

12. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set. *Computer Material Science*. 1996, № 6, 15 p.
13. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B*. 1996, vol. 54, 11169 p.
14. Vanderbilt D. Soft self-consistent pseudopotentials in generalized eigenvalue formalism. *Phys. Rev. B*. 1990, vol. 41, 7892 p.
15. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B*. 1976, vol. 13, pp. 5188–5192.
16. Henkelman G., Jonsson H. Improved tangent estimate in the nudged elastic band method for finding minimum energy paths and saddle points. *J. Chem. Phys.* 2000, vol. 113, pp. 9978–9985.
17. Vineyard G. V. Frequency factors and isotope effects in solid state rate processes. *J. Phys. Chem. Solids*. 1957, vol. 3, pp. 121–127.
18. Pell E. M. Diffusion of Li in Si at High T and the Isotope Effect. *Phys. Rev.* 1960, vol. 119, № 3, pp. 1014–1021.
19. Pell E. M. Diffusion Rate of Li in Si at Low Temperature. *Phys. Rev.* 1960, vol. 119, № 4, pp. 1222–1225.
20. Fedorov, A. S., Popov Z. I., Kuzubov A. A., Ovchinnikov S. G. *Teoreticheskiye issledovaniye diffuzii litiya v kristallicheskom i amorfnom kremnii* (Theoretical study of lithium diffusion in crystalline and amorphous silicon). *Pis'ma v ZHETF*. 2012, vol. 95, pp. 159–163.

© Попов З. И., Федоров А. С., Кузубов А. А., Елисеева Н. С., 2013

УДК 621.923.9

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КАНАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Л. П. Сысоева, С. К. Сысоев, А. С. Сысоев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
660014, Россия, Красноярск, проспект им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sysoeva.tms@mail.ru

Основной целью исследований являлась отработка методики обеспечения точности расхода компонентов через каналы заготовок с большим количеством труднодоступных каналов. Выполнен анализ конструкторско-технологических особенностей деталей летательных аппаратов. Рассмотрены особенности абразивно-экструзионной обработки. Описана методика обеспечения заданного качества сложнопрофильных каналов деталей летательных аппаратов абразивно-экструзионной обработкой. Апробация методики проведена на промышленной установке УЭШ-350М. Предложены рекомендации по выбору оборудования, состава рабочей среды и параметров обработки. Применение методики позволяет успешно проводить на существующем оборудовании операции финишной отделки сложнопрофильных каналов деталей летательных аппаратов с обеспечением заданного качества (точности расхода компонентов топлива через каналы деталей и шероховатости их поверхностей в диапазоне $R_a = 1,6...3,2$ мкм).

Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, рабочая среда, абразивное зерно, сложнопрофильный канал, направляющий аппарат, расход компонентов, цикл обработки.

THE TECHNIQUE FOR GUARANTEE OF QUALITY OF THE AIRCRAFT DETAIL CHANNELS WITH THE USE OF ABRASIVE FLOW MACHINING PROCESS

L. P. Sysoeva, S. K. Sysoev, A. S. Sysoev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarsky Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sysoeva.tms@mail.ru

The main purpose of the research was the development of the technique for guarantee of the required accuracy of the components consumption through channels of aircraft details with a plenty of «hard-to-get» channels. The design engineering features of aircraft details are analyzed. The features of the abrasive flow machining process are considered. The technique for the required quality guarantee of the geometrically complex channels of aircraft details with the use of abrasive flow machining process is described. The approbation of this technique is performed with the use of the experimental plant. The recommendations for the choice of equipment, work medium composition and work parameters are offered. Use of the offered technique allows to carry out the finish machining operation of a channels of aircraft details with the given quality guarantee (accuracy of the components consumption through channels and pimples in a range $R_a = 1,6... 3,2$ microns) with the existing equipment.

Keywords: abrasive flow machining process, work medium, abrasive grain, geometrically complex channel, guide apparatus, components consumption, machining cycle.

В летательных аппаратах широкое применение нашли детали типа колес турбин и насосов, направляющих и спрямляющих аппаратов и др., имеющих сложные внутренние каналы, сформированные литьем по выплавляемым моделям (рис. 1). Несмотря на меры по обеспечению жестких требований к точности моделей для литья, большая часть готовых деталей имеет отклонения от заданных в конструкторской документации (КД) параметров (расход компонентов и качество поверхности). Эти отклонения ведут к неравномерности распределения расхода компонентов по индивидуальным каналам и существенно влияют на общий расход компонентов.

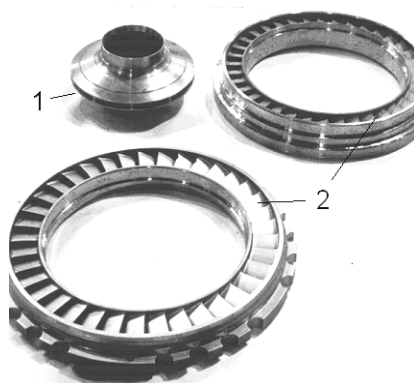


Рис. 1. Примеры деталей с каналами, выполненными литьем по выплавляемым моделям:
1 – закрытые каналы в крыльчатках; 2 – открытые каналы в направляющих аппаратах

Финишная обработка таких поверхностей традиционными методами затруднена. Отсутствие надежной технологии отделки привело к тому, что конструкторские организации были вынуждены, по нашему мнению, значительно снизить требования КД к параметрам труднодоступных каналов в деталях.

В лаборатории отделочных операций СибГАУ накоплен большой опыт использования абразивно-экструзионной обработки (АЭО) для финишной обработки сложнопрофильных каналов в деталях, в том числе имеющих большое количество лопаток.

АЭО основана на экструзии через обрабатываемую деталь вязкоупругой рабочей среды (РС), наполненной абразивными зернами [1]. В процессе течения РС под давлением до 12 МПа в центре канала создается «жгут», который обеспечивает прижатие абразивных зерен к обрабатываемой поверхности [2]. При относительно невысоких скоростях рабочей среды создаются силы резания, достаточные для сглаживания шероховатости поверхности и удаления дефектного слоя с повышенной твердостью, характерной для заготовок после литья по выплавляемым моделям.

Экспериментальные работы проведены на установке УЭШ-350, предназначенной для АЭО каналов в деталях, габариты которых с приспособлением составляют (диаметр × длина) – 0,35×0,50 м (рис. 2). Конструкция установки позволяет закреплять обрабатываемую заготовку с приспособлением между рабочими камерами перемещением прижимной траверсы

и обеспечивать управление перепрессованием смеси только через каналы заготовки по заданному циклу в автоматическом режиме [3].

Основной целью исследований является отработка методики обеспечения точности расхода компонентов через каналы заготовок с большим количеством труднодоступных каналов с использованием АЭО. При этом особое внимание уделялось обеспечению заданной шероховатости по длине поверхностей каналов ($R_a = 1,6 \dots 3,2$ мкм).

Анализ конструкции деталей показал, что входные и выходные части лопаток, как правило, наклонены к оси детали и к направлению потока среды при ее экструзии через деталь. Как показали исследования процесса течения РС, на входе в каналы возникает разделение общего потока и перестройка профилей разделенных потоков, обусловленная реологическими свойствами вязкоупругой среды.

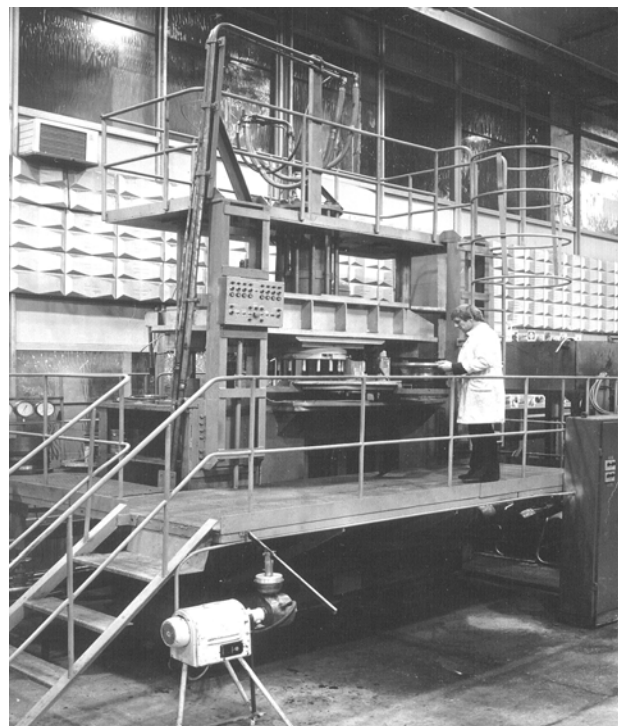


Рис. 2. Установка для абразивно-экструзионной обработки УЭШ-350М

Чем больше угол входа в каналы, тем больше потери давления среды, обусловленные возникновением упругих деформаций и высокой скорости релаксации при перестройке направления течения. В результате основной сьем металла осуществляется на входных кромках каналов. На входе в канал наблюдается зона отрыва рабочей среды от обрабатываемой поверхности с образованием на этом участке зоны застоя, вследствие чего уменьшаются силы прижатия активных абразивных зерен, находящихся на поверхности среды, вплоть до прекращения контакта с обрабатываемой поверхностью.

Нами ранее предложено несколько технических решений для выравнивания условий обработки. Так

для создания направленного движения РС на каждую кромку лопатки, наклоненную к основному движению потока (рис. 3), предложено использовать направляющие аппараты [4]. В ходе исследований нам удалось сформулировать более точные рекомендации по применению данного технического решения. Так как детали имели наклонные лопатки, с каждой стороны заготовки в приспособлении были установлены технологические направляющие аппараты, позволившие реализовать требуемое направление потока РС и создать условия для равномерной обработки поверхностей лопаток по длине. При этом каналы направляющего аппарата имели идентичные геометрические характеристики с сечением каналов обрабатываемой заготовки, являясь продолжением каждого канала. Суммарная площадь каналов каждого направляющего аппарата не превышала площади сечения рабочего цилиндра установки.

На фланец нижней камеры 1 устанавливали приспособление, обеспечивающее обработку рабочей среды каналов детали (рис. 4). Приспособление состоит из нижней части 3 с технологическим направляющим аппаратом, в которой монтируется обрабатываемая деталь 5. Верхняя часть приспособления 4 с технологическим направляющим аппаратом закрепляется к верхней камере 2. Траверса установки обеспечивает перемещение верхнего блока цилиндров и закрепление приспособления с деталью в установке. При этом приспособление образует закрытую полость и обеспечивает герметичность в стыке между верхней и нижней камерами установки.

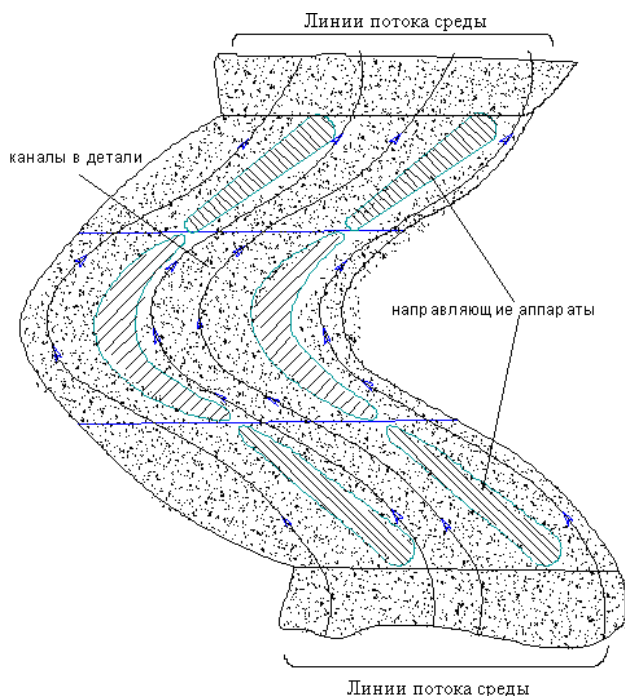


Рис. 3. Схема изменения линии тока рабочей среды с использованием направляющих аппаратов

Состав РС, которую необходимо применить для обработки, зависит от геометрических параметров каналов (индивидуальной и суммарной площади,

длины), исходной и требуемой шероховатости поверхности и материала обрабатываемой заготовки [5]. Одним из граничных условий выбора состава РС является также производительность обработки. Необходимо учитывать влияние температурного нагрева среды, оснастки и установки при обработке в связи с тем, что в процессе обработки уменьшается вязкость рабочей смеси [1].

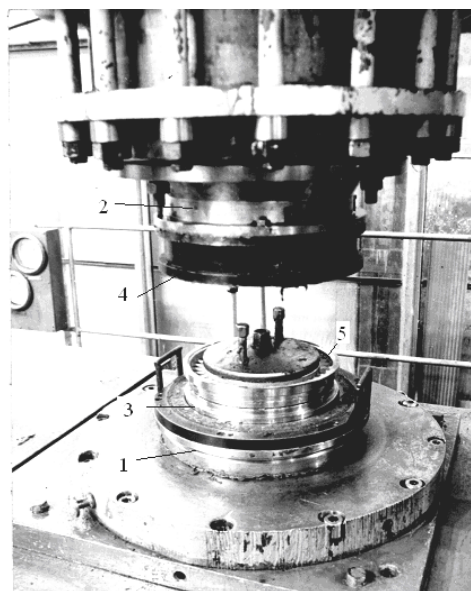


Рис. 4. Вид рабочей зоны с установленной заготовкой в приспособлении

Известно [1], что шероховатость поверхностей каналов и величина съема металла по обрабатываемой поверхности зависит от состава и давления РС в зоне обработки. Но давление РС в канале изменяется как по длине канала вследствие гидравлического сопротивления течению среды, так и при изменении суммарной площади всех одновременно обрабатываемых каналов (при постоянном давлении среды на входе в каналы детали). Поддержание постоянного расхода и давления среды на входе в каждый канал при обработке вызывает необходимость применения устройств для АЭО с определенной емкостью рабочих камер, определяемой из отношения

$$k_y = \frac{V_{\text{кам}}}{V_{\text{кан}}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{кам}}$ – объем камеры с рабочей средой, м^3 ; $V_{\text{кан}}$ – общий суммарный объем обрабатываемых каналов, м^3 .

Как установлено, коэффициент k_y , рассчитанный по зависимости (1), для обработки крупногабаритных деталей должен иметь величину 1,2...1,6. При таком соотношении объемов достигается оптимальное время одного цикла обработки T :

$$T = T_{\text{рхн}} + T_{\text{пер}} + T_{\text{рхв}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{рхн}}$ и $T_{\text{рхв}}$ – время рабочего хода штока нижнего и верхнего цилиндра соответственно, с; $T_{\text{пер}}$ – время на переключение элементов гидроаппаратуры при смене направления экструзии рабочей среды, с.

Обработка возможна и при $k_v < 1,2$, т. е. меньшем объеме РС, которая в данном случае испытывает большие нагрузки при АЭО и быстрее нагревается. Нагрев среды уменьшает ее вязкость и жесткость системы, что ведет к ухудшению режущих свойств абразивных составов. Кроме того, использование меньшего объема среды при экструзии увеличивает количество циклов обработки и время $T_{\text{пер}}$.

При $k_v > 1,6$ обработка крупногабаритных деталей требует создания устройств соответствующих габаритов, что может привести к значительному увеличению себестоимости обработки. Для рассматриваемого случая коэффициент $k_v = 1,5$.

Опыты выполнены в производственных условиях на каналах, образованных соседними лопатками газовых направляющих аппаратов после литья заготовок по выплавляемым моделям. Заготовки были подвергнуты предварительной механической обработке по стыковочным поверхностям и имели суммарную площадь каналов $49,5 \times 10^{-2} \text{ м}^2$ (см. рис. 1). При проливе водой необходимо обеспечить общий расход воды через все каналы за время $27,5 \pm 0,41 \text{ с}$. Для деталей, не обработанных АЭО, время пролива оказалось меньше заданного на $0,8 \dots 5,6 \text{ с}$.

Условия АЭО каналов были выбраны по результатам предварительной обработки образцов. При выборе состава РС варьировалось содержание абразивного зерна и модификатора, снижающего трение полимерной основы среды при АЭО. Выбранный состав РС содержал 75 % электрокорунда белого 25А зернистостью F54 и F16 объемом $49 \times 10^{-2} \text{ м}^3$. Полимерная основа среды (носитель) получена при смешении каучука СКТ и фторопласта мелкодисперсного Ф4 (5 %). Для оптимального течения РС давление масла в системе управления УЭШ-350М имело величину 12,0 МПа. При этом время цикла (экструзия среды из одной рабочей камеры в другую и обратно) составляло в пределах $T = 48 \dots 50 \text{ с}$. Количество циклов при АЭО определялось задачей достижения расхода постоянно-го объема воды при ее проливе через каналы за заданный интервал времени δt .

Для примера на основании предварительного и последующих (через каждые 10 циклов АЭО) проливов водой заготовки построен график зависимости изменения времени пролива δt через каналы от количества циклов обработки N (рис. 5):

$$\delta t = f(N), \quad (3)$$

где δt – время пролива через канал, с; N – количество циклов.

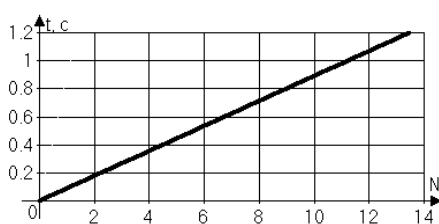


Рис. 5. Зависимость изменения времени пролива δt постоянного объема воды от количества циклов обработки N

Экспериментальные исследования позволили выявить, что в случае незначительного отклонения действительного расхода воды при проливе (непосредственно после литья по выплавляемым моделям) следует применять электрокорунд F54. Для изменения времени пролива на 0,1 с достаточно выполнить 2, 3 цикла АЭО. В случае существенного отклонения расхода жидкости по результатам предварительного пролива водой от заданного в КД расхода воды рекомендовано использовать абразив F16.

Для правильного выбора параметров обработки для каждого наименования деталей рекомендовано использовать зависимость (3). Графики, подобные приведенному на рис. 5, рекомендовано выполнять и регулярно наносить на них результаты расхода воды при проливе с целью контроля работоспособности установки УЭШ-350 и стабильности режимов обработки. В случае больших отклонений от графика необходимо выяснять причину изменения режимов обработки. Возможными причинами отклонения от прямой зависимости могут быть выход из строя одного из насосов гидростанции в процессе обработки; потеря режущей способности абразивных зерен (снижение жесткости среды при ее нагреве, притупление граней абразива, насыщение среды микрочастицами металла обрабатываемой заготовки); недостаточное количество РС в нижней камере и др. Для обеспечения стабильности параметров обработанных деталей (геометрических, газо- и гидродинамических) в системе управления УЭШ-350 предусмотрена регулирование условий и поддержка заданных режимов обработки.

В ходе исследований установлено, что на всех заготовках после литья имеются геометрические погрешности, влияющие на расход жидкости (или газа) при проливе (продувке газом), что затрудняет обработку статистических данных и выбор постоянных режимов АЭО. Поэтому каждую заготовку следует проливать и определять время общего секундного расхода воды через каналы заготовки. Если же в КД заданы требования по обеспечению равномерности распределения жидкости по окружности детали, то при проливе необходимо фиксировать секунднй расход через каждый канал. Тогда при отклонении секундного расхода жидкости через частные каналы обработке следует подвергать только эти каналы. Остальные каналы при монтаже направляющих аппаратов на заготовку следует заглушить.

Шероховатость поверхностей в каналах после АЭО существенно улучшается (с $R_z = 30 \dots 40 \text{ мкм}$ до $R_a = 3,2 \dots 1,6 \text{ мкм}$) и соответствует требованиям КД. После АЭО произвольное направление шероховатости, характерное для поверхности после литья, изменяется на шероховатость с направлением, параллельным потоку компонентов в каналах при эксплуатации деталей. Это позволяет увеличить КПД агрегата за счет уменьшения пристеночного сопротивления потока жидкости или газа.

Таким образом, применение методики обеспечения точности расхода компонентов через детали абразивно-экструзионной обработкой позволило обеспечить заданную точность расхода компонентов топлива

через каналы деталей, имеющих большое количество лопаток, а также достичь требуемой шероховатости их поверхностей в диапазоне $R_a = 1,6...3,2$ мкм. Время обработки зависело от исходного состояния поверхностей каналов детали и изменялось в интервале 10...40 мин. При этом геометрические параметры обрабатываемых каналов остались в пределах заданных допусков.

Итак, технология АЭО позволяет успешно проводить на существующем оборудовании операции финишной отделки сложнопрофильных каналов деталей летательных аппаратов с обеспечением заданного качества.

Библиографические ссылки

1. Сысоев С. К., Сысоев А. С. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов: теория, исследования, практика : моногр. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005.
2. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 96–100.
3. Установка для экструзионного шлифования крупногабаритных деталей УЭШ-350 : инф. листок № 532-91 / С. К. Сысоев, В. И. Суетов, В. А. Левко, М. А. Лубнин ; ЦНТИ. Красноярск, 1991.
4. А. с.1161359 СССР. МКИ В24С 1/08. Способ обработки деталей абразивной массой / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин. Заявлено 11.07.83; Оpubл. 15.06.85, Бюл. № 22.

5. Сысоев А. С. Абразивно-экструзионное улучшение качества внутренних поверхностей каналов после электроэрозионной обработки в деталях летательных аппаратов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2002.

References

1. Sysoev S. K., Sysoev A. S. *Jekstruzionnoe honingovanie detalej letatel'nyh apparatov: teorija, issledovaniya, praktika* (Extrud honing of aircraft details: the theory, research, practice). Krasnoyarsk, 2005, 220 p.
2. Levko V. A. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 7, pp. 96–100.
3. Sysoev S. K., Suetov V. I., Levko V. A., Lubnin M. A. *Ustanovka dlja jekstruzionnogo shlifovaniya krupnogabaritnyh detalej UJeSh-350* (Plant for extrud grinding of large-sized details): inf. listok № 532-91. CNTI, Krasnoyarsk, 1991, 40 p.
4. А. s.1161359 SSSR. MКИ V24S 1/08. *Sposob obrabotki detalej abrazivnoj massoj* (Method of details machining by abrasive medium) / S. K. Sysoev, M. A. Lubnin. Zayavleno 11.07.83; publ. 15.06.85, Bull. № 22, 3 p.
5. Sysoev A. S. *Abrazivno-jekstruzionnoe uluchshenie kachestva vnutrennih poverhnostej kanalov posle jelektro-erozionnoj obrabotki v detaljah letatel'nyh apparatov* (Abrasive-extrude improvement of the internal surfaces quality of aircraft detail channels after electro-erosion machining). Krasnoyarsk, 2002, 20 p.