



Научная статья

УДК 536:621.9

<https://elibrary.ru/zeaqr1><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-284-296>

Эффективность использования новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей

А.В. Храмов¹, К.С. Жирухин^{2✉}, Е.С. Киселев³^{1,2}ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ», г. Москва, Россия³Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Резюме. Цель – установить эффективность применения современной системы нулевого базирования SCHUNK VERO-S Aviation при изготовлении нежестких деталей из алюминия в сравнении с существующей технологией их мелкосерийного производства на отечественных самолетостроительных предприятиях. Исследования проводились в условиях механических цехов, осуществляющих изготовление нежестких деталей летательных аппаратов. При этом оценивались временные и экономические затраты на их изготовление при изменении элементов режима резания и величин снимаемых припусков. Предлагаемый директивный технологический процесс был реализован российской инжиниринговой компанией «ХАЛТЕК» на одном из авиационных предприятий Российской Федерации. Длительность технологического процесса составила в общей сложности 14 ч (по существующей в действующем производстве технологии – 300 ч). Установлено, что сокращение длительности процесса удалось достичь за счет исключения двух операций термостабилизации, сокращения машинного и подготовительно-заключительного времени в 2 раза. Показано, что сокращение машинного времени произошло благодаря увеличению элементов режима резания при изготовлении нежесткой алюминиевой детали с использованием данной оснастки, а также за счет изменения стратегии обработки. Показано, что применение технологической оснастки SCHUNK VERO-S Aviation в совокупности с определенной стратегией механической обработки тонкостенной нежесткой заготовки позволяет практически полностью компенсировать деформации, вызванные остаточными напряжениями первого рода. Новая современная технология с использованием оснастки SCHUNK VERO-S Aviation доказывает свою эффективность при мелкосерийном и серийном изготовлении качественных нежестких тонкостенных деталей, соответствующих требованиям конструкторской документации, без короблений, многочисленных операций правки, термо- и временной (пролеживания) стабилизации.

Ключевые слова: коробление, остаточные напряжения, базирование, технологическая оснастка, нежесткие детали

Для цитирования: Храмов А.В., Жирухин К.С., Киселев Е.С. Эффективность использования новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 284–296. EDN: ZEAQRL, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-284-296>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Feasibility of new types of technological equipment in the manufacture of nonrigid flat aluminum parts

Alexander V. Khramov¹, Kirill S. Zhirukhin^{2✉}, Evgeny S. Kiselev³^{1,2}HALTEK-DoALL LLC, Moscow, Russia³Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia¹ © Храмов А.В., Жирухин К.С., Киселев Е.С., 2023

Abstract. In this work, we assess the efficiency of the SCHUNK VERO-S Aviation clamping system in manufacturing nonrigid aluminum parts in comparison with the existing technology of their small-scale production at domestic aircraft plants. The research was conducted using the facilities of mechanical shops that manufacture nonrigid aircraft parts to estimate the time and economic expenditures involved in their production when changing the cutting mode and machining allowances. The proposed technological process was implemented by the HALTEC Russian engineering company at an aircraft manufacturing plant of the Russian Federation. The duration of the technological process amounted to a total of 14 hours, with the existing production technology lasting for 300 hours. The process duration was reduced by eliminating two thermal stabilization operations and shortening the machine-setting time by 50%. The machine-setting time was reduced by increasing the number of cutting mode elements during manufacturing of a non-rigid aluminum part using this tooling, as well as by using a modified machining strategy. The use of the SCHUNK VERO-S Aviation system together with a modified machining strategy for a thin-walled non-rigid workpiece allows for an almost complete compensation of deformations caused by residual stresses of the first kind. The new modern technology of SCHUNK VERO-S Aviation proves to be effective for the small-volume and series production of thin-walled nonrigid components of the required quality without warping, multiple straightening operations, thermal and temporal stabilization.

Keywords: warping, residual stresses, basing, technological jigs and tooling, nonrigid parts

For citation: Khramov A.V., Zhirukhin K.S., Kiselev E.S. Feasibility of new types of technological equipment in the manufacture of nonrigid flat aluminum parts. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):284-296. (In Russ.). EDN: ZEAQRL, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-284-296>.

ВВЕДЕНИЕ

Применение поликристаллических композитных материалов из углепластиков находит все более широкое распространение в различных изделиях машиностроения и становится основным при изготовлении современных видов скоростного транспорта. Так, в конструкции пассажирских летательных аппаратов их доля уже достигла 35–45%. Однако более половины объема конструкции самолета по-прежнему изготавливают из металлов. Из них 20–35% приходится на алюминиевые сплавы. По всей вероятности, в ближайшее время эти соотношения мало изменятся.

Принято считать, что алюминиевые сплавы относятся к легко обрабатываемым, и изготовление деталей из них не представляет существенных затруднений. Следует отметить, это не относится к изготовлению тонкостенных нежестких плоскостных деталей.

Недостаточная жесткость алюминиевых деталей в сочетании со сравнительно низкой температурой плавления может привести к исчезновению требуемой по чертежу формы как в процессе их изготовления, так и после его завершения в процессах хранения и эксплуатации.

Коробление готовых изделий в процессе

механообработки – основная проблема, с которой приходится бороться. Везде, где изготавливают сложные детали из алюминия, сталкиваются с проблемой коробления в процессе механической обработки^{4,5} [1, 2].

Причиной этого является возникновение в поверхностных слоях нежестких деталей неуравновешенных технологических остаточных напряжений (ТОН). Данный вид ТОН чаще всего вызывается структурно-фазовыми превращениями материала заготовки, а также высокой теплосиловой напряженностью процесса резания [3–5].

Все это приводит как к усложнению и удорожанию технологии изготовления нежестких деталей, как и в ряде случаев к пересмотру конструкции некоторых изделий. В технологический процесс приходится вводить те или иные операции релаксации остаточных напряжений (термические, ультразвуковые и др.) или увеличивать время пролеживания полуфабрикатов деталей между операциями (временная релаксация или естественное старение). Достаточно часто в процессе исправления формы готовых деталей приходится прибегать к выполнению дополнительной операции правки. Это, естественно, увеличивает производственный цикл и себестоимость готовой продукции.

⁴ Альтман М.Б. Применение алюминиевых сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1985. 344 с.

⁵ Беляев А.И. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1983. 280 с.

⁶ VERO-S Aviation [Электронный ресурс]. URL: https://halte.ru/catalog/SCHUNK_VERO_S_Aviation_2018_EN.PDF (28.08.2022).

Применение различных стратегий снятия припуска позволяет уменьшить деформации, обусловленные ТОН. Однако в готовой детали после механической обработки деформации остаточные напряжения остаются и в зависимости от условий эксплуатации могут оказывать существенное влияние на геометрическую форму конечного изделия.

В связи с вышеизложенным, повышению эффективности изготовления нежестких плоскостных алюминиевых деталей, как одному из основных видов конструкционных материалов, следует по-прежнему уделять особое внимание. Одним из путей решения данной проблемы является использование современной технологической оснастки, способной осуществлять базирование и закрепление тонкостенных нежестких алюминиевых заготовок таким образом, чтобы в процессе изготовления деталей все причины, вызывающие коробление готовых изделий, были сведены к минимуму.

Из удачных решений последнего времени следует упомянуть:

1. Введение в зону формообразования нежестких плоскостных алюминиевых деталей энергии ультразвукового поля, что существенно уменьшает теплосиловую напряженность съема припусков, следовательно, и интенсивность возникновения ТОН [4, 6].

2. Разработку технологической оснастки компании «SCHUNK» для закрепления заготовок при изготовлении плоских нежестких деталей – SCHUNK VERO-S Aviation⁶ [6–8].

Целью настоящих исследований является выявление эффективности применения современной системы «нулевого базирования» SCHUNK VERO-S Aviation при изготовлении нежестких деталей из алюминия и в сравнении ее с существующей технологией мелкосерийного производства на отечественных самолетостроительных предприятиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оснастка SCHUNK VERO-S Aviation основана на принципе прямого закрепления заготовки с применением системы «нулевого базирования» (обеспечение постоянства баз при снятии и установке заготовки с погрешностью <0,005 мм). Ряд точек базирования

заготовки детали в оснастке имеет способность «дышать», двигаться, когда это необходимо для уменьшения деформаций заготовки при ее закреплении. При этом происходит подстраивание оснастки под деформируемые поверхности заготовки при снятии напряжений в ходе ее раскрепления. Если в технологическом процессе (ТП) будет использована грамотная стратегия механической обработки, рационально распределяющая припуск по переходам и установам, то это позволит осуществлять его съем при существующих поводках детали, постоянно оставаясь в массиве металла заготовки [9–22]. Иными словами, основная цель данной стратегии – разбить припуск таким образом, чтобы величина поводок детали при ее изготовлении не превышала его суммарную величину.

Последнее объясняется следующими причинами. Как уже упоминалось, на формирование ТОН наибольшее влияние оказывает теплосиловая напряженность механической обработки и физико-механические свойства самого обрабатываемого материала, определяющие структурно-фазовые изменения в поверхностном слое (ПС) заготовки. Однако необходимо учитывать, что в ходе $(i+1)$ -й технологической операции изготовления деталей часть материала ПС снимается с припуском, а, следовательно, физико-механические свойства, сформированные в снимаемом слое материала, оказывают несколько уменьшенное влияние на свойства вновь образующегося ПС заготовки или готовой детали. Поэтому при расчете значений ТОН с учетом технологического наследования необходимо использовать следующее выражение [4]:

$$\sigma_{i+1}(h_a) = K_H \cdot \sigma_i(z_{i+1} + h_a) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_a),$$

где h_a – глубина поверхностного слоя, на которой требуется определить значение остаточных напряжений, сформированных в ходе $(i+1)$ -й операции, мкм; K_H – коэффициент наследования; Z_{i+1} – припуск, снимаемый на $(i+)$ -й операции, мкм; $\sigma_i(Z_{i+1} + h_a)$ – значение остаточных напряжений после i -й операции ТП на глубине $(Z_{i+1} + h_a)$, МПа; $\sigma_{i+1}^{TC}(h_a)$ –

значение остаточных напряжений на рассматриваемой глубине h_a , обусловленной теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -й операции, МПа.

Коэффициент наследования K_n является одним из основных оценочных критериев технологического наследования параметров качества ПС, полученных на предшествующей окончательной обработке заготовки технологической операции и оказывающий влияние на параметры готовой детали.

Основными особенностями использования оснастки SCHUNK VERO-S Aviation и технологии являются следующие аспекты:

1. До 95% объема металла удаляется резанием с минимально возможным количеством установов.

2. Компенсация температурного удлинения заготовок и внутренних напряжений без использования подкладок и прихватов.

3. Повторяемость позиционирования между черновой и чистовой обработками и контрольными переходами.

4. При реализации нового техпроцесса обеспечивается существенное сокращение затрат времени на установку и снятие заготовок.

Оснастка может подстроиться под изменение формы очень быстро и с сохранением баз.

Проиллюстрируем вышесказанное результатами опытно-промышленных испытаний, выполненных сотрудниками ГК «ХАЛ-ТЕК» на отечественных авиационных предприятиях.

Технология изготовления нежестких деталей с использованием данной оснастки предполагает непосредственное закрепление заготовки на модулях системы VERO-S. Для этого в заготовку вворачиваются специальные пальцы, которые обеспечивают соединение заготовки и приспособления. На рис. 1 показаны различные способы крепления пальцев [1–3].

Рассмотрим директивный техпроцесс с применением системы VERO-S Aviation на примере детали типа «Шпангоут». При существующем на действующем производстве технологическом процессе заготовка детали проходит 2-кратный процесс стабилизации.

Величина поводок при обработке достигает 10 мм, при этом готовая деталь подвергается дополнительной правке и слесарной подгонке по ответной детали. Длительность ТП изготовления детали по данной технологии составляет 300 ч.

Из курса технологии машиностроения общеизвестно о принципе базирования по плоскости, цилиндрическому и срезанному пальцу. Именно этот принцип использован при закреплении заготовки в системе VERO-S Aviation.

Система включает в себя следующие модули (рис. 2):

1. Модуль типа А – фиксированная, нулевая точка. Повторяемость закрепления осуществляется с погрешностью $<0,005$ мм.

2. Модуль типа В – модуль, способный перемещаться только вдоль одной оси на ± 6 мм. Выполняет функцию срезанного пальца для защиты от проворота.

3. Модуль типа С – модуль, перемещающийся в двух осях X и Y на ± 6 мм. В сочетании с модулями А и В усиливает жесткость закрепления заготовки.

Вышеперечисленные модули А, В и С имеют одинаковую высоту. Таким образом, они образуют силовой треугольник ABC, определяющий позиционирование и нулевую точку заготовки при обработке.

4. Модуль типа D – 3D-модуль, подвижный во всех осях. Способен компенсировать движения заготовки по осям X, Y, Z на ± 6 мм и по углу наклона вдоль оси Z на ± 2 градуса.

Типовой технологический процесс изготовления шпангоута включает 4 установка:

1. OP00 – подготовительный. На данном установе осуществляется подготовка баз для зажимных штифтов и обработка габаритов детали (рис. 3).

2. OP10 – обработка контура, черновая и получистовая чистовая обработки поверхности № 1 со съемом припуска до 3 мм (с разбивкой припуска по переходам и снятием ТОН путем удаления материала заготовки и их временной релаксации после каждого прохода, рис. 4):

– обработка контура и снятие напряжений;

– сьем 50% припуска и снятие напряжений;

– обработка до припуска 15 мм, 5 мм и 3 мм и снятие припуска после каждого съема.

3. OP20 – черновая, получистовая и чистовая обработка стороны № 2 со снятием напряжений после удаления каждого слоя припуска (рис. 5).

– сьем 50% припуска и снятие напряжений;

– обработка до припуска 15 мм, 5 мм, 3 мм, 1,5 мм и 0 мм. снятие напряжений после каждого прохода;

– обработка баз под зажимные штифты,

подрезка технических припусков по контуру.

Снятие образующихся в процессе съема материала ТОН происходит на 1-м и 2-м установках.

На 3-м установе происходит обработка поверхности № 1 «как чисто» без снятия напряжений, т.к. согласно расчетам после съема 3 мм материала заготовки внутренних напряжений не образуется или они минимальны.

4. OP30 – чистовая обработка стороны № 1, подрезка припуска по контуру, снятие детали (рис. 6).



Рис. 1. Способы крепления базирующих пальцев системы SCHUNK VERO-S Aviation
Fig. 1. Clamping methods of SCHUNK VERO-S Aviation system basing fingers

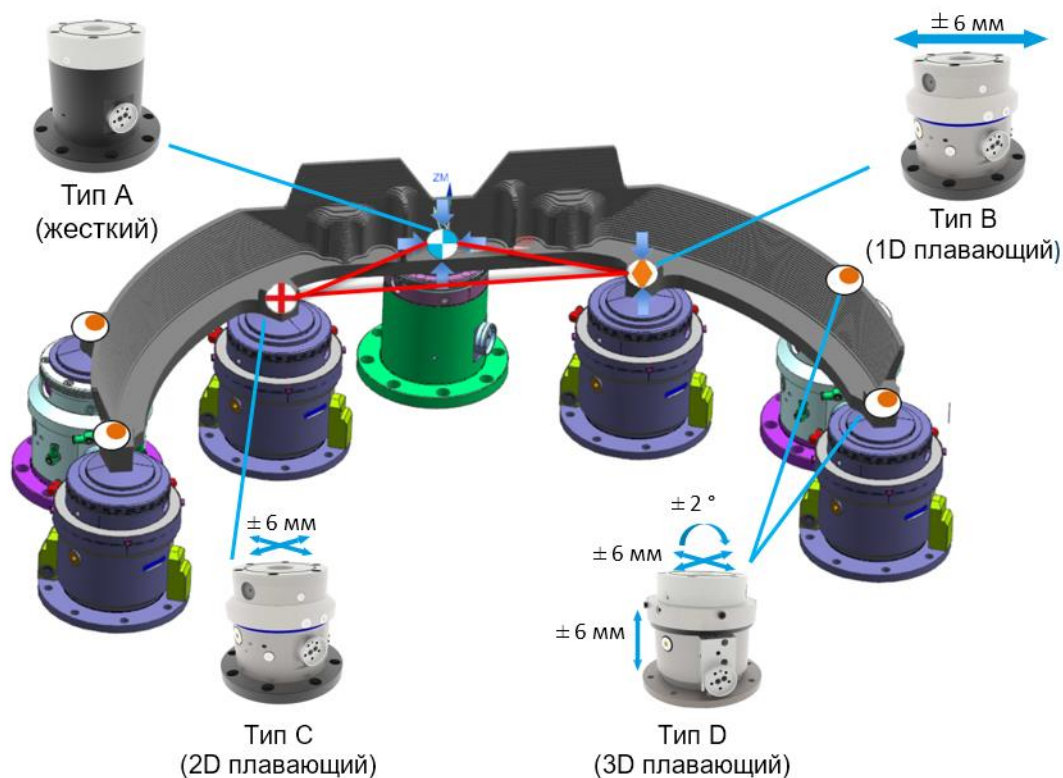


Рис. 2. Схема расстановки зажимных модулей
Fig. 2. Diagram of clamping module arrangement

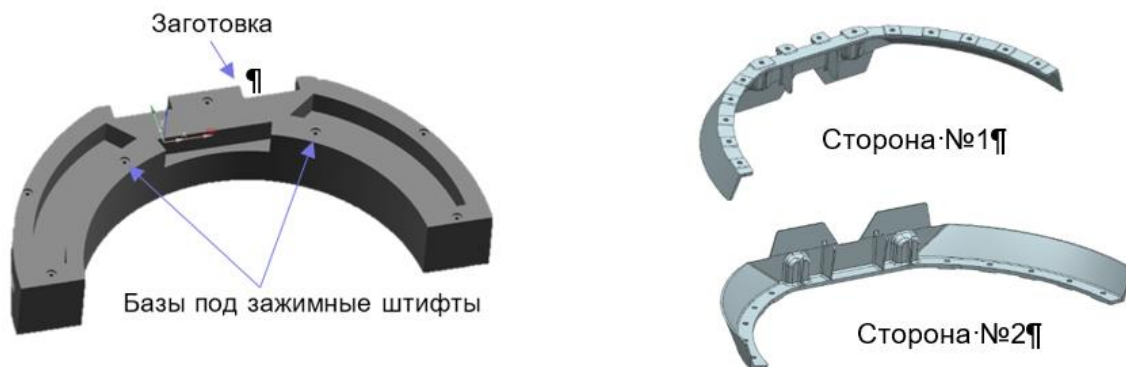


Рис. 3. Подготовка технологических баз
Fig. 3. Preparation of technological bases



Рис. 4. Обработка контура и поверхности № 1
Fig. 4. Contour and no.1 surface machining



Рис. 5. Закрепление заготовки при использовании оснастки VERO-S Aviation в процессе черновой, получистовой и чистовой обработок поверхности № 2 детали типа «шпангоут»
Fig. 5. Workpiece clamping when using VERO-S Aviation tooling during rough, semi-finishing and finishing treatments of the surface no. 2 of the "frame"- type part



Рис. 6. Закрепление заготовки при использовании оснастки VERO-S Aviation в процессе чистовой обработки поверхности № 1 детали типа «шпангоут»
Fig. 6. Workpiece clamping when using VERO-S Aviation tooling in finishing treatment of No. 1 surface of the "frame"- type part

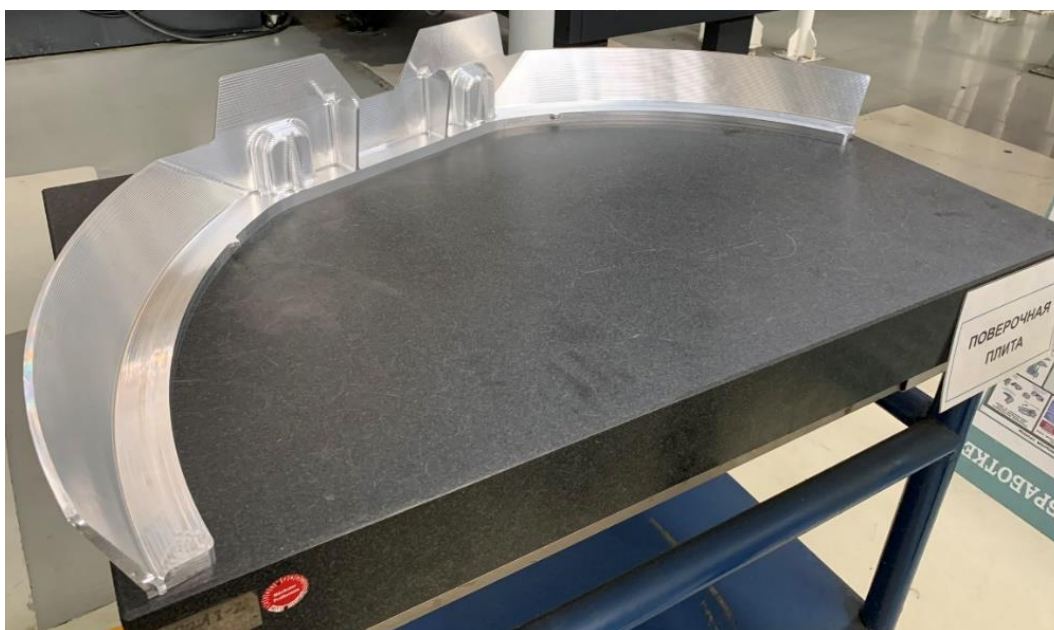


Рис. 7. Контроль плоскостности одной из поверхностей детали на контрольном столе
Fig. 7. Flatness control of one of the part surfaces on the testing table

На данном установе система VERO-S Aviation работает как классическая система нулевого базирования – без использования функции компенсации ТОН, т.к. снимаемый припуск очень мал.

Перемычки технологического припуска по контуру удаляются слесарным способом, позволяя получить готовую деталь (рис. 7).

Основными геометрическими параметрами, по которым производилась оценка каче-

ства конечного изделия и работоспособности системы SCHUNK VERO-S Aviation, соответственно, являются:

Плоскостность, допуск $\pm 0,1$ мм. Контроль производился плоским щупами 0,1 и 0,05 мм на проход/непроход. Результат: непроход щупа 0,1 мм и 0,05 мм между плоскостью стола и детали свидетельствует об отличном показателе плоскостности.

Номинальный габаритный размер по

длине детали – $1072 \pm 0,5$ мм. Полученный размер составил ровно 1072 мм.

Идентичные результаты получены замерами детали на КИМ.

Повторный контроль параметров производился каждую последующую неделю после производства в течение месяца, изменений параметров зафиксировано не было, дополнительной правки изделия не потребовалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как следует из результатов опытно-промышленных испытаний, оснастка SCHUNK VERO-S Aviation в совокупности с предложенной стратегией механической обработки позволяет компенсировать деформации, вызванные остаточными напряжениями 1-го рода, которые возникают:

- в заготовке при ее изготовлении или термообработке вследствие механических нагрузок и ее неравномерного охлаждения (самые большие по величине);

- в детали-полуфабрикате при механической обработке вследствие силовых и тепловых нагрузок в процессе резания.

Перед каждой последующей операцией механической обработки система позволяет осуществить компенсацию поводов, вызванных остаточными напряжениями, которые, в свою очередь, были сформированы в процессе предыдущей операции (или присутствуют в заготовке в состоянии поставки). На последней операции или установке чистовой припуск (не более 1–1,5 мм) снимается фрезерованием с большими подачами, которое позволяет снизить силы резания и температуру в зоне обработки, сводя к минимуму остаточные напряжения. Представленный директивный технологический процесс был реализован российской инжиниринговой компанией «ХАЛТЕК» на одном из авиационных предприятий Российской Федерации. Длительность технологического процесса составила всего 14 ч. Данный результат был достигнут за счет исключения 2-х операций стабилизации, сокращения машинного времени (увеличены режимы резания при изготовлении нежесткой алюминиевой детали с использованием данной оснастки, изменена стратегия обработки и технологический про-

цесс в целом), а также за счет сокращения подготовительно-заключительного времени в 2 раза. Сравнение временных нормативов текущего технологического процесса предприятия и технологического процесса с применением SCHUNK VERO-S Aviation приведены на рис. 8.

Как следует из анализа результатов испытаний, представленных на рис. 8, данная оснастка позволяет более чем в два раза уменьшить штучно-калькуляционное время обработки заготовки данной детали на станке. Учитывая, что производственный цикл ее изготовления по действующей технологии в механических цехах (300 ч по заводским данным) включает еще операции правки, временной и термостабилизации, а использование оснастки SCHUNK VERO-S Aviation позволяет их исключить, то очевидно, что ее применение является весьма эффективным средством снижения себестоимости и уменьшения вероятности возникновения короблений тонкостенных и сложных по геометрической форме заготовок.

Однако высокая стоимость и сложность переналадки оснастки SCHUNK VERO-S Aviation при частой смене выпускаемой продукции препятствуют широкому использованию ее в единичном производстве:

$$T_{шт.к.} = T_{маш} + T_{всп} + T_{пзв},$$

где $T_{шт.к.}$ – штучно-калькуляционное время, ч; $T_{маш}$ – машинное время, ч; $T_{всп}$ – вспомогательное время, ч; $T_{пзв}$ – подготовительно-заключительное время, ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая современная технология с использованием оснастки SCHUNK VERO-S Aviation доказывает свою эффективность в первую очередь при мелкосерийном и серийном производствах в процессе изготовления качественных нежестких тонкостенных деталей, соответствующих всем требованиям конструкторской документации без короблений, многочисленных операций правки, временной стабилизации (пролеживание) и термостабилизации.

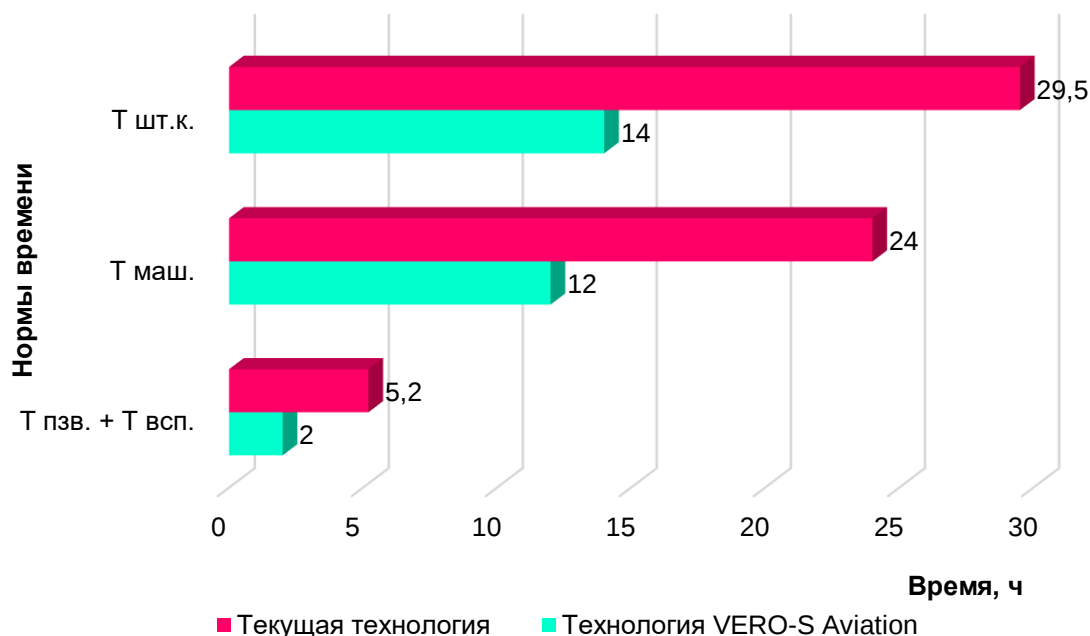


Рис. 8. Нормы времени текущего технологического процесса и технологического процесса с оснасткой SCHUNK VERO-S Aviation

Fig. 8. Time norms of the current technological process and the technological process equipped with SCHUNK VERO-S Aviation tooling

Все это является неотъемлемой частью качественного технологического процесса изготовления любого конечного продукта, будь то самолет, космический корабль, морское судно или пассажирский вагон современного железнодорожного состава, в состав которого входят многочисленные нежесткие и сложные по форме детали из алюминиевых сплавов. Применение данной оснастки позволяет существенно снизить издержки производства за счет снижения машинного и подготовительно-заключительного времени и исключения дополнительных и затратных операций стабилизации, что уменьшает себестоимость конечного продукта и повышает его конкурентоспособность.

Дальнейшее развитие машиностроения предполагает все более существенное снижение материалоемкости и массы изделий. Как упоминалось ранее, одним из направлений этой тенденции и является увеличение в общей номенклатуре машин деталей и узлов с тонкостенными, нежесткими элементами [9–12]. При этом достижение конструктивной прочности может осуществляться за счет применения материалов с бо-

лее высокими прочностными характеристиками (жаропрочные и титановые сплавы).

Изготовление изделий с существенно меньшей массой, но с меньшей прочностью часто связывают с использованием в качестве конструкционных материалов алюминий-ево-литевых и магниевых сплавов.

Как показывает анализ современных научно-технических печатных изданий, технологическая оснастка SCHUNK VERO-S Aviation находит широкое применение при производстве деталей летательных аппаратов не только из алюминиевых сплавов, но и из этих материалов [7, 23]. Системы SCHUNK VERO-S Aviation широко используются ведущими предприятиями аэрокосмической промышленности промышленно развитых стран: «Boeing», «Lockheed Martin Aeronautics», «GKN», «Leonardo». Существующие сложности в логистике поставок в Российскую Федерацию в настоящее время сдерживают широкое использование технологической оснастки VERO-S Aviation в действующем отечественном машиностроительном производстве. Российское авиастроение находится на заре их внедрения и применения.

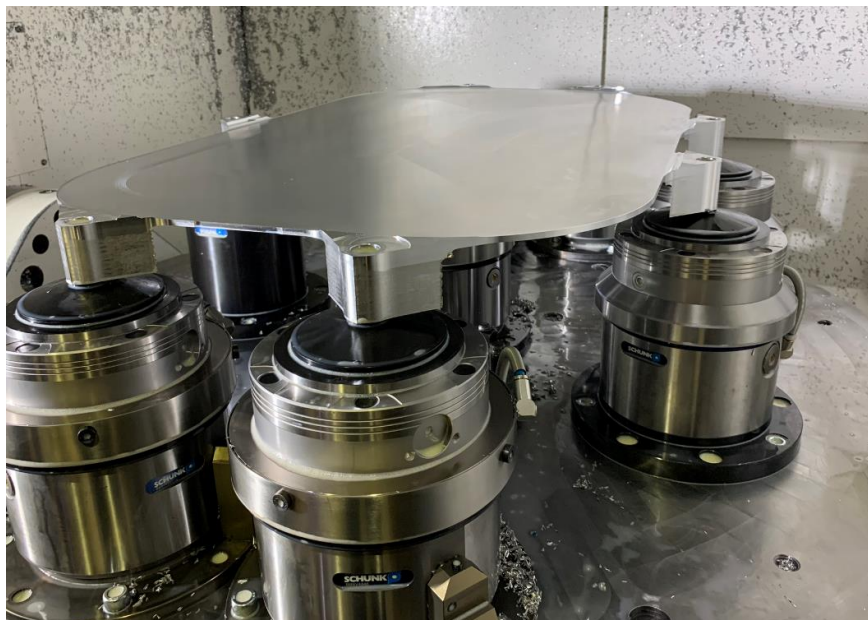


Рис. 9. Производство детали типа «Люк» с применением оснастки SCHUNK VERO-S Aviation
Fig. 9. Manufacture of part cover type with using SCHUNK VERO-S Aviation system



Рис. 10. Производство детали типа «Балка» с применением оснастки SCHUNK VERO-S Aviation
Fig. 10. Manufacture of part rail type with using SCHUNK VERO-S Aviation system

Однако рациональное использование уже закупленных отечественными предприятиями данных систем (на рис. 9 и 10 представлены примеры закрепления деталей в ходе опытно-промышленных работ, проведенных российской инжиниринговой компанией ООО «ХАЛТЕК-ДоАПЛ» с применением оснастки SCHUNK VERO-S Aviation на ряде российских авиационных

предприятий), а также создание и производство им подобных в России, несомненно, является одним из важнейших резервов снижения себестоимости изготовления отечественной продукции, прежде всего аэрокосмического комплекса. Это обязательно позволит вывести российскую авиационную промышленность на мировой уровень.

Список источников

1. Васильевых С.Л., Саитов В.Е. Особенности обработки нежестких валов // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 11. С. 67–68.
2. Uchiyama R., Inoue Y., Uchiyama F., Matsumura T. Optimization in Milling of Polymer Materials for High Quality Surfaces // International Journal of Automation Technology. 2021. Vol. 15. Iss. 4. P. 512–520. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0512>.
3. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. 254 с.
4. Киселев Е.С., Благовский О.В. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. СПб: Лань, 2020, 160 с.
5. Kim Y.S., Wang E. Recognition of machining features for cast then machined parts // Computer-Aided Design. 2002. Vol. 34. Iss. 1. P. 71–87. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00058-6).
6. Киселев Е.С., Назаров М.В. Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей: монография. М.: Русайнс, 2022. 236 с.
7. Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E. Application of the modern stationary workholding systems for increase capacity and quality of non-rigid aircraft parts // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference. 2021. Vol. 346. P. 03076. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134603076>.
8. Балашов А.В., Жидецкая А.С., Потапов И.С., Светлова Т.Г. Технологическое обеспечение точности фрезерования нежестких деталей // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2015. № 2. С. 18–22.
9. Подпоркин В.Г. Обработка нежестких деталей. М.: Машгиз, 1959. 210 с.
10. Добротворский С.С., Гасанов М.И., Басова Е.В. Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем // Вестник Национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. тр. темат. вып. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. № 4. С. 37–40.
11. Kang Tzong-Shyan, Nnaji Bartholomew O. Feature representation and classification for automatic process planning systems // Journal of Manufacturing Systems. 1993. Vol. 12. Iss. 2. P. 133–145. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(93\)90013-J](https://doi.org/10.1016/0278-6125(93)90013-J).
12. Kailash S.B., Zhang Y.F., Fuh J.Y. A volume decomposition approach to machining feature extraction of casting and forging components // Computer-Aided Design. 2001. Vol. 33. Iss. 8. P. 605–617.
13. Насад Т.Г., Насад И.П., Шеров К.Т. Обоснование формирования качества поверхности деталей в результате термического воздействия // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 1. С. 73–78.
14. Насад Т.Г., Шеров К.Т., Насад И.П. Теплофизические аспекты гибридных технологий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 47–52.
15. Sherov K., Kuanov I., Imanbaev Y., Mussayev M., Karsakova N., Mardonov B., et al. The investigation and improvement of the hardness of the clad surface by thermal friction milling methods // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2022. Vol. 11. Iss. 10. P. 784–792. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.10.784-792>.
16. Mussayev M., Sherov K., Buzauova T., Ainabekova S., Taskarina A., Sherov A., Gabdyssalik R. Chip formation during thermal friction turn-milling // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19. Iss. 1. P. 142–147. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27510>.
17. Donenbayev B., Sherov K., Mussayev M., Ainabekova S., Mazdubay A., Taskarina A., Tussupova S., Sherov A., Gabdyssalyk R. Investigation of the method of processing holes with a rotary cup cutter with surfacing // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19. Iss. 4. P. 862–867. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27504>.
18. Татанов П.В., Янюшкин А.Р., Шеров К.Т., Янюшкин А.С. Использование вторичного ресурса твердосплавных сменных многогранных пластин в металлообработке // Наука и техника Казахстана. 2021. № 1. С. 85–96. <https://doi.org/10.48081/QEYA2314>.
19. Носов Н.В., Лавро В.Н., Балакиров С.Н. Технологии восстановления ресурса многогранных неперетачиваемых пластин // Известия Самарского научного центра РАН. 2020. Т. 22. № 3. С. 82–86. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-82-86>.
20. Шеров К.Т., Айнабекова С.С., Тусупова С.О., Сагитов А.А., Иманбаев Е.Б. Исследование термофрикционной отрезки с импульсным охлаждением методом конечных элементов // Вестник машиностроения. 2020. № 8. С. 75–78. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-20-20-8-75-78>.
21. Седов Д.И., Насад Т.Г. Экспериментальные исследования процесса высокоскоростной обработки с низкотемпературным охлаждением // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2. № 2. С. 129–134.
22. Komura N., Matsumoto K., Igari S., Ogawa T., Fujita S., Nakamoto K. Computer aided process planning for rough machining based on machine learning with certainty evaluation of inferred results // International Journal of Automation Technology. 2023. Vol. 17. Iss. 2. P. 120–127. <https://doi.org/10.20965/ijat.2023.p0120>.
23. Черепанов А.А., Балашов А.В., Светлова Т.Г. Совершенствование элементов технологической оснастки для обработки нежестких деталей // Ползуновский альманах. 2012. № 1. С. 223–227.

References

1. Vasil'evykh S.L., Saitov V.E. Non-rigid shaft processing features. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2012;11:67-68. (In Russ.).
2. Uchiyama R., Inoue Y., Uchiyama F., Matsumura T. Optimization in milling of polymer materials for high quality surfaces. *International Journal of Automation Technology*. 2021;15(4):512-520. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0512>.
3. Vishnyakov Ya.D. Piskarev V.D. *Residual stresses control in metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1989, 254 p. (In Russ.).
4. Kiselev E.S., Blagovskij O.V. *Controlling residual stress formation in manufacturing of critical parts*. St Petersburg: Lan'; 2020, 160 p. (In Russ.).
5. Kim Y.S., Wang E. Recognition of machining features for cast then machined parts. *Computer-Aided Design*. 2002;34(1):71-87. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00058-6).
6. Kiselev E.S., Nazarov M.V. *Features of non-rigid body part manufacturing technology*. Moscow: Rusajns; 2022, 236 p. (In Russ.).
7. Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E. Application of the modern stationary workholding systems for increase capacity and quality of non-rigid aircraft parts. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference*. 2021;346:03076. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134603076>.
8. Balashov Aleksandr V., Zhidetskaya Anna S., Potapov Ivan S., Svetlova Tat'yana G. Technological support of accuracy millings of nonrigid details. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Alejkhema*. 2015;2:18-22. (In Russ.).
9. Podporkin V.G. *Processing of nonrigid parts*. Moscow: Mashgiz; 1959, 210 p. (In Russ.).
10. Dobrotvorskij, S.S., Gasanov M.I., Basova E.V. Experience of modern technology creation for manufacturing of non-rigid parts using advanced CAD/CAM/CAE systems. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «HPI»: sbornik nauchnykh trudov tematiceskogo vypuska = Bulletin of the National Technical University "KhPI": collected scientific works of the special issue*. Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; 2015, iss. 4, p. 37–40. (In Russ.).
11. Kang Tzong-Shyan, Nnaji Bartholomew O. Feature representation and classification for automatic process planning systems. *Journal of Manufacturing Systems*. 1993;12(2):133-145. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(93\)90013-J](https://doi.org/10.1016/0278-6125(93)90013-J).
12. Kailash S.B., Zhang Y.F., Fuh J.Y. A volume decomposition approach to machining feature extraction of casting and forging components. *Computer-Aided Design*. 2001;33(8):605-617.
13. Nasad T.G., Nasad I.P., Sherov K.T. Forming quality characteristics of a workpiece surface by means of thermal effects. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*. 2021;1:73-78. (In Russ.).
14. Nasad T.G., Sherov K.T., Nasad I.P. Thermophysical aspects of hybrid technologies. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*. 2020;1:47-52. (In Russ.).
15. Sherov K., Kuanov I., Imanbaev Y., Mussayev M., Karsakova N., Mardonov B., et al. The investigation and improvement of the hardness of the clad surface by thermal friction milling methods. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2022;11(10):784-792. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.10.784-792>.
16. Mussayev M., Sherov K., Buzauova T., Ainabekova S., Taskarina A., Sherov A., Gabdyssalik R. Chip formation during thermal friction turn-milling. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(1):142-147. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27510>.
17. Donenbayev B., Sherov K., Mussayev M., Ainabekova S., Mazdubay A., Taskarina A., Tussupova S., Sherov A., Gabdyssalyk R. Investigation of the method of processing holes with a rotary cup cutter with surfacing. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(4):862-867. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27504>.
18. Tatanov P.V., Yanyushkin A.R., Sherov K.T., Yanyushkin A.S. Use of the secondary resource of hard-alloy replaceable multi-face plates in metalworking. *Nauka i tekhnika Kazahstana*. 2021;1:85-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.48081/QEYA2314>.
19. Nosov N.V., Lavro V.N., Balakirov S.N. Technology of resource recovery of polyhedral non-reachable plates. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;22(3):82-86. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-82-86>.
20. Sherov K.T., Ainabekova S.S., Tusupova S.O., Sagitov A.A., Imanbaev E.B. Finite element method research of thermofriction cutting-off with pulsed cooling. *Vestnik mashinostroenie*. 2020;8:75-78. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-20-20-8-75-78>. (In Russ.).
21. Sedov D.I., Nasad T.G. Experimental researches of process of high-speed processing with low temperature cooling. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*. 2011;2(2):129-134. (In Russ.).
22. Komura N., Matsumoto K., Igari S., Ogawa T., Fujita S., Nakamoto K. Computer aided process planning for rough machining based on machine learning with certainty evaluation of inferred results. *International Journal of Automation Technology*. 2023;17(2):120-127. <https://doi.org/10.20965/ijat.2023.p0120>.
23. Cherepanov A.A., Balashov A.V., Svetlova T.G. Improving tooling package elements for non-rigid part processing. *Polzunovskiy al'manakh*, 2012;1:223–227. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Храмов Александр Владимирович,
заведующий базовой кафедрой «Инновационные
технологии мехобработки»,
Ульяновский государственный технический
университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32,
Россия;
президент ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ»,
117638, г. Москва, ул. Одесская, 2, Россия
Alexander.Khramov@haltec.ru

Жирухин Кирилл Сергеевич,
ведущий инженер,
ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ»,
117638, г. Москва, ул. Одесская, 2, Россия
✉ Kirill.Zhirukhin@haltec.ru

Киселев Евгений Степанович,
д.т.н., профессор,
вед.н.с. департамента научных исследований
и инноваций,
Ульяновский государственный технический
университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, Россия
kec.ulstu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 25.05.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Khramov,
Head of the department «Innovative technologies
of machining»
Ulyanovsk State Technical University,
32, Severny Venets, Ulyanovsk 432027, Russia;
President of HALTEC-DoALL LLC,
2, Odesskaya St., Moscow 117638, Russia
Alexander.Khramov@haltec.ru

Kirill S. Zhirukhin,
Chief Engineer,
of "HALTEK – DoALL" LLC,
2, Odesskaya St., Moscow 117638, Russia
✉ Kirill.Zhirukhin@haltec.ru

Evgeny S. Kiselev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher of the Department of Scientific
Research and Innovation,
Ulyanovsk State Technical University,
32, Severny Venets, Ulyanovsk 432027, Russia
kec.ulstu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 22.03.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 25.05.2023.