы

- 1 Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г.А. Сухочев. – Воронеж: ВГУ, 2003. – 286 с.
- 2 Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Д. В. Силаев // Патент №2788444 Российская Федерация, В23Н 5/06, В23В 09/00.; заявитель и патентообладатель Воронежский гос-ударственный технический университет. - № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. – 8с.
- 3 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnovich S.S. // Materials Today: Proceedings. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020». 2021. pp. 1943-1945.
- 4 Способ упрочняющей обработки внутренних поверхностей деталей / Г.А. Сухочев, Е.Г. Смольяникова, Д.М. Небольсин // Патент на изобретение RU 2491155 С2, 27.08.2013. Заявка № 2011106714/02 от 25.06.2012. Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный технический университет» (RU).
- 5 Сухочев Г.А. Технологическое обеспечение повышенного ресурса нагруженных поверхностей сложного профиля / Г.А. Сухочев., С.Н. Коденцев, В.А. Кашицин // Насосы. Турбины. Системы. – 2024. – № 4 (53). – С. 23-31.
- 6 Некрылов, А.М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.
- 7 Некрылов, А.М. Повышение производственной технологичности рабочих поверхностей нагруженных деталей применением упрочняющей комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, В.Г. Грицок // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Том Т. 16. – № 4 (184). – С. 182-186.
- 8 Сухочев, Г.А. Технологические аспекты изготовления деталей быстроходных роторов из мелкодисперсных порошков / Г.А. Сухочев, И.Г. Дроздов, Е.Г. Смольяникова, А.А. Таскинбаев // Насосы. Турбины. Системы. – 2025. – № 4 (57). – С. 7-78.

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

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

References

1 Sukhochev, G.A. Quality Management of Products Operating under Extreme Conditions with Non-Stationary Loads / G.A. Sukhochev. Voronezh: VSU, 2003. 286 p.

2 Method for Hardening Internal Surfaces of Component Channels / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, D.V. Silaev // Patent No. 2788444 Russian Federation, B23H 5/06, B23B 09/00; applicant and patent holder Voronezh State Technical University. - No. 2022100797, filed 25.05.2019; publ. 19.01.2023, Bull. No. 2. - 8 p.

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

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

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

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

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

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

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

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

© Таскинбаев А. А., Сухочев Г. А., Коденцев С. Н.,
Подгорнов С. Н., Смольяникова Е. Г., 2026