

Г.А. Сухочев, д.т.н., А.М. Некрылов, аспирант, А.Ю. Грымзин, аспирант,
С.Н. Подгорнов, аспирант, В.Н. Сокольников, аспирант
(Воронежский государственный технический университет
394026, г. Воронеж, Московский пр., 14)
E-mail: suhotchev@mail.ru

Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей

Предложен способ для упрочнения профильных поверхностей каналов лопаточных деталей, объединяющий процессы вибрационной и экструзионной обработки. Обрабатываемой 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 упрочняющей гранулированной среды по межлопаточным каналам детали.

Ключевые слова: комбинированная виброэкструзионная обработка; вибромашина; межлопаточные каналы; гранулированная рабочая среда; упрочнение обрабатываемых поверхностей.

G.A. Sukhochev, Dr. Sc. Tech., A.M. Nekrylov, Post graduate student, A.Yu. Grymzin, Post graduate student, S.N. Podgornov, Post graduate student, V.N. Sokolnikov, Post graduate student (Voronezh State Technical University, 14, Moskovsky Avenue, Voronezh, 394026)

Strengthening and finishing of hard-to-reach technological flow channels of parts

A method is offered for profile surface strengthening in blade part channels. This method integrates processes of vibration and extrusion processing. During processing the oscillations from a vibratory machine are passed to the part worked and located within a cylindrical container with granulated work environment. Under the impact of low-frequency vibrations at the expense of periodic alternate container revolutions a reciprocal shift of strengthening granulated environment on inter-blade channels of the part takes place.

Keywords: combined vibration and extrusion processing; vibrator; inter-blade channels; granulated work environment; strengthening of surfaces worked.

При создании опытных образцов перспективных энергетических установок двигателей применяют различные технологии – от широко известных, использующих термическую, лезвийную обработку или пластическое деформирование, до нетрадиционных технологий, основанных на комбинациях существующих процессов или на различного рода механических, электрических, химических, лучевых и других воздействиях, объединенных в один комбинированный процесс.

При внедрении в производство технологий, основанных на комбинированных методах обработки, создаются специализированное технологическое оборудование, средства технологического оснащения (СТО) и инструмент, которые позволяют обрабатывать различные твердые и вязкие металлы, жаропрочные стали и сплавы, керамику и композиционные материалы. Благодаря этому появляется возможность получать детали сложной конфигурации

с заданными параметрами микрогеометрии и качеством поверхностного слоя. Их использование дает возможность создавать изделия с высокими потребительскими качествами, обеспечивающими высокий технический уровень и конкурентоспособность новой техники.

Особенно это актуально и важно при разработке современных технически совершенных высокоэкономичных энергоустановок и двигателей. При их создании впервые были применены передовые технические решения, потребовавшие использования целого комплекса взаимоувязанных технологий, обеспечивающих изготовление:

– внутренних стенок камер сгорания с искусственной шероховатостью на огневой стенке для интенсификации внутреннего охлаждения камеры;

– внутренних стенок сопел ракетных двигателей методом ротационного выдавливания с предельно минимальным допуском ($\pm 0,06$ мм)

из высокопрочных сталей с последующим фрезерованием ребер и обработкой по ребрам механическим и электрохимическим способами.

Необходимость использования тех или иных операций с применением комбинированных процессов в общей технологии в процессе создания высокотехнологичной продукции определяется в зависимости от поставленной цели, а один и тот же способ обработки может использоваться для различных задач формообразования.

Например, размерная электрохимическая обработка, используемая для снятия заусенцев в труднодоступных местах, формирования искусственной шероховатости и дифференциального устранения разнотолщинности материала охлаждаемых оболочек (рис. 1), может применяться (после соответствующей адаптации) и для выравнивания микрогеометрии узкого межлопаточного канала переменного сечения роторных деталей, а также составных единиц турбонасосного агрегата (рис. 2).

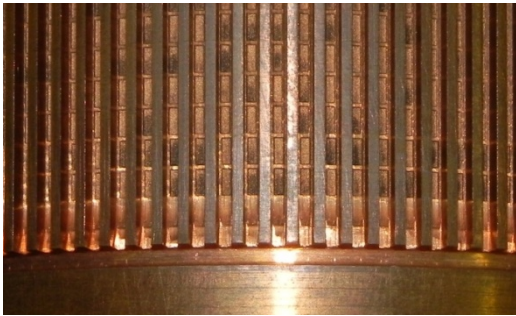


Рис. 1. Фрагмент обрешенной оболочки

При этом появляется возможность комбинированной доводки с заданными показателями качества поверхностей второго порядка узких (менее 5 мм) межлопаточных каналов турбин (рис. 3), которые в настоящее время обрабатываются только по входным и выходным кромкам, не обрабатывая технологически труднодоступные внутренние зоны поверхностей лопаток [1].

На рис. 1 по дну каналов обрешения видны каверны для турбуляции потока охладителя, которые выполняются трудоемким электроэрозионным методом (на обработку одной детали в зависимости от габаритов уходит несколько часов). Этой операции предшествует трудоемкое удаление заусенцев по кромкам ребер, которое слабо поддается механизации (опять же в течение нескольких часов или двух-трех смен на одну оболочку, в зависимости от размеров). Такой низкий уровень производственной технологичности можно повысить использованием нетрадиционных комбинированных методов обработки.

Нетрадиционные технологии являются гибкими, трансформируемыми в зависимости от объекта производства. К ним относятся такие комбинированные методы как электрохимическое фрезерование, виброударная отделочно-зачистная обработка, виброэрозийно-

ное упрочнение, гидродинамическая формообразующая обработка, струйно-динамическое упрочнение микрошариками и др. [1, 2].

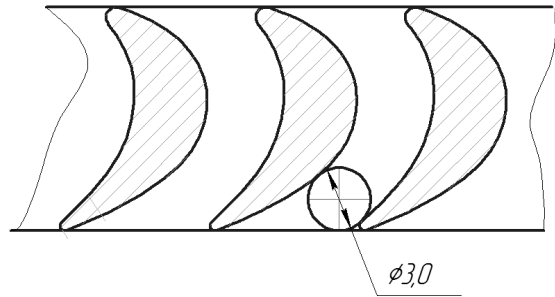


Рис. 2. Поперечное сечение лопаток типовой турбины

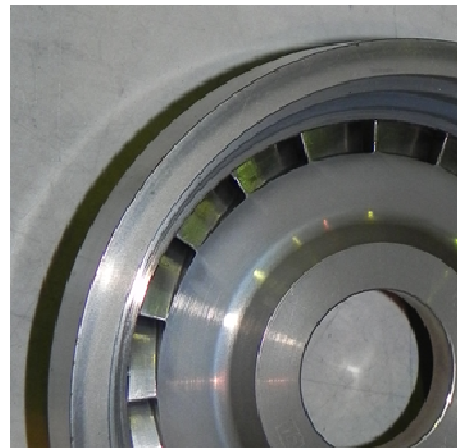


Рис. 3. Фрагмент рабочего колеса турбины

Тем не менее, самые эффективные процессы комбинированной обработки, являясь в большинстве случаев только составной частью сквозного технологического процесса, не могут быть автономным средством повышения ресурса продукции без комплексного использования совместно с другими технологическими приемами и методами в рамках сквозной технологии изготовления частей и составных единиц энергетических установок и двигателей [3, 4].

Поэтому имеет смысл провести дополнительные исследования для адаптации технологий с целью придания им требуемой гибкости и расширения технологических возможностей.

Рассмотрим несколько предполагаемых направлений.

Проектирование процессов струйно-динамической обработки ответственных и труднодоступных поверхностей внутренних стенок камер сгорания с каналами охлаждения и лопаточных деталей микрошариками на струйно-динамических установках (рис. 4).

Для обработки ребер и дна каналов охлаждения можно применять микрошарики диаметром 50...100 мкм, исходя из конструктивных и технологических соображений. Конструктивные соображения определяются малым размером канала, требуемой глубиной турбулирующего отпечатка и жесткостью оболочки.

Технологические требования заключаются в снятии заусенцев с кромок ребер (рис. 5) без притупления угла ($R_{\max} = 0,1$ мм) под операцию последующей пайки с гладкой оболочкой, формирующей замкнутые каналы.

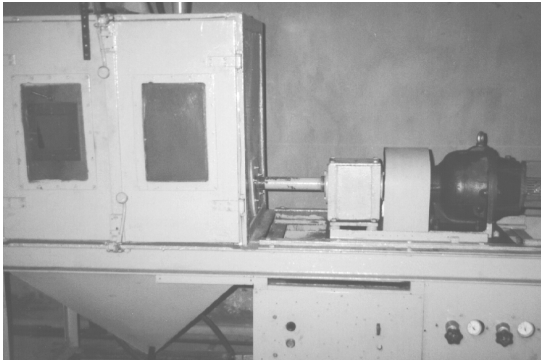


Рис. 4. Установка для струйно-динамической обработки микрошариками

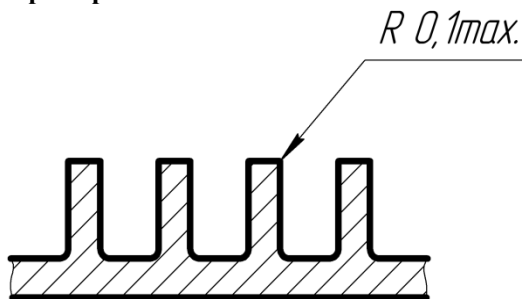


Рис. 5. Выступы оребрения оболочки

Главной проблемой в данном случае является коробление оребренной оболочки с тонким дном из-за возникающего при дробеструйной обработке наклепа поверхностного слоя.

Пути снижения нежелательного наклепа заключаются в следующем: малая кинетическая энергия микрошариков сама по себе не позволяет на пластичных материалах получить наклеп более чем 2...3 % на глубину 0,03...0,05 мм, но даже такое упрочнение поверхностного слоя нежелательно; для снятия части упрочненного слоя предлагается использование совместно с механическим воздействием эффекта анодного растворения материала.

Такое комбинированное воздействие с помощью токопроводящей жидкой среды снимает значительную часть наклепанного микрослоя материала в местах соударений микрошариков с поверхностью, исключая коробление тонкостенных оболочек. В качестве токопроводящей среды использовали техническую воду, распыленную сжатым воздухом до капельной фракции, и подаваемую потоком воздуха в зону обработки вместе с микрошариками из бункера за счет эффекта эжекции.

Для исключения шаржирования бронзы применяли микрошарики из никелевых сплавов невысокой твердости (например, ЭП741П).

С целью установления оптимальных режи-

мов была проведена экспериментальная обработка образцов на установках эжекторного типа. Эксперимент проводился с использованием микрошариков диаметром 50 и 100 мкм из никелевого сплава, с целью исключения шаржирования в токопроводящей жидкой среде.

В процессе обработки были выявлены оптимальные условия: время обработки каждого участка поверхности 20 с; угол потока относительно поверхности 90° ; угловая скорость вала с деталью 20 мин^{-1} ; сжатый воздух под давлением 0,2 МПа; напряжение 4...8 В; объем расходуемой токопроводящей жидкой среды $2 \text{ м}^3/\text{мин}$. Формирование шероховатости и турбулирующих углублений в большой степени зависит от скорости анодного растворения наклепанных микровыступов, которая в момент контакта шарика с вершиной неровности может увеличиваться в два раза из-за повышения удельной проводимости в месте соударения [6].

После обработки всех поверхностей двумя соплами в течение 10 мин ее шероховатость составила 0,8 мкм. Сформированы углубления для турбуляции потока охладителя не только на дне канала, но и на стенках; шероховатость имела на выступах сглаженный характер (рис. 6), наклепанный слой практически отсутствовал.

Степень равно распределенного наклепа составила 1,2...1,5 % относительно материала сердцевин, что ограничивает коробление в пределах допуска по конструкторской документации. Металлографические исследования не выявили шаржирования материала микрошариков в поверхностные слои образцов оболочки.

Для подготовки поверхностей открытых торцов ребер под пайку с гладкой оболочкой проводилось тонкое полирование закрепленным абразивом с целью создания опорной поверхности не менее 70 % и уменьшения глубины отпечатков до 5...10 мкм для удержания расплава припоя во время операции пайки. Анодное растворение также сокращает время последующей очистки от окислов и разрыхления поверхности под пайку.

Применительно к обработке межлопаточных каналов отличие в режимах обработки состояло в увеличении фракции микрошариков до 150...250 мкм, увеличении давления в воздушной сети до значения в 0,4 МПа и снижении напряжения тока до 2...4 В. Это позволило обеспечить степень наклепа до 4...5 % и сформировать сжимающие остаточные напряжения величиной до 200 МПа на кромках лопаток и до 90 МПа в глубине межлопаточного канала. Доставка потока шариков вглубь канала стала возможной за счет низкой плотности газожидкостной среды, оказывающей поддержку продвижению потока микрошариков, в том числе в процессе экранирования от стенок канала.

Анализ эффективности предлагаемых решений показывает, что трудоемкость рассматриваемых технологических процессов может

быть снижена на порядок при поддержании, а в ряде случаев – и при повышении заданного уровня качества рабочих поверхностей ответственных частей и составных элементов.



Рис. 6. Поверхность плоского образца с характерными регулярными отпечатками

По результатам исследований разработку или модернизацию вышеназванных технологических процессов и оснастки для их реализации планируется проводить совместно с базовыми предприятиями индивидуально для каждого вида изделий с наиболее полным удовлетворением заданных технических требований на изготовление и эксплуатацию.

Основой этому могут быть более ранние конструкторско-технологические разработки с элементами САПР по сквозному профилированию проточной части охлаждаемых оболочек, турбонасосных агрегатов, автоматизированному расчету элементов пневмогидравлических схем энергетических установок, анализу напряжений в конструктивных элементах во взаимосвязи с технологическими параметрами изготовления (сварные, паяные соединения и т.д.) для авиационно-космической и других отраслей промышленности.

Найдут применение и такие технологические приемы, как высокотемпературная газостатическая обработка заготовок, коррозионно-стойкие и термозащитные композиционные покрытия, использование работоспособных в криогенных средах материалов и композиций, параллельная поагрегатная сборка с проведением независимых испытаний и регулировок, упрочнение каналов гидравлических систем, высокочастотная балансировка роторов и т.д. [1, 6].

Существующие заделы в области организации работ по разработке научно-технической продукции в виде нетрадиционных комбинированных технологий позволяют продолжить дальнейшие исследования, направленные на обеспечение производственной технологичности при сохранении требуемого качества и конкурентоспособности продукции как на

внутреннем, так и внешнем рынках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. – Воронеж: ВГУ, 2003. – 286 с.
2. Грымзин, А.Ю. Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы / А.Ю. Грымзин, А.М. Некрылов, А.О. Родионов, Г.А. Сухочев // В сборнике «Будущее машиностроения России» / Сборник докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). – 2019. – С. 123-131.
3. Некрылов, А.М. Повышение ресурса лопаточных деталей насосного оборудования применением комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, Г.А. Сухочев // В сборнике «Научная опора Воронежской области» / Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. – Воронеж, 2019. – С. 233-235.
4. Некрылов, А.М., Сухочев, Г.А., Родионов, А.О. Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т.15. – № 9(177). – С. 421-426.
5. Сухочев, Г.А. Параметры технологического процесса получения качественного поверхностного слоя деталей роторной группы / Г.А. Сухочев, В.Н. Сокольников, А.М. Некрылов // В сборнике «Современные технологии производства в машиностроении» – Воронеж, 2019. – С. 83-86.
6. Сухочев, Г.А., Сокольников, В.Н., Коденцев, С.Н. Технологические аспекты балансировки высокооборотных роторов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – № 2(316). – С. 99-105.

REFERENCES

1. Sukhochev, G.A. *Quality Control of Parts Working under Extreme Conditions under Transient Conditions*. – Voronezh: VSU, 2003. – pp. 286.
2. Grymzin, A.Yu. Investigation of inter-blade channel strengthening in parts of rotor group / A.Yu. Grymzin, A.M. Nekrylov, A.O. Rodionov, G.A. Sukhochev // In collection “Mechanical Engineering Future in Russia” / Proceedings of the XII-th All-Russian Conf. of Young Scientists and experts (with Inter. Participation). – 2019. – pp. 123-131.
3. Nekrylov, A.M. Blade part life increase for pump equipment using combined processing / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, G.A. Sukhochev // In collection “Scientific Support of Voronezh Region” / *Winners’ Proceedings of VSTU Students’ and Graduate Students’ Research Work Competition on Priority Directions of Science and Technology Development*. – Voronezh, 2019. – pp. 233-235.
4. Nekrylov, A.M., Sukhochev, G.A., Rodionov, A.O. Investigation of Inter-Blade Channel Strengthening Modes for Rotor Group Parts // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2019. – Vol. 15. – No.9 (177). – pp. 421-426.
5. Sukhochev, G.A. Engineering process parameters of qualitative surface layer obtaining for rotor group parts / G.A. Sukhochev, V.N. Sokolnikov, A.M. Nekrylov // In collection “*Modern Production Technologies in Mechanical Engineering*” – Voronezh, 2019. – pp. 83-86.
6. Sukhochev, G.A., Sokolnikov, V.N., Kodentsev, S.N. Technological aspects of high-speed rotor balancing // *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. – 2016. – No.2 (316). – pp. 99-105.

Рецензент д.т.н. А.М. Кадырметов