

doi: 10.32620/oikit.2020.87.01

УДК 629.735.45.025-027.3,
620.22-419

А. Г. Гребеников, И.А. Воронько
Ю. В. Дьяченко, В. В. Коллеров,
И. В. Малков, В.А. Урбанович*
Н. И. Москаленко

Конструктивно-технологические особенности металлических лопастей несущего и рулевого винтов вертолѐта

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»
АО «Мотор Сич»

Проведен анализ зарубежного и отечественного опыта разработки, производства и эксплуатации вертолетов с металлическими лопастями несущего (НВ) и рулевого (РВ) винтов. Сформулированы общие требования к конструкции лопастей НВ и РВ вертолета. Рассмотрена конструктивно-силовая схема металлической лопасти НВ вертолета. Отмечены особенности конструкционных материалов для металлических лопастей. Приведены особенности конструкции металлических лопастей НВ и РВ с прессованным лонжероном и алюминиевым сотовым наполнителем. Представлена методика параметрического моделирования металлической лопасти НВ вертолета. Описаны маршрутная технология изготовления и методика поверхностного упрочнения наконечника металлической лопасти. Приведены схема и маршрутная технология изготовления алюминиевого прессованного лонжерона, рассмотрены особенности геометрической крутки, поверхностного упрочнения и сборки лонжерона с наконечником лопасти. Показаны особенности приклеивания электронагревательной наклейки на носок лонжерона. Рассмотрены технологические этапы изготовления металлического хвостового отсека лопасти: обезжиривания рулонной алюминиевой фольги; изготовления алюминиевых сотовых пакетов; фрезерования торцов алюминиевого сотового наполнителя. Представлены особенности узловой сборки хвостового отсека и стапельной сборки-склеивания металлической лопасти, дано содержание внестапельных работ для металлической лопасти НВ вертолета.

Ключевые слова: металлическая лопасть, конструктивно-силовая схема, наконечник, прессованный лонжерон лопасти, алюминиевый сотовый наполнитель, сборка.

Введение

Лопасть НВ является наиболее ответственным и нагруженным агрегатом вертолета, обеспечивающим создание потребной подъемной и пропульсивной силы.

Лопасть НВ независимо от конструкции должна удовлетворять весьма разнообразным и зачастую противоречивым требованиям:

- обеспечение статического свеса лопасти на стоянке и угла взмаха в полете (конец лопасти не должен касаться других элементов планера);
- обеспечение требований статической прочности: напряжения, действующие в лонжероне лопасти от центробежных сил в полете и от массовых сил на стоянке, не должны превышать допустимые напряжения;
- обеспечение необходимого запаса жѐсткости по флаттеру;
- отсутствие резонансных колебаний;

- получение уровня динамических напряжений, обеспечивающих заданный ресурс лопасти;
- обеспечение достаточной жесткости лопасти на изгиб в плоскостях тяги и вращения, а также на кручение;
- получение высокого аэродинамического качества при создании подъемной силы;
- обеспечение невысокой (по ресурсу) стоимости и технологичности изготовления лопасти.

С момента создания первой конструкции вертолета для изготовления основного силового элемента лопасти – лонжерона использовали различные материалы: древесину, легированные стали, алюминиевые сплавы, нержавеющие стали, титановые сплавы.

Первым серийным вертолетом с металлическими лопастями НВ была модель S-55, разработанная И. И. Сикорским в декабре 1950 г. Для S-55 были созданы лопасти с одноконтурным D-образным прессованным лонжероном.

К прессованному лонжерону пристыковывали хвостовые отсеки с обшивкой из легкого сплава с сотовым наполнителем из фольги. Подобную конструкцию лопастей использовали потом вплоть до середины 70-х годов на подавляющем большинстве вертолетов первого и второго поколения во всем мире, в том числе и в СССР.

Единственно достойным конкурентом И. И. Сикорского был советский авиаконструктор М. Л. Миль. Построенный в 1952 г. Ми-4, внешне похожий на S-55, превосходил его по грузоподъемности почти в два раза и в момент появления был самым тяжелым вертолетом в мире.

При создании вертолета Ми-4 задача создания высокоресурсных лопастей НВ была одной из важнейших. Ресурс лопастей смешанной конструкции долго не удавалось поднять более 150 часов. Лишь к 1955 г. в результате ряда принятых мер по снижению напряжений и некоторых технологических решений получили ресурс, равный 300 часам.

К концу 50-х годов успешно завершились многолетние работы по созданию надежных цельнометаллических лопастей. В 1959 г. были изготовлены, испытаны и запущены в серийное производство лопасти с прессованным одноконтурным дюралевым лонжероном и хвостовым отсеком трехслойной конструкции с металлическим сотовым наполнителем. Их ресурс удалось увеличить до 2000...2500 часов. Отработанная на Ми-4 конструкция лопастей на многие годы стала типовой для вертолетов «Ми».

Специфическими для лопастного производства являются динамические испытания, необходимые для установления и подтверждения ресурса лопасти.

Для каждого типа лопастей в методике испытаний учитывают характер работы лопасти. Стенды для испытаний на усталостную прочность предусматривают моделирование нагрузок на комлевый участок лопасти вертолета в плоскости тяги и плоскости вращения, а также нагружение среднего участка лопасти в плоскости тяги с подключением противообледенительной системы и без нее.

Организация производства лопастей и редукторов для украинских вертолетов типа «Ми» и собственной разработки является одним из пунктов плана мероприятий по реализации стратегии возрождения отечественного авиастроения на период до 2022 года [1].

Вертолетная программа АО «МОТОР СИЧ» предусматривает этапы:

- модернизация и замена двигателей на принадлежащих Украине вертолетах российского производства;
- разработка и сертификация вертолетов как гражданского, так и военного назначения собственной разработки с последующим запуском в серийное производство.

Актуальной научной задачей вертолетной программы АО «МОТОР СИЧ» также является разработка организационных, конструкторских и технологических мероприятий для обоснованного увеличения заданного ресурса металлических лопастей украинских вертолетов Ми-8, Ми-2, Ми-24 [2].

Целью данной статьи является систематизация многолетних результатов конструирования и серийного производства металлических лопастей вертолетов Ми-8, Ми-2, Ми-24 для использования при разработке научных методик подтверждения и продления ресурса лопастей НВ и РВ данных вертолетов.

Общие требования к конструкции лопастей НВ и РВ вертолета

Основные требования к конструкции лопастей вертолета наиболее полно сформулированы в авиационных правилах АП 27 и АП 29. Эти требования касаются прочности и сохранения работоспособности при критических режимах полета, усталостной прочности и сохранения живучести при возникновении усталостных повреждений.

Для диагностики целостности основного несущего элемента лопасти – лонжерона в конструкции вертолета используют диагностику стабильности избыточного давления воздуха в лонжероне. Регистрацию факта повреждения лонжерона осуществляют при межполётном осмотре лопасти по выдвинутому положению штыря сигнализатора.

Для лопасти вертолета должна быть предусмотрена антиобледенительная система, исключающая выход технических характеристик за установленный лимит при разрешенных климатических условиях и условиях полета.

Такие явления, как флаттер и дивергенция, должны быть исключены на всех режимах полета, включая критические.

Кроме перечисленных требований, связанных с обеспечением безопасности эксплуатации вертолета, конструкция лопастей, их геометрия, массожесткостные характеристики, балансировка должны обеспечивать эффективную и безопасную эксплуатацию вертолётa с учётом его назначения, установленных ограничений и ресурсов.

Лонжероны большинства зарубежных средних и тяжелых вертолетов имеют D-образное сечение, обеспечивающее наибольшую крутильную жесткость, приходящуюся на единицу веса лопасти [5].

Конструктивно-силовая схема металлической лопасти НВ вертолета

При выборе конструктивно-силовой схемы (КСС) металлической лопасти вертолета необходимо определить все конструктивные элементы по их функциональному назначению. В общем случае считается, что лопасть состоит из лонжерона, нервюр, стрингеров и обшивки, т. е. в принципе из тех же элементов, что и крыло самолета. Однако компоновка и исполнение этих элементов весьма специфичны, что объясняется особенностями нагружения лопасти в процессе эксплуатации.

Внешний вид вертолета Ми-8МТ и типовая КСС сечения металлической лопасти НВ и РВ вертолета [3, 4] показана на рис. 1.

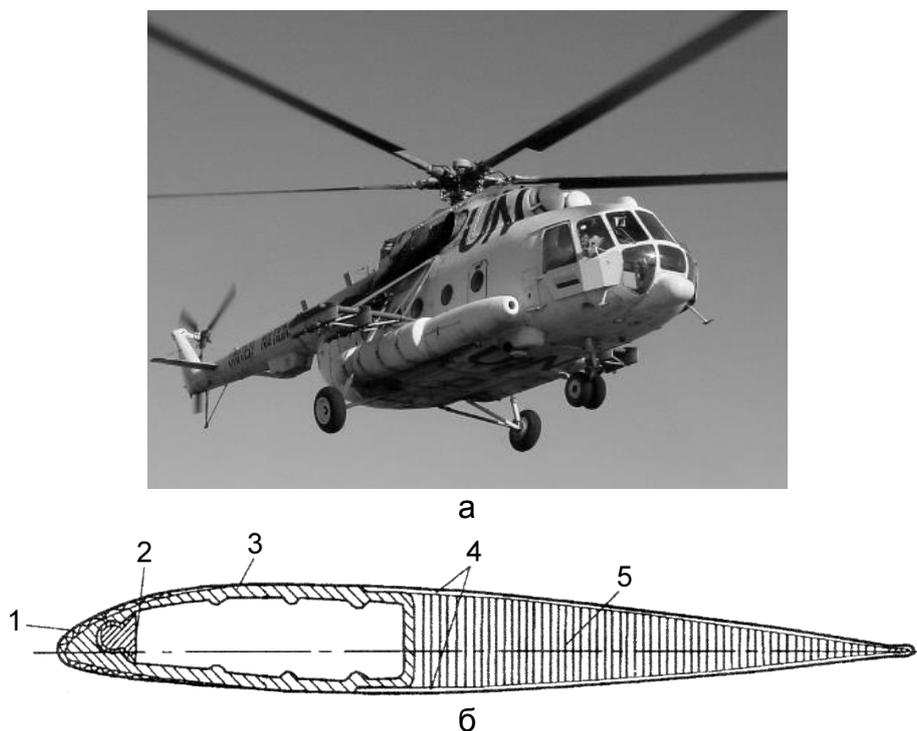


Рис.1. Внешний вид вертолета Ми-8МТ (а) и типовая КСС сечения металлической лопасти (б): 1 – пакет противоабразивной наклейки, нагревателя и прокладки диэлектрика; 2 – противофлаттерный груз; 3 – лонжерон; 4 – обшивка хвостового отсека; 5 – сотовый наполнитель хвостового отсека

Контурный лонжерон вписан в переднюю часть профиля пера металлической лопасти. Это позволяет разнести материал на максимальное расстояние от осей жесткости, что увеличивает жесткость лопасти, снижает действующие напряжения и, следовательно, позволяет снизить ее массу.

Использование контурных лонжеронов позволяет уменьшить массу противофлаттерных грузов, так как сам лонжерон представляет собой значительную массу, сосредоточенную в передней части лопасти. Данный тип лонжеронов дает возможность реализовать максимальную жесткость как на изгиб, так и на кручение. С ростом жесткости лопасти возрастают и частоты собственных колебаний. Это приводит к тому, что одни частоты могут удаляться от возбуждающих гармоник (т. е. от резонанса), а другие – приближаться к ним [3, 4].

Контурные лонжероны могут выполняться двух типов: из прессованной заготовки или наборными из отдельных продольных элементов. Наибольшее распространение получили прессованные лонжероны. Однако при их использовании очень трудно обеспечивать крутку и изменять профиль лопасти по размаху. Требуемая высота профиля обеспечивается только лишь благодаря фрезерованию наружной поверхности. Данная конструкция лучше всего подходит для прямоугольной в плане лопасти (сужение $\eta=1$) и оказывается выгодной при массовом выпуске лопастей.

Увеличение жесткости в плоскости взмаха может быть достигнуто за счет увеличения относительной толщины профиля. Но в этом случае наблюдается

значительное возрастание профильного сопротивления, что снижает аэродинамическое качество несущего винта. При использовании контурных лонжеронов увеличение жесткости в плоскости тяги может быть достигнуто благодаря использованию нескольких контуров. Это также позволяет повысить живучесть металлической лопасти.

Выбор КСС должен обеспечивать требуемые жесткостные и резонансные характеристики лопасти. В качестве наглядного примера можно привести организацию самостоятельных хвостовых отсеков в лонжеронной части лопасти.

Обшивка является наиболее нагруженным элементом конструкции хвостового отсека. Она передает на лонжерон центробежную силу отсека, изгибающие моменты, создаваемые аэродинамическими и инерционными силами, и деформируется в зоне прикрепления вместе с лонжероном. Основная цель организации хвостовых отсеков – избежать участия обшивки в работе при изгибных колебаниях лопасти, следовательно, не иметь в материале обшивки переменных напряжений с большой амплитудой [3, 5].

Соответственно, при наличии лонжерона, имеющего высокую жесткость на изгиб в плоскости вращения, необходимость в таком мероприятии отсутствует. В этом случае задняя кромка может выполняться цельной и увеличивать жесткость лопасти, если это допустимо резонансной диаграммой.

Выбор КСС лопасти осуществляется одновременно с подбором материалов и анализом возможных методов изготовления элементов конструкции.

Особенности конструкционных материалов для металлических лопастей

Летные характеристики и надежность вертолета при эксплуатации в значительной степени определяются совершенством конструкции и качеством изготовления лопастей НВ. Это объясняется тем, что НВ вертолета выполняет одновременно несколько функций: создает подъемную силу, приводит в движение вертолет и служит органом управления. Лопасти НВ при эксплуатации подвергаются воздействию постоянных и переменных нагрузок, поэтому материал лопасти должен обладать прежде всего высокой усталостной прочностью.

В настоящее время в вертолетостроении широко применяют цельнометаллические лопасти клееной конструкции, так как клеевые соединения, в отличие от винтовых, заклепочных, сварных и паяных, позволяют избежать чрезмерной концентрации напряжений в лопасти и улучшить ее усталостные характеристики. Эксплуатация вертолетов в различных климатических районах требует от материала лопасти сохранения высокой усталостной прочности и при воздействии агрессивной среды (промышленных газов, влажного воздуха, дождя, морской влаги), т. е. высокой коррозионной усталостной прочности.

В качестве материала металлических лонжеронов лопастей НВ и РВ вертолетов в Советском Союзе в течение длительного времени использовали сплав АВ системы Al-Mg-Si, частичное применение получил сплав АД33 той же системы, несколько уступающий сплаву АВ по механическим свойствам, но более коррозионностойкий [2, 6].

Применение сплавов системы Al-Mg-Si для лонжеронов лопастей НВ и РВ вертолетов обусловлено их хорошей прессуемостью, удовлетворительной коррозионной стойкостью и низкой чувствительностью к концентрации напряжений. В целях обеспечения надежности и установленного эксплуатационного ресурса лопастей очень жесткие требования предъявляют не только к прочностным и коррозионным свойствам сплавов, но и к качеству металла в отно-

шении неметаллических включений, макроструктуре, качеству поверхности лонжеронов после изготовления. Наличие концентраторов напряжений может привести к преждевременному разрушению лопасти. Сравнительные механические свойства прессованных профилей из сплавов АВТ1 и АД33Т1, применяемых для лопастей НВ и РВ вертолетов, приведены в таблице 1.

Таблица 1
Механические свойства прессованных профилей из сплавов АВТ1 и АД33Т1

Марка	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АВТ1	350-390	300-320	13-15
АД33Т1	310-340	260-280	11-13

В таблице 2 приведены результаты усталостных испытаний образцов из сплавов АВТ1 (числитель) и АД33Т1 (знаменатель). Образцы испытывали в исходном состоянии и с защитными покрытиями, применяемыми для деталей авиационной техники из алюминиевых сплавов.

Таблица 2
Предел выносливости прессованных профилей из сплавов АВТ1 и АД33Т1

Состояние поверхности и защитное покрытие	σ_{-1} при переменном изгибе на базе 2×10^7 циклов, МПа	Потери σ_{-1} , %
Шлифование без покрытия	120/105	37,5/19,0
Анодирование в H_2SO_4	130/105	-
Анодирование в H_2SO_4 и лакокрасочное покрытие	120/110	-

Значительное повышение усталостной прочности сплавов для лопастей вертолетов достигается поверхностным упрочнением лонжеронов с помощью виброударного метода. Срок службы металлических лопастей при этом удается увеличить в 2 - 2,5 раза.

В таблице 3 приведены результаты усталостных испытаний образцов сплавов АВТ1 (числитель) и АД33Т1 (знаменатель) в исходном и наклепанном состояниях, а также с коррозионными поражениями.

Таблица 3
Предел выносливости сплавов АВТ1 и АД33Т1 в исходном и наклепанном состояниях, с коррозионными поражениями и без них

Состояние поверхности	σ_{-1} при переменном изгибе на базе 2×10^7 циклов, МПа	Потери σ_{-1} , %
Шлифованная	120/110	-
Шлифованная с коррозионными поражениями	66/56	45,0/49,5
Наклепанная	140/130	-
Наклепанная с коррозионными поражениями	120/120	14,0/8,0

В конструкции металлических лопастей НВ и РВ вертолета синтетические клеи имеют следующее назначение [5]:

– клеи ВК-3 и ВК-50 – для сборки-склеивания хвостового сотового отсека, соединения верхней и нижней обшивок с нервюрами и для приклеивания хвостовых отсеков к алюминиевому прессованному лонжерону;

– клей ВК-51 – для склеивания обшивок с сотовым наполнителем при изготовлении хвостовых отсеков;

– клей ВК-25 – для изготовления сотового наполнителя из алюминиевой фольги АМг2Н, которую используют в конструкции металлического хвостового отсека лопасти вертолета.

Применение высокоэластичных и высокопрочных клеев конструкционного назначения обеспечивает ресурс и надежность лопастей всех типов вертолетов семейства «Ми» при длительной эксплуатации.

Наиболее ответственным в клеевых сотовых конструкциях является соединение обшивки с сотовым наполнителем. При выборе клея необходимо учитывать, что соединение между сотовым наполнителем и обшивками должно выдерживать примерно те же напряжения сдвига, что и наполнитель. Кроме того, клеевое соединение должно обладать достаточной прочностью при равномерном отрыве во всем диапазоне рабочих температур, чтобы предотвратить возможность образования складок на обшивках под действием сжимающих продольных нагрузок.

Наличие перфорации в стенках ячеек сотов способствует распространению воды в агрегатах и снижает эксплуатационную надежность сотовых конструкций. После воздействия воды в течение одного месяца прочность соединения обшивок с наполнителем на клеях ВК-3 и ВК-32-200 снижается примерно на 20...30%. Поэтому при проектировании должны быть обеспечены мероприятия, исключающие попадание воды внутрь сотовых хвостовых отсеков.

Особенности конструкции лопасти НВ с прессованным лонжероном

Ниже рассматривается конструкция цельнометаллической лопасти НВ вертолета Ми-8 как наиболее типовая [5, 6]. Лопасть с прессованным лонжероном и хвостовыми отсеками с сотовыми наполнителями, образующими перо лопасти, имеет прямоугольную форму в плане (рис. 2).

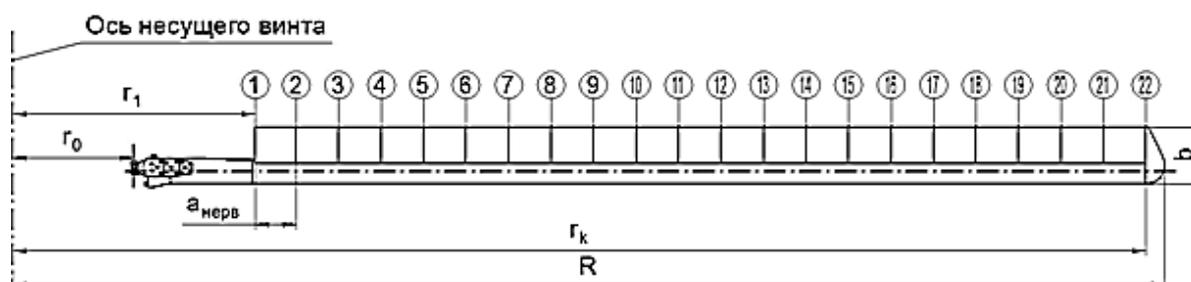


Рис. 2. Общий вид цельнометаллической лопасти НВ в плане:
 1-22 – номера сечений лопасти; r_0 – расстояние от оси НВ до оси наконечника лопасти; r_1 – расстояние от оси НВ до начала пера лопасти; R – длина лопасти; b – ширина (хорда профиля) лопасти; $a_{\text{нерв}}$ – расстояние между нервюрами

Перо металлической лопасти НВ состоит из 21 отсека, которые расположены между нервюрами № 1 – 22. На конце лопасти установлен обтекатель.

Поперечные сечения лопасти НВ имеют следующие профили: от нервюры № 1 до нервюры № 3 – НАСА-230 (без модификаций), от нервюры №4 до нервюры №22 – НАСА-230М (такой же профиль с модифицированной хвостовой частью – задняя кромка приподнята над линией хорды). Между нервюрами № 3 и № 4 расположен переходный профиль. Относительная толщина профиля в сечении по нервюре № 1 равна 13%, между нервюрами № 2–3 составляет 12%, а между нервюрами № 4–22 – 11,38%.

Металлическая лопасть НВ имеет геометрическую крутку $+5^\circ$ в сечениях по нервюрам № 1–4 и далее изменяющуюся по линейному закону до 0° в сечении по нервюре № 22. Между нервюрами № 16 и № 18 установлены триммеры, которые являются средством для изменения моментных характеристик лопасти. Триммеры используют при регулировке соконусности лопастей НВ.

В комлевой части лопасти на алюминиевый прессованный лонжерон 7 установлен стальной наконечник 1, который закреплен на лонжероне болтами 6 и втулками 5 с помощью клеевой пленки МПФ-1 (рис. 3).

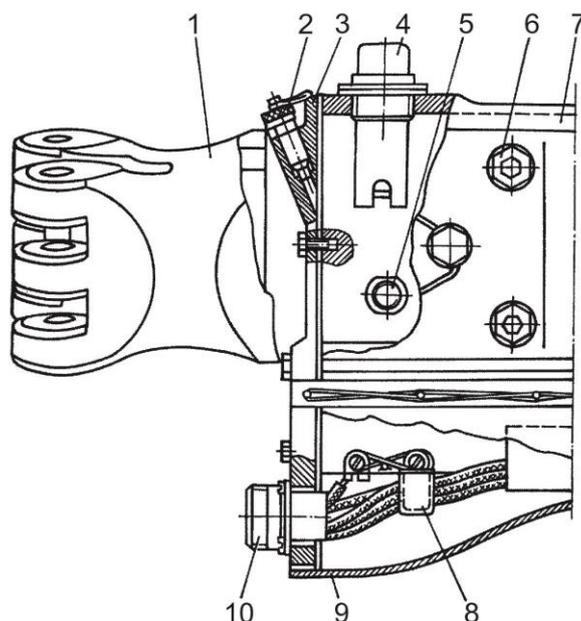


Рис. 3. Схема комлевой части металлической лопасти: 1 – наконечник; 2 – вентиль; 3 – колпачок; 4 – сигнализатор давления в лонжероне; 5 – втулка крепления наконечника; 6 – болты крепления наконечника; 7 – лонжерон; 8 – хомут крепления проводов; 9 – крышка; 10 – штепсельный разъем

Втулки 5 затягивают болтами, которые вворачивают вовнутрь и закантуют проволокой. Во внутренней полости лонжерона на участке сквозных болтов 6 установлена текстолитовая распорка. К торцовой заглушке и полкам лонжерона крепят винтами крышку 9, закрывающую провода штепсельного разъема 10. Провода к противообледенительной системе и лампе контурного огня лопасти расположены в канавке лобовой части лонжерона и подведены к штепсельному разъему в комлевой части лопасти с помощью хомута 8.

В систему сигнализации повреждения металлического лонжерона лопасти НВ входят (рис. 3):

- заглушки, установленные на конце и в комле лопасти и предназначенные для герметизации полости лонжерона;

- сигнализатор давления воздуха 4, включающий в себя сильфонный чувствительный элемент;

- зарядный вентиль 2 с золотником и колпачком 3.

Внутренняя полость металлического лонжерона заполнена воздухом под давлением, превышающим давление начала срабатывания сигнализатора на величину $0,015 \pm 0,002$ МПа.

Перо металлической лопасти НВ (рис. 4) образовано отдельными хвостовыми отсеками в количестве 21 (№ 1 – 21) штук. Каждый отсек имеет обшивку 2 из алюминиевого листа Д16АТ-л 0,5, склеенного с сотовым наполнителем 8, двумя боковыми нервюрами 3 и хвостовым стрингером 1 из текстолита.

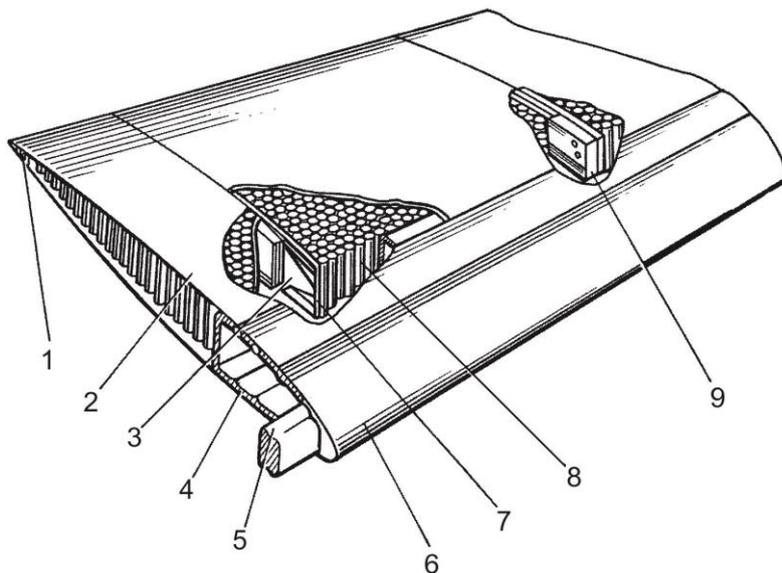


Рис. 4. Типовой хвостовой отсек металлической лопасти:

- 1 – хвостовой стрингер; 2 – обшивка; 3 – нервюра; 4 – лонжерон;
5 – противовес; 6 – противообледенительное устройство; 7 – лапка нервюры;
8 – сотовый наполнитель; 9 – межотсечный вкладыш

Обшивка у заднего стрингера не разрезана, а обогнута вокруг него. Сотовый наполнитель склеен из алюминиевой фольги, после растяжения отфрезерован по теоретическому контуру лопасти. Соты наполнителя хвостового отсека имеют форму правильного шестигранника.

Нервюры хвостового отсека лопасти изготовлены из алюминиевого листа Д16АТ-л 1,0 методом холодной штамповки. В местах приклеивания нервюр к лонжерону стенка нервюры отогнута и представляет собой лапку 7, приклеиваемую к лонжерону 4. В обращенной к концу лопасти нервюре каждого из хвостовых отсеков просверлено дренажное отверстие диаметром 5 мм.

Отсеки приклеены к лонжерону клеем ВК-3. Для предотвращения перетекания воздуха между отсеками вложены межотсечные вкладыши 9. Вкладыши имеют металлический каркас в виде пустотелой коробки, состоящий из двух нервюр с полками, направленными внутрь коробки, склепанными через распорные втулки. По периметру каркаса наклеена листовая губчатая резина. Весь вкладыш снаружи покрыт слоем герметика методом окунания.

Для получения необходимой поперечной центровки лопасти в носок лонжерона вставлен противовес 5, состоящий из восьми отдельных стальных

брусков длиной по 400 мм и весом по 1 кг. Каждая часть противовеса покрыта резиной, которая обеспечивает плотное прилегание его к передним направляющим ребрам жесткости в полости лонжерона 4 (рис. 4).

Концевая часть лопасти в зоне 10 отсека № 21 заканчивается обтекателем 9, у которого передняя часть 5 съемная и крепится винтами (рис. 5).

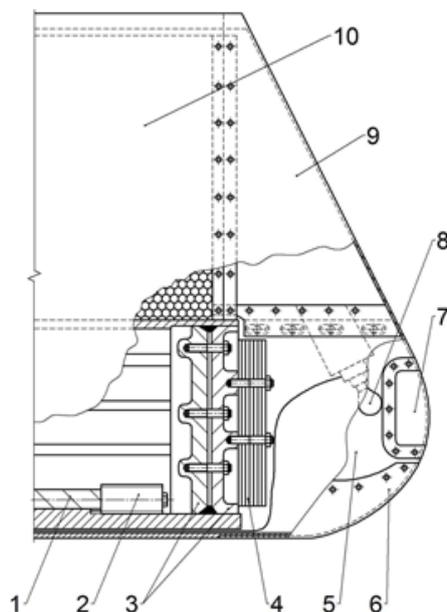


Рис. 5. Концевая часть лопасти: 1 – противовес; 2 – винтовой упор; 3 – заглушки для герметизации полости лонжерона; 4 – пластины балансировочного груза; 5 – съемная часть законцовки; 6 – защитная накладка; 7 – стекло контурного огня; 8 – лампа контурного огня; 9 – несъемная часть законцовки лопасти; 10 – отсек № 21

При снятом обтекателе открывается доступ к узлу крепления пластин балансировочных грузов 4, установленных на двух шпильках, которые вкручены в упор концевой заглушки 3 лонжерона, а также стеклу 7 и лампе 8 контурного огня. На лобовой части съемной законцовки для увеличения ее абразивной стойкости установлена защитная стальная накладка 6 из материала X18H9T.

Внутри концевой части лонжерона смонтированы наружная и внутренняя заглушки 3, стянутые с помощью шпилек и гаек. Наружную заглушку крепят к полкам лонжерона винтами. Между заглушками устанавливают резиновую прокладку, имеющую клинообразную форму в сечении. При стягивании заглушек их конусная поверхность выжимает прокладку, что обеспечивает надежную герметизацию полости со стороны концевой части лонжерона. Возникающие при вращении лопасти центробежные силы противовеса 1 воспринимаются винтовым упором 2, установленным внутри лонжерона (см. рис. 5).

На носке каждой лопасти НВ и РВ установлена электронагревательная накладка с металлической оковкой, поверх которой наклеен противоабразивный лист резины (НО-68-1) толщиной 0,5 мм. Нагревательная накладка состоит из шести слоев стеклоткани, поверхностного слоя резины и нагревательного элемента, проложенного между слоями стеклоткани. Нагревательный элемент представляет собой тонкие ленты из нержавеющей стали, которые расположены вдоль всей длины лопасти на 12% по хорде.

Особенности конструкции металлической лопасти РВ вертолета

Лопасть РВ вертолета Ми-8 – цельнометаллическая, прямоугольной формы в плане без аэродинамической и геометрической крутки (рис. 6) [4, 6].

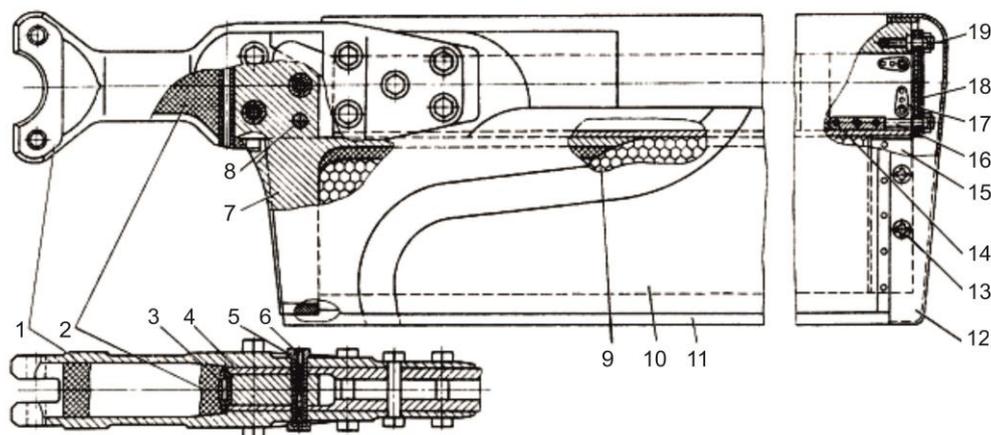


Рис. 6. Схема металлической лопасти РВ вертолета Ми-8

Алюминиевый прессованный лонжерон 4 изготовлен из сплава АВТ-1, к задней стенке лонжерона приклеена неразрезная хвостовая часть лопасти.

Хвостовая часть состоит из сотового заполнителя 9, обшивки 10, хвостового стрингера 11 и концевой нервюры 15. Сотовый заполнитель изготовлен из алюминиевой фольги толщиной 0,04 мм. Снаружи сотовый заполнитель оклеен обшивкой 10 из двух слоев стеклоткани толщиной 0,3 мм.

Стрингер 11 также изготовлен из двух слоев стеклоткани и наклеен снаружи вдоль хвостовой части лопасти на обшивку 10. Алюминиевая концевая нервюра 15 стенкой приклеена к наружному торцу сотового блока, а полками – к обшивке хвостовой части.

У комля лопасти соединение хвостовой части с лонжероном усилено кронштейном 7, приклеенным к лонжерону и притянутым болтами 6. В комлевой части лопасти к лонжерону закреплен стальной наконечник 1 для навески лопасти к втулке винта с текстолитовой распоркой 2, предотвращающей смятие полок лонжерона. Наконечник крепят к лонжерону восемью болтами 6, ввернутыми в резьбовые втулки 5, и фиксируют штифтом 8. Внутренняя полость лонжерона герметизирована. В комлевой части в торец лонжерона вклеен резиновый вкладыш 3, по контуру которого нанесен герметик. В концевой части лонжерона установлена заглушка 14 и имеются отверстия под пластины 18 балансировочных грузов, которые закреплены на шпильках 16 и 19.

В концевой части лопасти установлена нервюра 15, к которой винтами 13 через анкерные гайки 17 крепят концевой обтекатель 12, штампованный из алюминиевого сплава. Для предотвращения абразивного изнашивания на лобовой части обтекателя приклеена накладка из нержавеющей стали.

Параметрическое моделирование металлической лопасти НВ вертолета

Применение в практике проектирования и конструирования трёхмерных параметрических моделей элементов конструкции (ТПМЭК) даёт возможность проводить численные расчеты аэродинамических и прочностных характеристик

как отдельных агрегатов, узлов и деталей, так и всего вертолета в целом с помощью метода конечных элементов [7].

Исходными параметрами для создания ТПМЭК металлической лопасти НВ вертолета являются (рис. 7):

- радиус лопасти R , хорда лопасти $b_{\text{корн}}$, сужение лопасти η ;
- закон изменения геометрической крутки лопасти;
- тип законцовки и её геометрические параметры;
- тип захвата лопасти и его геометрические параметры;
- тип противообледенительной системы и её геометрические параметры;
- тип защиты лопасти от абразивного износа и его геометрические параметры;
- тип системы сигнализации повреждения лонжерона и его геометрические параметры;
- количество и геометрические параметры крепёжных элементов;
- расстояние между нервюрами и их геометрические параметры.

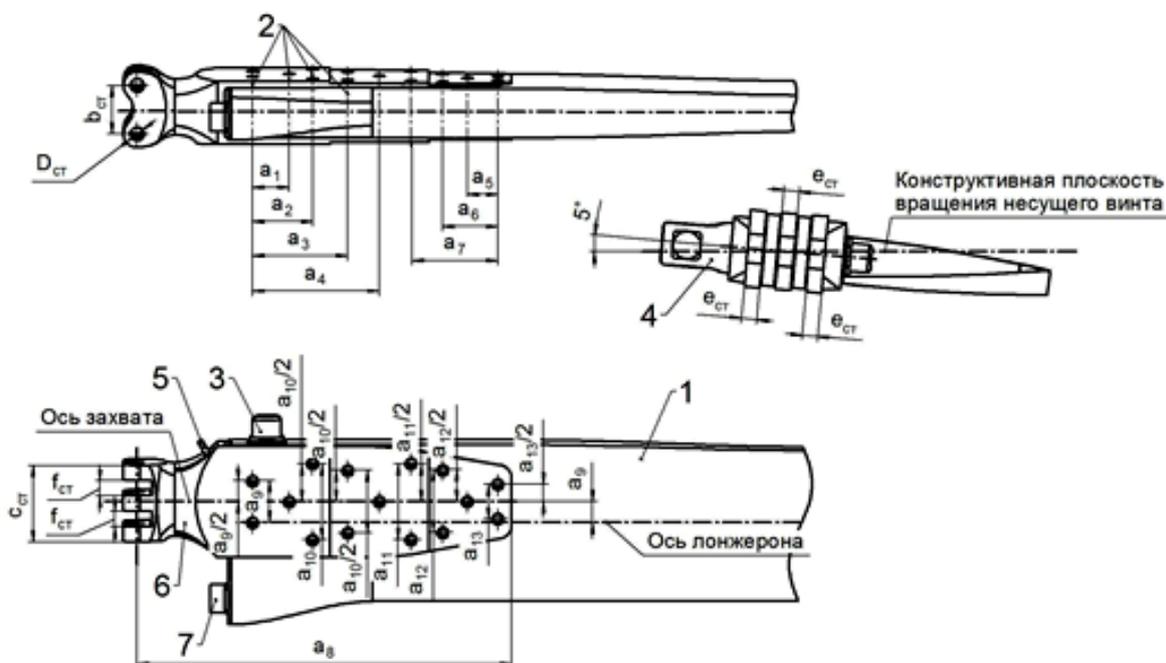


Рис. 7. Параметры лопасти НВ для проектирования и конструирования ТПМЭК: 1 – лонжерон; 2 – оси болтов крепления наконечника к лонжерону, 3 – сигнализатор давления воздуха; 4 – крышка-заглушка полости лонжерона; 5 – зарядный вентиль; 6 – захват; 7 – штепсельный разъем; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, b_{\text{ст}}, c_{\text{ст}}, D_{\text{ст}}, e_{\text{ст}}, f_{\text{ст}}$ – геометрические параметры лопасти

ТПМЭК позволяют также определить массовые и инерционные характеристики [7]. ТПМЭК, которые содержат информацию о технологии изготовления (технические требования, значения допусков размеров и форм, а также припусков), позволяют оценить собираемость конструкции и точность сборки.

Предлагаемый метод параметрического моделирования металлической лопасти НВ вертолета с помощью компьютерной системы CATIA V5 является модификацией метода интегрированного проектирования элементов авиационных конструкций, изложенного в [7].

Параметрическая мастер-геометрия лопасти НВ представляет собой линейчатую поверхность, созданную по базовым профилям лопасти.

На базе параметрической мастер-геометрии строят модель распределения пространства, которая определяет положение осевых плоскостей силового набора лопасти для последующего построения моделей деталей лопасти.

Блок-схема метода параметрического моделирования металлической лопасти НВ с помощью системы CATIA V5 включает в себя этапы:

- Определение геометрических характеристик элементов конструкции лопасти из условия обеспечения статической прочности, усталостной долговечности, живучести, надежности, производственной и эксплуатационной технологичности и их оптимизация по критерию минимальной массы.
- Определение массово-инерционных, аэродинамических характеристик лопасти, характеристик аэроупругости, усталостной долговечности и ресурса, характеристик работоспособности.
- Создание полного электронного определения лопасти в виде аналитических эталонов всех элементов конструкции (рис. 8).
- Разработка конструкторской, технологической, сертификационной и эксплуатационной документации.

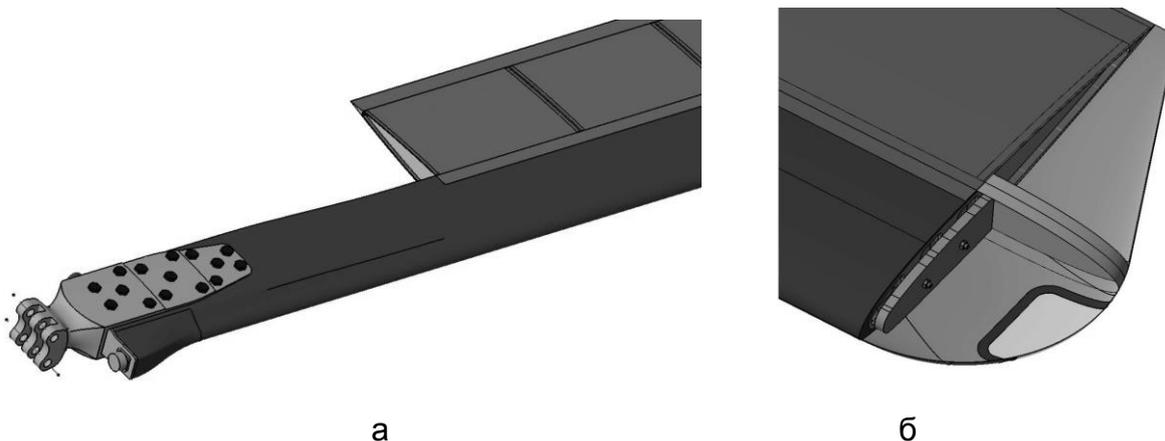


Рис. 8. Фрагменты аналитических эталонов конструкции концевой (а) и концевой (б) частей металлической лопасти НВ вертолета

Организационные, конструкторские и технологические мероприятия [1, 2] по продлению ресурса металлических лопастей НВ и РВ украинских вертолетов Ми-8, Ми-2, Ми-24 и созданию вертолетов собственной разработки могут быть эффективными при наличии в своем составе следующих важных элементов:

- интегрированная компьютерная информационная среда;
- комплекс технических средств и компьютерного программного обеспечения для создания проектов модифицированных и новых вертолетов;
- производственное и экспериментальное специальное оборудование;
- коллектив специалистов, сертифицированных в области вертолетостроения и информационной поддержки жизненного цикла вертолетов.

Особенности изготовления наконечника металлической лопасти

Наконечник металлической лопасти (рис. 9, а) является особо ответственной деталью НВ и РВ вертолета. Наконечник металлической лопасти из-

готовляют механической обработкой из стальной поковки марки 40ХН2МА и относят к первой группе контроля по отраслевому стандарту [7]. На рис. 9, б показаны заготовки наконечников лопастей НВ после механической обработки поверхностей проушины и вилки (Ми-8 и Ми-2).

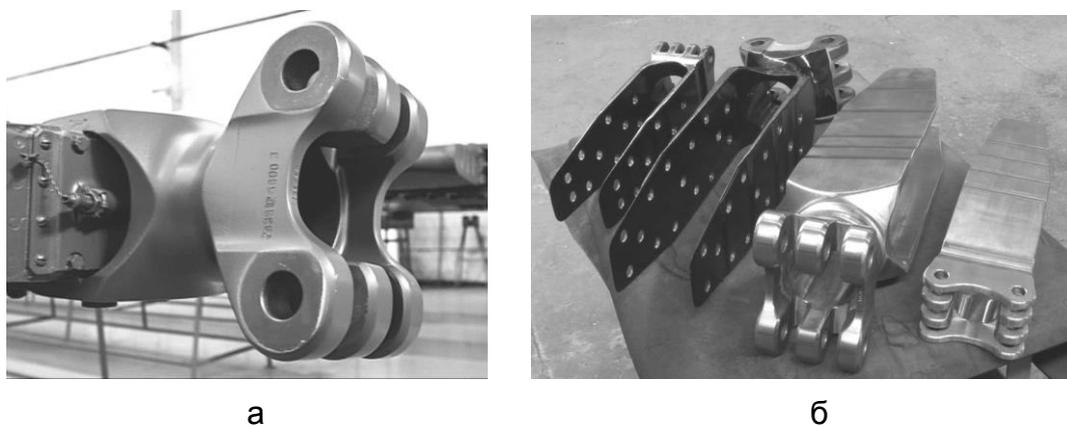


Рис. 9. Наконечники металлической лопасти НВ вертолетов

Сложность механической обработки наконечника лопасти обусловлена малой жесткостью плоскостей проушины, возможностью их деформации под действием сил резания и внутренних напряжений, высокой точностью размеров и взаимного расположения поверхностей. Заготовка наконечников НВ и РВ – поковка с технологической перемычкой, которая необходима для обеспечения жесткости при механической обработке внутренней и наружной поверхностей проушины и вилки наконечника лопасти (рис. 10, а).

Маршрут обработки наконечника включает в себя операции сверления центровых отверстий и точения двух шеек как технологических баз: одну – между проушиной и вилкой, вторую – на напуске вилки (рис. 10, б).

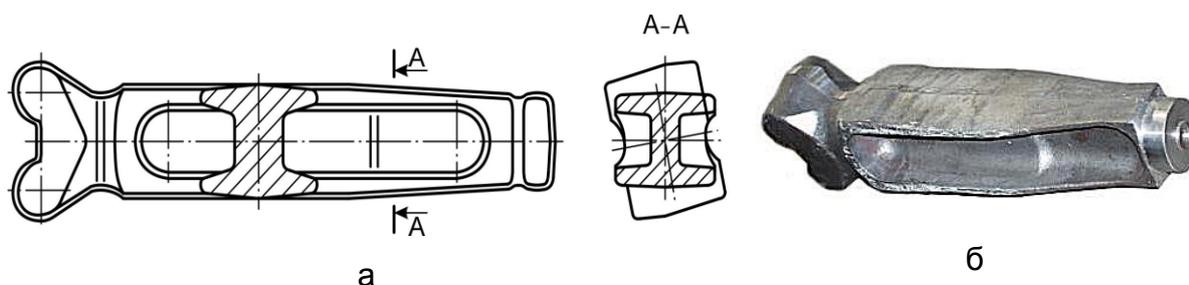


Рис. 10. Форма и технологические базы заготовки наконечника лопасти (Ми-8)

Маршрутная технология изготовления наконечника лопасти НВ и РВ вертолета содержит следующие типовые операции [8]:

- входной рентген-контроль заготовки на отсутствие трещин, волосовин (рентген-аппарат модели РУП-600);
- торцеподрезная – центральная операция для создания технологических баз обработки проушины и вилки (станок центральный);
- фрезерование плоскостей проушины и вилки с припуском на шлифование (станок фрезерный с ЧПУ модели МА-655СМ3ОА);

- сверление, зенкерование, развертывание отверстий в вилке (станок фрезерный с ЧПУ модели МА-655СМ3ОА);
- термическая обработка (печь индукционная модели УНКЗ-2);
- удаление перемычки (станок абразивный отрезной модели АС- 970);
- шлифование плоскостей проушины и вилки на заготовке наконечника (станок плоскошлифовальный);
- притупление острых кромок (верстак слесарный);
- хроматное пассивирование для предотвращения коррозии при межоперационном хранении заготовок (участок гальванический);
- предварительная обработка (сверление и зенкерование) отверстий в плоскостях проушины заготовки наконечника (станок фрезерный с ЧПУ модели МА-655СМ3ОА);
- дорнование отверстий на вилке наконечника (гидропресс);
- обкатка, раскатка поверхностей на вилке (станок модели СО-1200);
- вибрационное упрочнение (виброустановка модели ВУД-1000);
- технический контроль (контрольно-измерительная машина с ЧПУ);
- взвешивание наконечника (весы настольные модели ВНЦ-10);
- антикоррозионная обработка – кадмирование (участок гальванический);
- грунтование, окрашивание наконечника (участок малярный).

Окончательную чистовую и упрочняющую обработку (развертывание и дорнование) отверстий в плоскостях проушины наконечника проводят ручным механизированным инструментом совместно с лонжероном лопасти в специальном приспособлении, в которое вмонтирован кондуктор.

На рис. 11 показаны схемы обработки заготовки наконечника для черновых операций и конфигурация заготовки после обработки внутренней и наружной поверхностей проушины и отверстий в вилке.

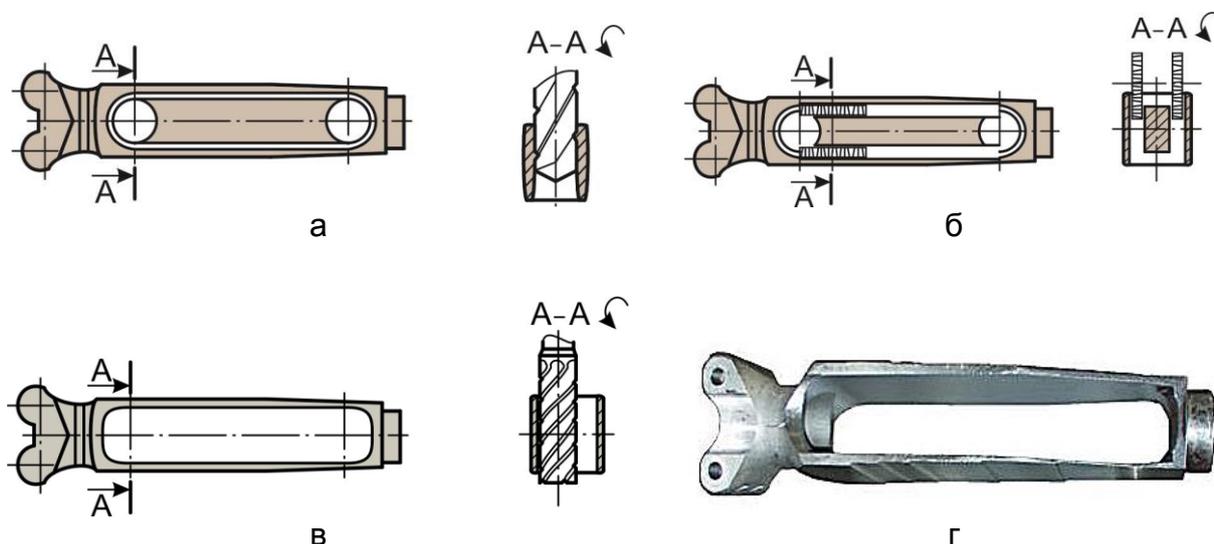


Рис. 11. Схемы обработки заготовки наконечника для операций:
 а – сверлильной; б – горизонтально-фрезерной; в – вертикально-фрезерной;
 г – общий вид заготовки наконечника после обработки проушины и вилки

Фрезерование плоскостей проушины и наружных поверхностей наконечника, а также сверление, зенкерование, развертывание отверстий в вилке вы-

полняют как комплексную позиционно-контурную обработку наконечника за счет наличия у станка с ЧПУ модели МА-655СМ30А магазина инструментов на 30 позиций (рис. 12, а). Плоскости проушины наконечника после шлифования контролируют с помощью специального щупа на контрольно-измерительной машине с ЧПУ (рис. 12, б). Первоисточником для разработки управляющих программ изготовления и контроля является компьютерная модель (рис. 12, в) наконечника металлической лопасти НВ и РВ вертолета (рис. 8, а).

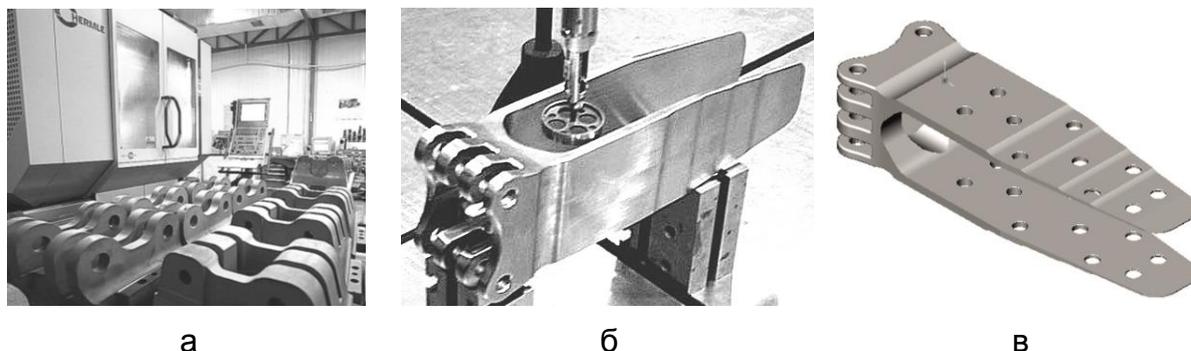


Рис. 12. Обработка на станке с ЧПУ и контроль проушины наконечника по компьютерной модели наконечника лопасти вертолета (Ми-2)

Хроматное пассивирование заготовки наконечника после шлифования проводят гальваническим методом в растворе солей хромовой кислоты, на поверхности заготовки образуется защитная пленка интенсивного желто-золотистого или золотисто-красного цвета (рис. 13).

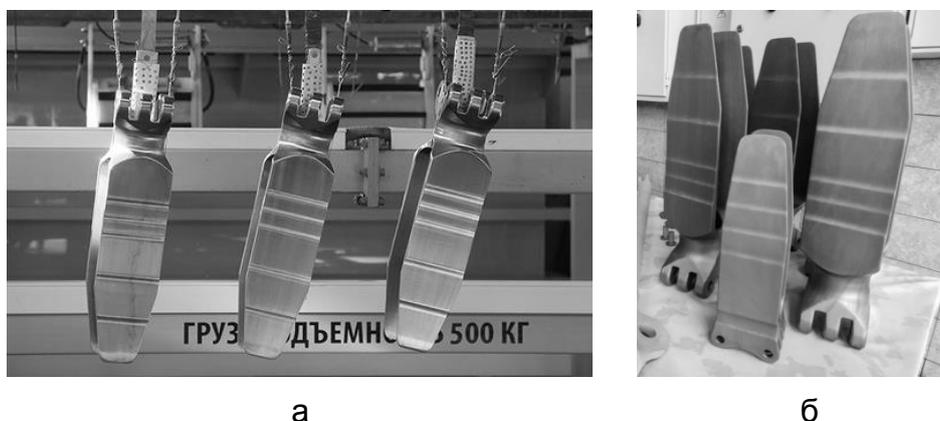


Рис. 13. Наконечники лопасти: а – на штанге гальванической ванны (Ми-8); б – после пассивирования (Ми-8, Ми-2)

Типовой технологический процесс нанесения защитного металлического покрытия на наконечник лопасти включает в себя следующие операции: обезжиривание, декапирование, промывка, кадмирование, осветление, сушка. Кадмирование наконечников лопастей вертолета проводят на автоматизированной линии гальванических ванн (рис.14, а).

Автооператор перемещает штангу с подвешенными наконечниками лопасти (Ми-8) в технологической последовательности расположения гальванических ванн, выдерживая время обработки по режиму каждой операции (рис. 14, б).



Рис. 14. Автоматизированная линия гальванических ванн кадмирования

Качество кадмиевого покрытия контролируют по внешнему виду, толщине и прочности сцепления покрытия с основным металлом наконечника.

Технология поверхностного упрочнения наконечника лопасти

Поверхностное упрочнение путем создания напряжений сжатия, наклепа, благоприятного микрорельефа поверхности повышает по сравнению с механической обработкой выносливость деталей более чем в два раза [9, 10].

Процессы упрочнения наконечника лопасти методами поверхностно-пластического деформирования являются финишными, их осуществляют после механической, термической и чистовой шлифовальной обработки.

Для упрочнения внешней цилиндрической поверхности и галтелей между вилкой и проушинами наконечника лопасти применяют трехроликовый обкатник (рис. 15, а), для внутренней цилиндрической поверхности наконечника – регулируемый роликовый раскатник (рис. 15, б).

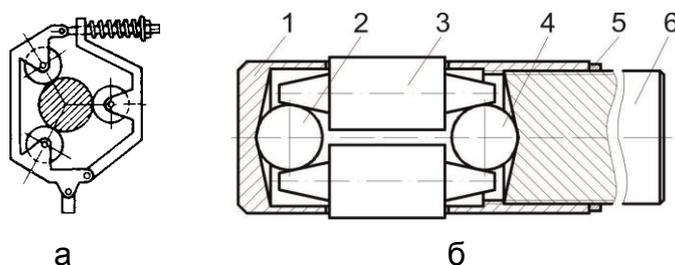


Рис. 15. Схема обкатывания и раскатывания поверхностей наконечника: а – трехроликовый обкатник; б – роликовый раскатник:
1 – сепаратор; 2, 4 – шарик; 3 – ролик; 5 – гайка; 6 – оправка

Процесс вибрационного упрочнения наконечника лопасти является типовым для упрочнения силовых деталей вертолета. Рабочая среда 2 в виде стальных шариков диаметром от 4 до 6 мм и деталь 1, помещенные в контейнер вибрационной установки с ЧПУ (рис. 16, а), совершают механические колебания с ускорениями до 15 g. Под действием этих колебаний частицы рабочей среды приобретают энергию, достаточную для осуществления пластической деформации поверхностного слоя деталей. Для обеспечения равномерности обработки всех поверхностей наконечник закрепляют в специальном поворотном приспособлении (рис. 16, б) вместе с образцами-свидетелями.

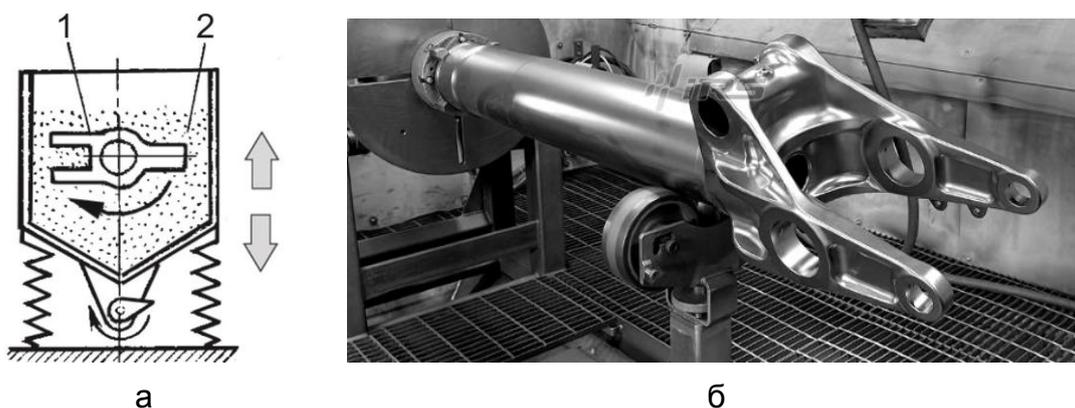


Рис. 16. Процесс вибрационного упрочнения наконечника лопасти

Интенсивность и качество процесса вибрационного упрочнения детали контролируют путем определения деформации стандартных образцов-свидетелей. Образцы-свидетели для всех упрочняемых стальных деталей изготавливают из стали 30ХГСА и обязательно шлифуют [9].

Размеры образцов-свидетелей: длина $L = 100$ мм, ширина $b = 19$ мм для всех материалов, толщина $H = 2.0 \pm 0.1$ мм для алюминиевых сплавов, $H = 1.3 \pm 0.03$ мм для сталей. Прогиб образцов-свидетелей при односторонней упрочняющей обработке стальных деталей должен составлять от 1,6 до 2,0 мм. Схема измерения прогиба образца-свидетеля показана на рис. 17.

Образец-свидетель 2 устанавливают на базовую плоскость плиты 1 упрочненной поверхностью вниз. Измерительный наконечник индикатора часового типа опускают на поверхность образца-свидетеля и обнуляют. Таким образом измеряют толщину H образца-свидетеля.

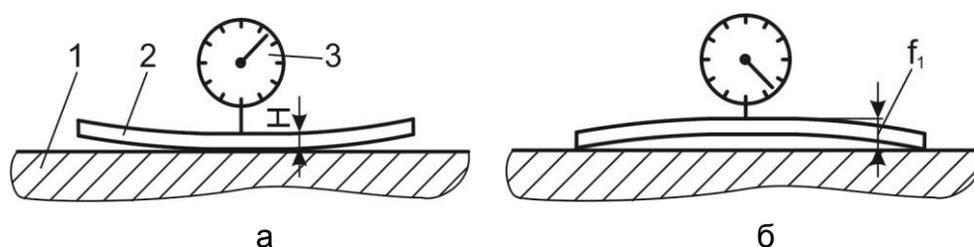


Рис.17. Схема измерения прогиба образца-свидетеля:
а – измерение толщины; б – измерение стрелы прогиба; 1 – образец-свидетель;
2 – плита; 3 – индикатор часового типа

Для измерения стрелы прогиба f_1 образец-свидетель переворачивают обработанной поверхностью вверх. С помощью индикатора часового типа измеряют стрелу прогиба с точностью до $\pm 0,01$ мм. Данные о прогибе образцов-свидетелей вносят в паспорт наконечника лопасти.

Особенности изготовления алюминиевого прессованного лонжерона

Заготовку лонжерона изготавливают на специализированном металлургическом предприятии горячим прессованием двух объемных профилей с последующей диффузионной сваркой (рис. 18, а). На рис. 18, б показан внешний вид прессованной заготовки лонжерона с технологическим припуском.

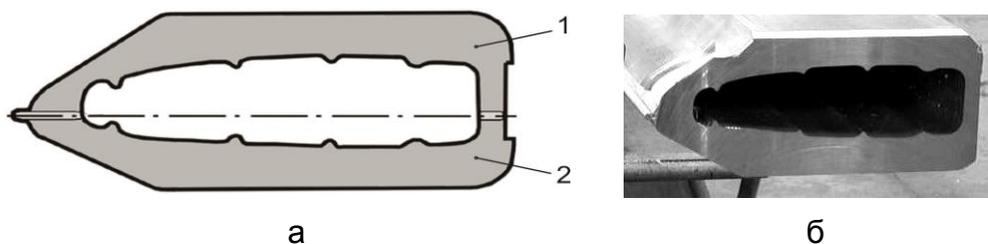


Рис. 18. Прессованная заготовка металлического лонжерона лопасти (Ми-8)

Заготовка лонжерона *D*-образного сечения имеет выступ в носовой части и впадину в зоне задней стенки, которые являются технологическими базами установки заготовки для механической обработки. Внутренняя ребренная полость лонжерона в дальнейшем механически не обрабатывается. Масса заготовки лонжерона для вертолета Ми-8 – 330 кг, ее длина – 10,4 м.

На вертолетном заводе заготовка лонжерона проходит входной контроль на соответствие чертежу и техническим условиям. Внутренняя поверхность подвергается осмотру посредством оптоэлектронного эндоскопа. Для выполнения лабораторного контроля твердости и микроструктуры в зоне диффузионной сварки из торцов заготовки лонжерона вырезают два образца-свидетеля.

Из соображений технологичности наружный контур лонжерона имеет участки с постоянными по длине поперечными сечениями и переходные плавные участки. Это позволяет исключить клиновидность хвостовых отсеков.

Механическую обработку лонжерона лопасти по наружной поверхности проводят на специальном копировально-фрезерном станке модели ПКФ-1 с двумя горизонтальными (для черновой и чистовой обработки) и одной вертикальной фрезерными головками (рис. 19, а). Для обеспечения жесткости заготовку лонжерона дополнительно фиксируют технологическими вкладышами по внутреннему контуру торцов лонжерона (рис. 19, б).

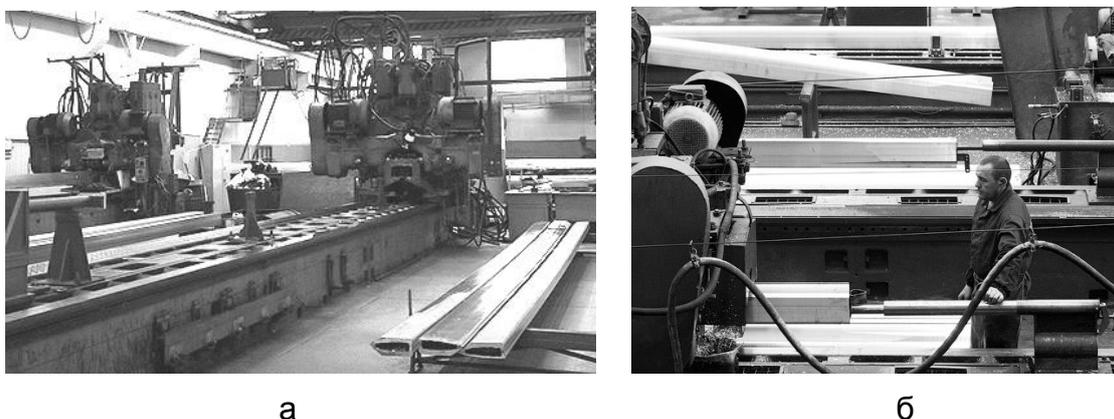


Рис. 19. Специальный копировально-фрезерный станок модели ПКФ-1

Фрезерование наружного контура лонжерона выполняют сборными фасонными фрезами. Наиболее строгие требования предъявляют к точности выдерживания аэродинамического контура лонжерона.

Величины допустимых отклонений толщины стенок лонжерона находятся в пределах от $-0,1$ до $+0,3$ мм в зависимости от их расположения по сечению

лонжерона. Точность выполнения наружного контура лонжерона достигается благодаря геометрии специального набора фасонных фрез.

Собранный фасонный набор фрез и образец обработанной поверхности лонжерона подвергают контролю по следующим параметрам:

- радиальное биение зубьев фрез – не более $\pm 0,05$ мм;
- отклонение профиля обработанного образца лонжерона от теоретического контура в контролируемом сечении – не более $\pm 0,1$ мм.

Фрезерование прессованной заготовки лонжерона по наружной поверхности проводят за четыре технологических прохода: «верх» (рис. 20, а), «низ» (рис. 20, б), «задняя стенка» (рис. 20, в), «носовой скос» (рис. 20, г).

На рис. 20, д показана заготовка лонжерона лопасти вертолета Ми-8 после фрезерования наружной поверхности, которая установлена на поворотный стенд для слесарной доработки обвода ручным пневматическим инструментом.

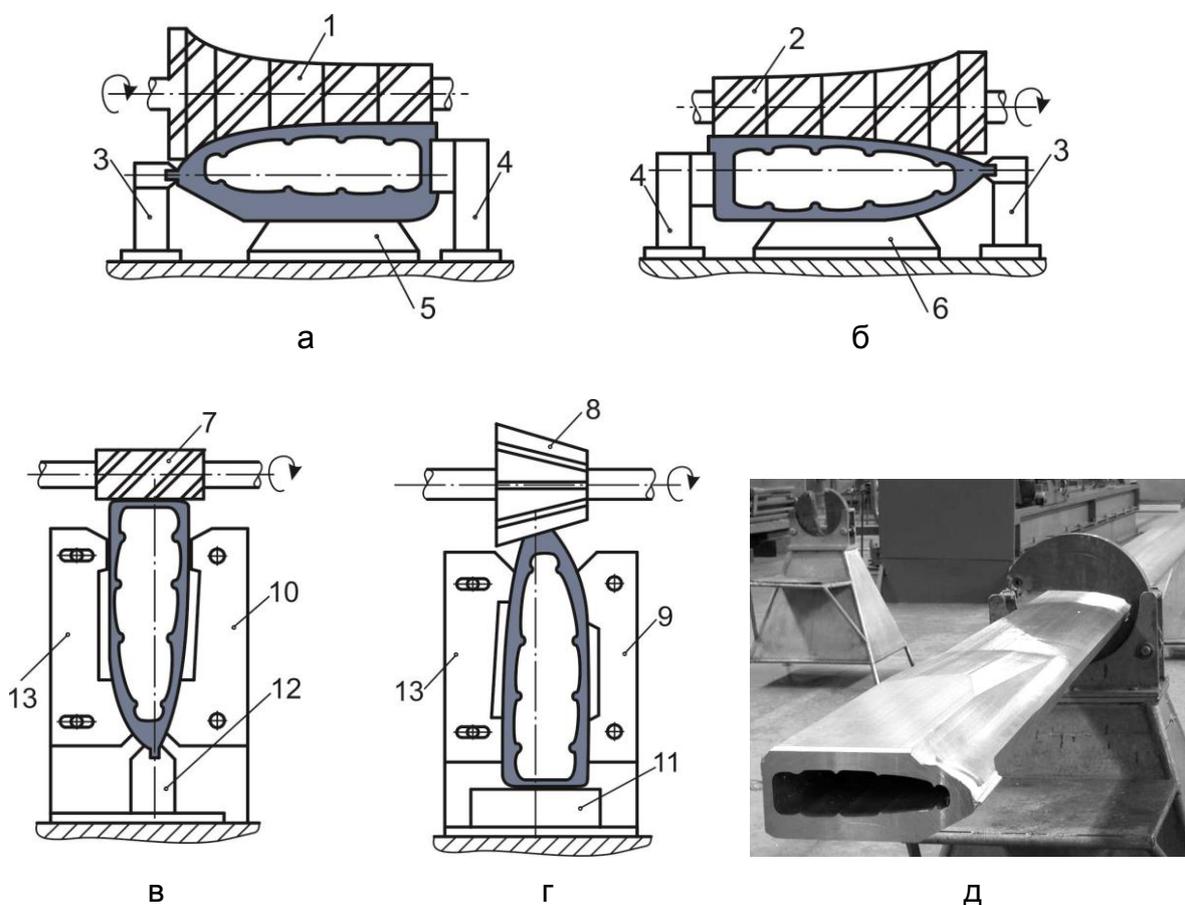


Рис. 20. Схема обработки наружного контура лонжерона (Ми-24):
 1 – фреза фасонная для поверхности «верх»; 2 – фреза фасонная для поверхности «низ»; 3 – стойка-фиксатор носка лонжерона; 4 – стойка-фиксатор задней стенки лонжерона; 7 – фреза цилиндрическая; 8 – фреза угловая;
 5, 6, 9, 10 – ложемент; 11, 12 – опора; 13 – лекало

Слесарная операция удаления следов фрезерной обработки (продольных гребешков, наплывов, рисок) на внешнем обводе лонжерона лопасти является особо ответственной. Лонжерон, установленный на поворотный слесарный стенд (см. рис. 20, д), подвергается ручной доработке высококвалифицирован-

ными слесарями с использованием шаберов, пневматических шлифовальных машинок, специальных фрез.

Для базирования и закрепления заготовки лонжерона на столе копировально-фрезерного станка модели ПКФ-1 служит специальное станочное приспособление, схема которого показана на рис. 21 [8]. Конструкция приспособления позволяет проводить последовательно обработку поверхностей лонжерона «верх» и «низ» путем поворота заготовки на 180° и изменения положения стенки носка и задней стенки лонжерона.

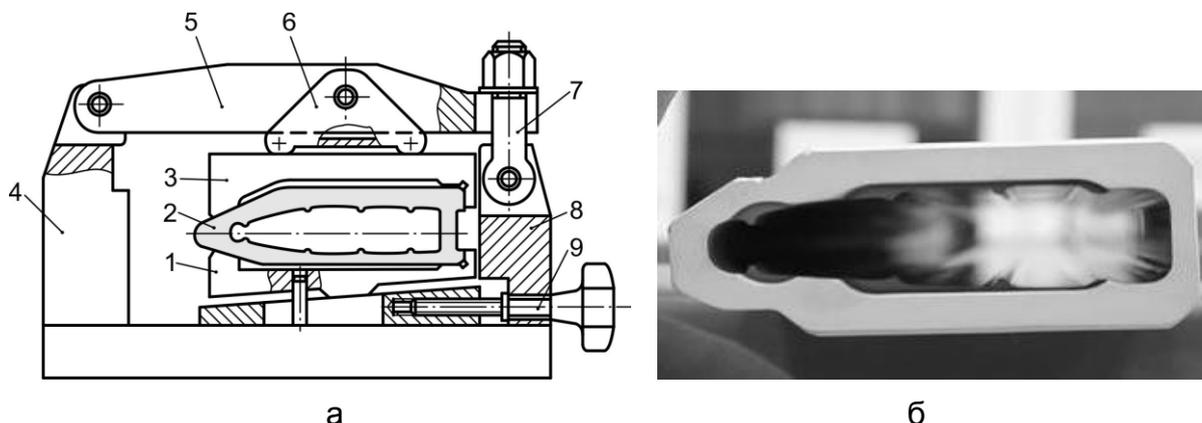


Рис. 21. Специальное станочное приспособление (а) и форма комлевой части лонжерона (Ми- 8) после фрезерования (б): 1 – ложемент; 2 – заготовка лонжерона; 3 – лекало; 4, 8 – стойка; 5 – скоба; 6 – прижим; 7 – болт откидной; 9 – винт регулировочный

После механической обработки все лонжероны подвергают ультразвуковому контролю на сплошность материала.

Точность геометрической формы лонжерона в зависимости от программы выпуска вертолетов контролируют по шаблонам контура сечения или с помощью координатно-измерительных машин. Шаблоны изготавливают методом высокоточной газолазерной резки с предельным отклонением от теоретического контура не более $\pm 0,02$ мм.

Контрольная операция, следующая за фрезерованием контура лонжерона по всей его длине, включает в себя проверку толщины стенок по стороне «верх» и «низ», контура носка в комлевой зоне и других сечениях, неплоскостности задней стенки и ее неперпендикулярности хорде в зоне комля и конца лопасти с помощью шаблонов контура сечения. Допустимый зазор между задней стенкой и шаблоном контура сечения составляет 0,3...0,4 мм для различных зон по длине лонжерона [8].

Одной из ответственных технологических операций является правка для приведения непрямолинейности оси лонжерона в заданные допуски.

Процесс правки может ухудшать механические свойства лонжерона, так как выполняется путем создания локальных пластических деформаций и остаточных напряжений. Операцию правки выполняют на специальной установке с применением охватывающих ложементов, имеющих форму теоретического сечения лонжерона. Допустимые величины и отклонения формы в процессе правки регламентированы техническими условиями.

Особенности геометрической крутки лонжерона лопасти

Лонжерон лопасти вертолета в соответствии с требованиями аэродинамики имеет геометрическую крутку пера по длине. Крутку заготовки лонжерона выполняют в холодном состоянии на установке модели УЗЛ-1 (рис. 22).

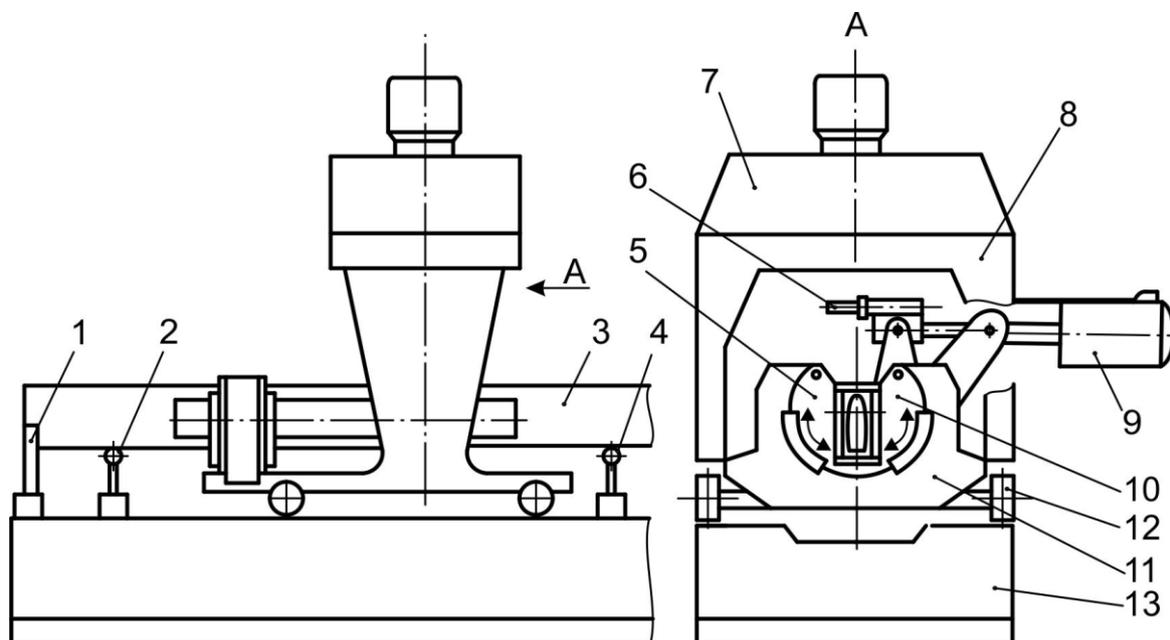


Рис. 22. Схема установки для геометрической крутки лонжерона:
 1 – опора; 2,4 – ролик опорный; 3 – лонжерон; 5,10 – скоба;
 6 – упор регулируемый; 7 – гидростанция; 8 – портал;
 9 – мультипликатор; 11 – ложемент; 12 – каток; 13 – станина

Во внутренний канал заготовки лонжерона 3 вводят наборную оправку, которая удерживается тросовыми растяжками в зоне крутки. Заготовку лонжерона накатывают по роликам на ложементы 11, зажимают силовыми скобами 5 и 10 через гидроцилиндр мультипликатора 9.

Силовые скобы самоориентируются по наружному контуру лонжерона и поворачиваются от силового гидропривода с автоматическим учетом угла пружинения лонжерона после снятия нагрузки.

После перемещения портала 8 на заданный шаг на катках 12 по станине 13 лонжерон фиксируется силовыми скобами, цикл крутки повторяется. Крутку сечений проводят последовательно, постепенно приближаясь к величинам, указанным в теоретическом чертеже на перо лопасти.

Для исключения искажений профиля в зоне приложения крутящего момента во внутренней полости лонжерона размещают жесткую оправку. По завершении геометрической крутки проводят визуальный контроль на отсутствие вмятин, гофров, рисок, царапин, шероховатости наружной поверхности прессованного лонжерона.

Измерение фактических углов крутки пера лонжерона выполняют с помощью оптического квадранта модели КО-1М. На лонжерон в контролируемых сечениях устанавливают приспособление, которое опирается на базовые точки Б, В, Г и запирается под воздействием пружины в точке Д (рис. 23, а).

На рис. 23, а показаны следующие условные обозначения: 1 – корпус;

2 – рычаг; 3 – лонжерон (Ми-24); 4 – винт регулировочный; 5 – квадрант.

На горизонтальную площадку приспособления устанавливают квадрант, по шкале прибора определяют фактический угол закрутки сечения лонжерона и заносят данные в технологический паспорт лонжерона.

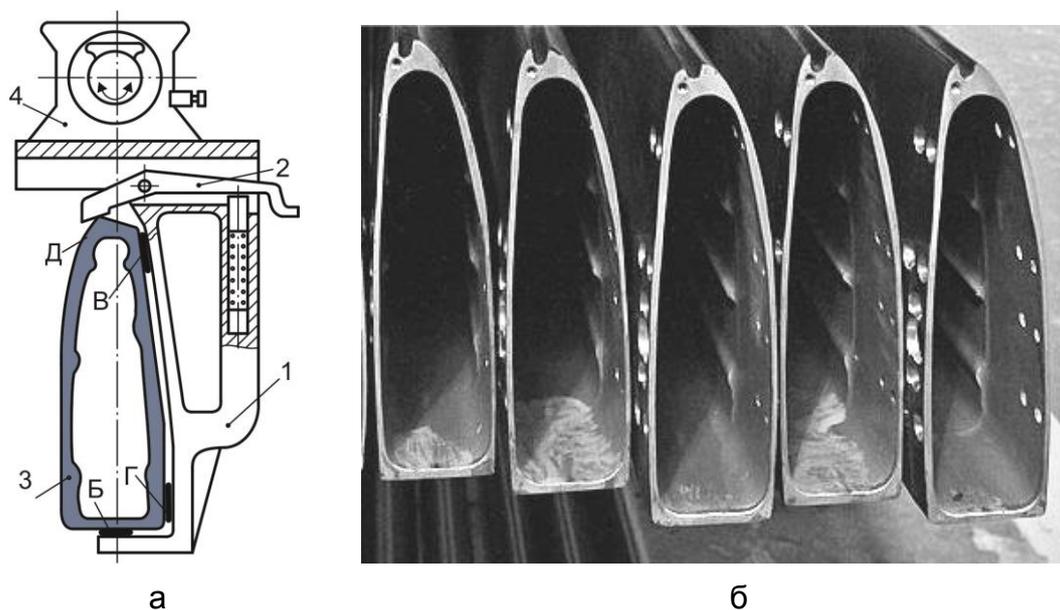


Рис. 23. Приспособление для установки оптического квадранта на лонжерон лопасти (а) и внешний вид лонжеронов (Ми-8) с консольной стороны (б)

Завершающими операциями изготовления лонжерона являются обработка отверстий и фрезерование выборок в комлевой и консольной части для постановки заглушек системы сигнализации повреждения лонжерона, в консольной части – для постановки балансировочных пластин продольной центровки лопасти (рис. 23, б). После комплектования лонжеронов по массе на специальной установке проводят ленточное шлифование наружной поверхности лонжерона. Операция позволяет выявить поверхностные дефекты с помощью измерителя удельной электропроводности контакта. При обнаружении шлаковых включений лонжерон бракуют.

Особенности поверхностного упрочнения лонжерона лопасти

Поверхностное упрочнение лонжерона виброударным методом проводят на специальном однокоординатном вибростенде модели ВСУЛ-1А. Процесс упрочнения осуществляют путем массированного нанесения ударов стальными закаленными шариками диаметром от 4 до 6 мм по внутренней и наружной поверхностям лонжерона, помещенного в контейнер (рис. 24).

На жесткой платформе 1 закреплены регулируемые направленные дебалансные вибраторы 2. Платформа 1 с помощью упругих подвесок 3, 5 установлена на раме 4, закрепленной на фундаменте. Лонжерон 7 помещают в специальный контейнер 8, на подлежащие обработке поверхности насыпают стальные шарики 6. Чтобы шарики не высыпались, торцы контейнера закрывают заглушками. Контейнер с лонжероном и шариками прикрепляют к платформе специальными шпильками 9. Вибраторы 2 синхронно приводятся во вращение электродвигателем постоянного тока. С помощью поверхностной деформации, вы-

званной ударами стальных шариков с амплитудой до 2,5 мм и частотой 20 Гц, поверхностный слой лонжерона приобретает сжимающие напряжения [10].

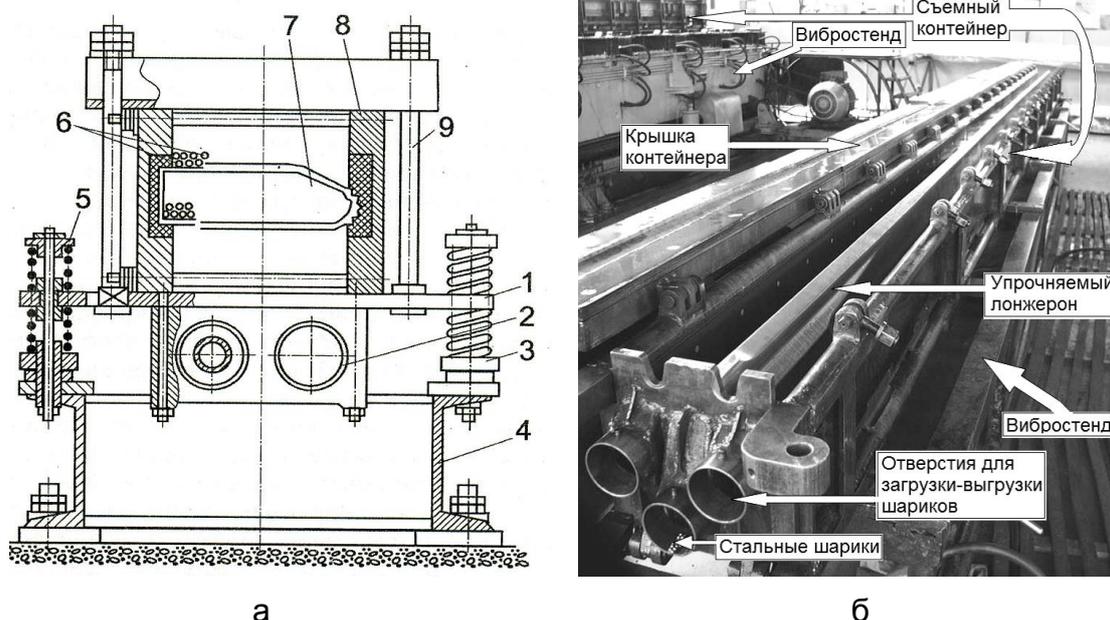


Рис. 24. Схема (а) и общий вид вибростенда модели ВСУЛ-1А (б) для вибрационного упрочнения лонжерона лопасти

В целях обеспечения обработки всех поверхностей лонжерона предусмотрено четыре технологических перехода для упрочнения: носовой части и внутренней поверхности задней стенки; наружной поверхности задней стенки; наружной поверхности нижней дужки и внутренней поверхности верхней дужки; наружной поверхности верхней дужки и внутренней поверхности нижней дужки.

Далее в центральной заводской лаборатории проводят послойное травление материала, контроль деформации образцов-свидетелей для распределения сжимающих остаточных напряжений по глубине пера лонжерона.

Завершающей операцией по изготовлению лонжерона является анодирование в сернокислотном электролите. На рис. 25, а показан этап подготовки партии лонжеронов к анодированию, на рис. 25, б – анодированные лонжероны после снятия с фермы автооператора гальванической ванны.

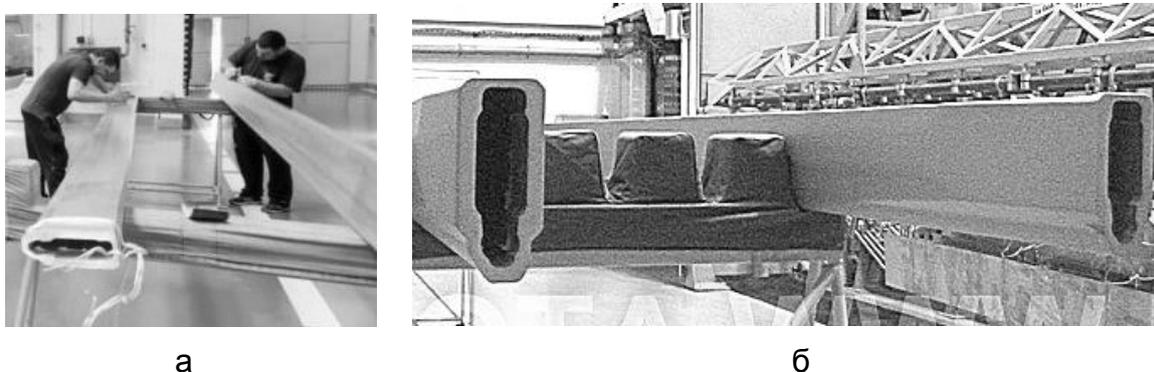


Рис. 25. Подготовка к навешиванию в гальваническую ванну (а) и анодированные лонжероны лопасти НВ вертолета Ми-8 (б)

До и после гальванического анодирования выполняют 100%–ный визуальный контроль состояния наружной поверхности металлического лонжерона с помощью лупы с четырехкратным увеличением.

Особенности сборки металлического лонжерона с наконечником

Сборку лонжерона с наконечником проводят в специальном сборочном приспособлении, оснащённом кондуктором (рис. 26).

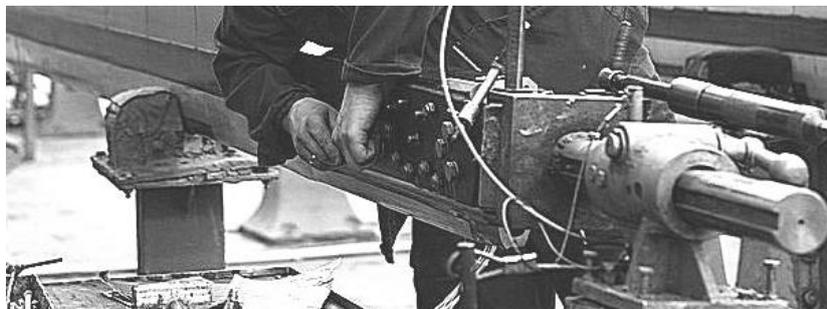


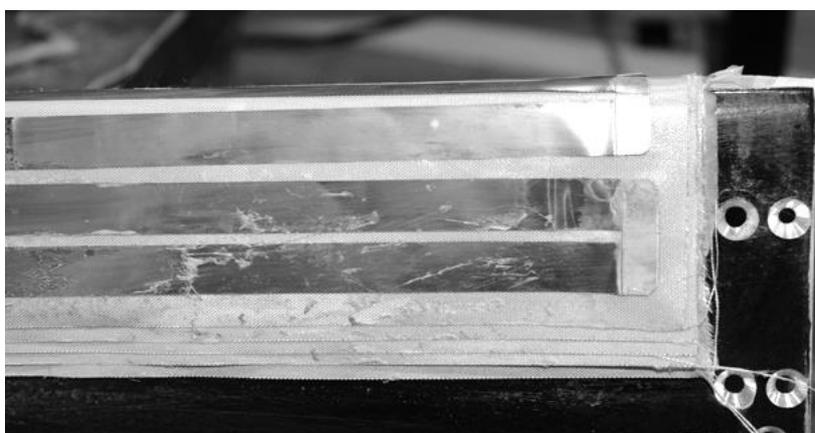
Рис. 26. Кондуктор для разделки отверстий в лонжероне (Ми-8)

Наконечник базируют по стыковым отверстиям в вилке, лонжерон – по плоскостям на комлевой части и аэродинамическому контуру пера лопасти.

На контактные поверхности лонжерона и наконечника после обезжиривания наносят грунтовочный подслои и клеевую плёнку. Порядок постановки болтов крепления наконечника к лонжерону и последующая тарированная затяжка гаек регламентированы техническими условиями сборочного чертежа.

Приклеивание электронагревательной накладки на носок лонжерона

В носке лопасти установлена нагревательная накладка ПОС. Накладка состоит из шести слоев стеклоткани и нагревательного элемента. Нагревательный элемент выполнен из тонких лент нержавеющей стали, расположенных вдоль всей длины лопасти (рис. 27, а). Нагревательный элемент наклеивают на пятый слой стеклоткани, а сверху покрывают одним слоем стеклоткани, пропитанной клеем (рис. 27, б).



а



б

Рис. 27. Приклеивание электронагревательной накладки на носок лонжерона

Электронагревательные накладки расположены между двумя слоями резины. Наружный слой резины одновременно защищает носок лопасти от абразивного изнашивания.

На рис. 28, а показан лонжерон лопасти НВ перед установкой в приспособление для прессового склеивания внутреннего слоя резины и нагревательной накладки на носке лонжерона, а также сборки с наконечником лопасти.

Наконечник лопасти для защиты от механических повреждений при транспортировке и установке в приспособление закрыт кожухом. Этап установки лонжерона в приспособление показан на рис. 28, б.



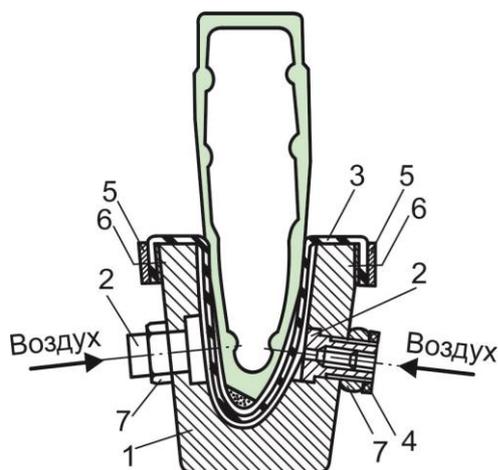
а



б

Рис. 28. Лонжерон перед приклеиванием нагревательной накладки и сборкой с наконечником лопасти (Ми-8)

Приклеивание внутреннего слоя резины и нагревательной накладки на носок лонжерона выполняют в многоместном приспособлении, прижим внутреннего слоя резины и нагревательной накладки к носку лонжерона обеспечивают пневматические камеры (рис. 29, а.). На рис. 29, б показан участок специальных многоместных приспособлений для прессового склеивания внутреннего слоя резины и нагревательной накладки на носке лонжерона, а также для склеивания контактных поверхностей наконечника и лонжерона лопасти.



а



б

Рис. 29. Схема пневматической камеры для приклеивания носка лонжерона:
1 – ложемент; 2 – штуцер подачи воздуха; 3 – резина листовая; 4 – уплотнитель штуцера; 5 – лента прижимная; 6 – винт; 7 – гайка

Лобовая часть лопасти НВ защищена от абразивного износа оковкой из нержавеющей стали. Стальную оковку и наружный слой резины электронагревательной наклейки приклеивают к носку лонжерона пленочным клеем в автоклаве. На рис. 30 показаны технологические этапы подготовки лонжерона к автоклавному приклеиванию наружного слоя резины и металлической оковки к носку лонжерона (Ми-8).



а



б

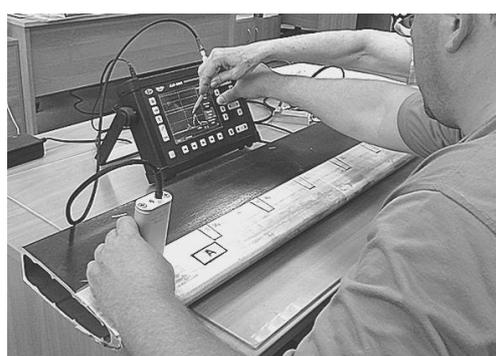
Рис. 30. Подготовка лонжерона к автоклавному приклеиванию:
а – подрезка слоя пленочного клея на носке лонжерона;
б – разметка наружного слоя резины и металлической оковки

После формования носка лонжероны поступают на участок неразрушающего контроля, где проверяют отсутствие непрочлеен и механических повреждений, проводят взвешивание металлических лонжеронов (рис. 31, а).

Центральная заводская лаборатория вертолетного завода выполняет регулярную аттестацию средств неразрушающего контроля для обнаружения технологических дефектов склеивания металлического лонжерона и резинового слоя электронагревательной наклейки ПОС лопасти (рис. 31, б).



а



б

Рис. 31. Неразрушающий контроль лонжеронов (а) и аттестация акустического дефектоскопа АД-60К с помощью эталона носовой части лонжерона (б)

Завершающие операции установки нагревательной наклейки ПОС на носке лонжерона – проверка величины электрического сопротивления нагревательного элемента и электрической прочности изоляции на пробой в нормальных условиях и водной среде [8].

Для обеспечения взаимозаменяемости лопастей по балансировочным характеристикам выполняют контроль лонжерона по весу и статическому моменту относительно оси вращения лопасти. Эти данные заносят в весовой журнал и технологический паспорт для каждого лонжерона. Готовые алюминиевые прессованные лонжероны лопастей НВ и РВ передают на участок окончательной лопастной сборки.

Особенности изготовления металлического хвостового отсека лопасти

Металлический хвостовой отсек лопасти вертолета представляет собой типовую конструкцию с сотовым наполнителем из алюминиевой фольги марки АМг-2-Н толщиной 0,03 мм. Нервюры хвостового отсека изготовлены из листа Д16АТ-л 1,0 методом холодной штамповки. Обшивки хвостового отсека из листа Д16АТ-л 0,5 склеены с сотовым наполнителем, двумя боковыми нервюрами и хвостовым стрингером. Схема изготовления хвостовых отсеков из алюминиевых сплавов для лопастей НВ и РВ вертолета показана на рис. 32.



Рис. 32. Схема изготовления металлического хвостового отсека лопасти

Алюминиевые сотовые блоки изготавливают на специализированных участках в такой типовой технологической последовательности [8]:

– обезжиривание, сушка, люминесцентный контроль рулонной фольги (установка модели УОФ-2);

– обрезка кромок, двухстороннее нанесение клеевых полос, сушка, складывание пакетов (автоматическая установка модели АСП-1000);

- склеивание сотового пакета (пресс модели УСП-70);
- резка пакетов на блоки (ленточнопильный станок модели ЛС-80-3);
- фрезерование сотоблоков (фрезерный станок с ЧПУ модели ФП-17М);
- растяжение сотового блока (станок-автомат модели АРСБ-1);
- фрезерование торцов сотового блока (специализированный фрезерный станок с ЧПУ модели РФП-6);
- обезжиривание сотового заполнителя в перхлорэтилене (конвейерная установка модели УОП-3);
- нанесение жидкого клея на торцы сотового заполнителя (установка модели УНК-2);
- прикатывание пленочного клея ВК-3 на торцы сотового заполнителя (установка модели СПК-1);
- сборка хвостового отсека лопасти (специальное приспособление).

Технология обезжиривания рулонной алюминиевой фольги

Фольга для изготовления алюминиевого сотового заполнителя хвостового отсека лопасти поступает на авиационные предприятия в виде рулонов, намотанных на металлическую втулку, длина фольги в рулоне – 1500 м, масса рулона – 150 кг. Рулоны поступают в законсервированном от коррозии состоянии и имеют жировые загрязнения на поверхности.

Рулонную фольгу обезжиривают в водных растворах эмульгатора ОП-7 с применением ультразвука на установке модели УОФ-2, на которой выполняют промывку фольги и сушку ее с последующим люминесцентным контролем качества обезжиривания.

Схема прохождения рулона фольги через узлы установки обезжиривания показана на рис. 33 [7].

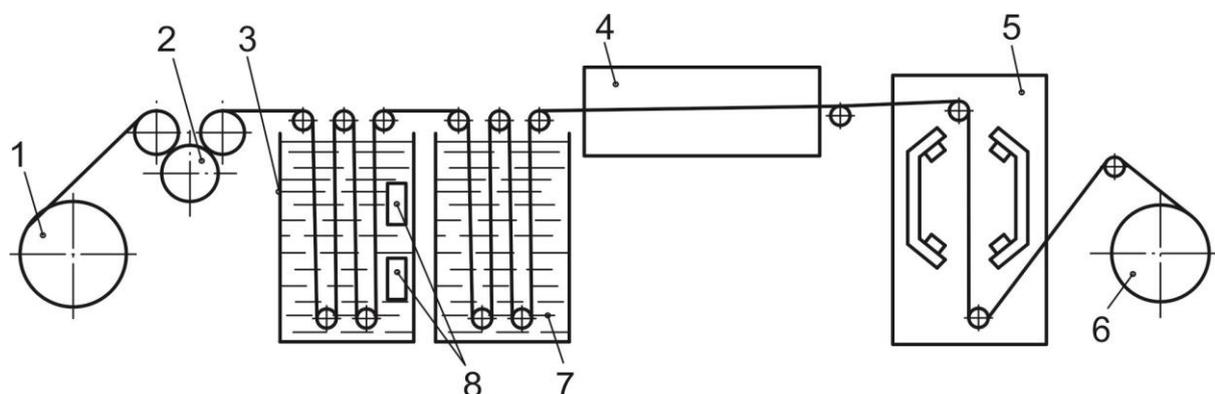


Рис. 33. Схема обезжиривания рулона фольги: 1 – рулонодержатель; 2 – узел натяжения, 3 – ванна обезжиривания, 4 – сушильная камера; 5 – узла контроля качества обезжиривания; 6 – узел намотки; 7 – ванна промывки; 8 – ультразвуковые излучатели

Рулон фольги зажимают конусными втулками рулонодержателя 1 и протягивают через узел натяжения 2, систему ведущих валков ванн обезжиривания 3 и промывки 7, сушильной камеры 4, узла контроля качества обезжиривания 5 на узел намотки обезжиренной фольги 6. Каретки ванн обезжиривания и промывки подняты вверх для обеспечения протяжки фольги по валикам. Ванна обезжиривания оборудована ультразвуковыми излучателями 8.

Заправку фольги в валики установки выполняют после очистки и обезжиривания бензином, а затем спиртом – ректификатором всех поверхностей узлов, соприкасающихся с фольгой.

Все операции обезжиривания рулонной фольги проводятся в автоматическом режиме. Скорость перемещения рулонной фольги – 4 м/мин.

Люминесцентный контроль качества обезжиривания выполняют по ходу движения рулона фольги капельным методом по равномерному растеканию капли дистиллированной воды. Межоперационное время хранения обезжиренного рулона фольги на оправке – не более 10 суток. Длительное хранение рулона – не более трех месяцев в полиэтиленовом мешке с силикагелем.

Особенности изготовления алюминиевых сотовых пакетов

Схема изготовления пакета алюминиевого сотового наполнителя из рулонной фольги показана на рис. 34 [10].

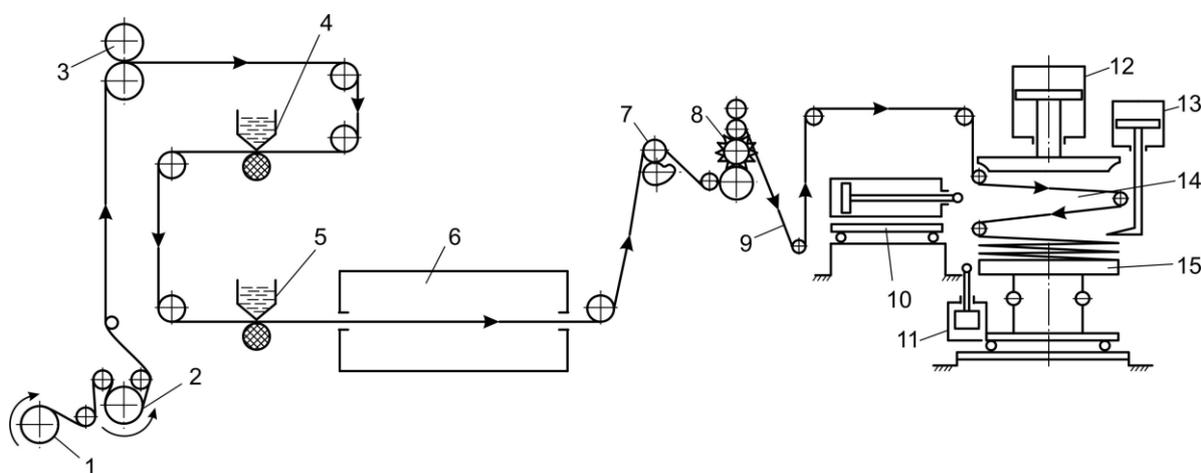


Рис. 34. Схема изготовления пакета алюминиевого сотового наполнителя

На рис. 34 показаны следующие условные обозначения: 1 – рулонодержатель; 2 – узел протягивания и натяжения, 3 – дисковые ножи, 4, 5 – клеянки; 6 – сушильная камера; 7 – вал подвижный; 8 – вал игольчатый; 9 – петля компенсационная; 10 – узел образования складки; 11 – ограничители; 12 – пресс; 13 – прижим; 14 – узел фиксации складки; 15 – стол выдвижной.

Обезжиренный рулон фольги устанавливают на конусные втулки рулонодержателя 1. Фольгу перемещают через валы узлов протягивания, натяжения 2 и торцевания полосы.

Дисковые ножи 3 приводят в рабочее положение, включают отсос воздуха, фольгу пропускают через ножи и концы отходов фольги заправляют в воронки отсасывающего устройства. Далее фольгу протягивают через отключенные клеянки 4 и 5, сушильную камеру 6 и подвижный вал 7, который регулирует поперечное смещение полотна относительно центральной линии автомата.

Дренажные отверстия диаметром 0,1 мм для удаления паров клея пробиваются при прохождении рулона фольги между игольчатым 8 и обрешеченным валами. Смятие заусенцев, пробитых иглками, происходит при дальнейшем перемещении рулонной фольги между следующей парой валов. Затем рулон фольги пропускают через валы компенсационной петли 9 и узла образования складки пакета 10. Край рулона фольги в пакете фиксируют прижимом 13.

Цикл образования одной складки пакета из рулона фольги выполняют в такой технологической последовательности:

- шток узла образования складки 10 перемещается вправо, образуя на рулоне петлю, в которую входят ограничители 11 и фиксаторы узла фиксации складки 14, шток возвращается в исходное положение;
- ограничители и фиксаторы выходят из зоны складывания пакета;
- пресс 12 сплющивает петлю;
- ограничители и фиксаторы входят в зону складывания пакета над сложенной складкой;
- пресс возвращается в исходное положение, пакет до образования следующей петли удерживает прижим.

После образованием первой складки включают клеянки и наносят продольные клеевые полосы на фольгу. Нижние клеевые полосы смещены по отношению к верхним на половину размера сотовой ячейки.

Верхняя и нижняя клеянки соединены с расходными бачками, заполненными клеем ВК-25 в количестве 3 кг. Фольга поджимается к рабочей плоскости клеянок резиновыми прижимами. Пополнение клеянок проводится за счет клея, находящегося в бачках, имеющих вертикальное перемещение за счет пружин. Каждая клеянка пополняется из своего бачка.

Теплоносителем сушильной камеры являются трубчатые электронагреватели, заделанные в плиты, располагающиеся по обе стороны перемещающегося в камере рулона фольги.

Перед узлом образования складки пакета 10 постоянно образуется компенсационная петля 9 (см. рис. 34), которая компенсирует разность скоростей поступательного движения рулона фольги и механизма складывания пакета.

Обрезка кромок алюминиевой фольги, продольное двустороннее нанесение клеевых полос на фольгу, сушка клеевых полос и складывание пакетов проводятся на автоматической установке модели АСП-1000.

Автоматическая установка модели АСП-1000 имеет узлы для выполнения следующих операций:

- установки и протягивания обезжиренного рулона фольги;
- двустороннего продольного нанесения клеевых полос с бачками объемом 3 л для клея ВК-25;
- пробивки в рулоне фольги дренажных отверстий диаметром 0,1 мм игольчатым и обрезиненным валиками;
- сушки рулона фольги с пятью температурными зонами нагрева;
- протягивания и натяжения рулона фольги с цепным приводом, обрезными дисковыми ножами и отсосом воздуха;
- образования складки пакета после компенсационной петли, прижима и фиксации складки;
- прессования пакета фольги прессом с выдвижным столом.

Общий вид автоматической установки модели АСП-1000 для изготовления алюминиевых сотовых пакетов из рулонной фольги показан на рис. 35.

Качество нанесения клеевых полос контролируют один раз в три месяца на контрольном сотовом пакете по следующим показателям:

- разрывы клеевой полосы длиной не более 10 мм допускаются в количестве не более трех штук на один лист пакета (линейка металлическая);
- ширина просушенных клеевых полос должна быть $2,4 \pm 0,3$ мм (микроскоп МПБ-2), толщина – от 0,005 до 0,010 мм (индикатор часового типа).



Рис. 35. Общий вид автоматической установки модели АСП-1000

Технические характеристики установки модели АСП-1000

Размеры изготавливаемого сотового пакета, мм:	
- ширина	990
- высота	400
Наибольшее количество листов в пакете, шт.	300
Толщина фольги, мм	0,03
Ширина фольги, мм	1000
Максимальная скорость перемещения фольги, м/мин	4,0
Потребляемая мощность, кВт	4,9
Габаритные размеры, мм	12500x4090x2100
Масса, кг	24000

Поперечное нанесение клеевых полос осуществляется печатным методом на автоматической установке модели АСП-2000. На автоматической установке модели АСП-2000 можно изготавливать сотовые пакеты с уменьшенным в два раза расходом клея по сравнению с установкой модели АСП-1000. Схема печатания клеевых полос на установке АСП-2000 показана на рис. 36.

Последующее склеивание сотового пакета проводится на прессе модели УСП-70 с нагревательными плитами при давлении 2 МПа и температуре 165 °С в течение одного часа (рис. 37).

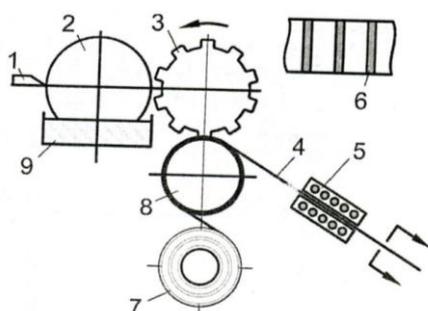


Рис. 36. Схема печатания клеевых полос на установке АСП-2000:
 1 – нож; 2 – подающий валик, 3 – клеенаносящий валик, 8 – прижимной валик;
 4 – фольга; 5 – плита с электрообогревом;
 6 – поперечные клеевые полосы на фольге;
 7 – катушка с фольгой; 9 – ванночка с клеем

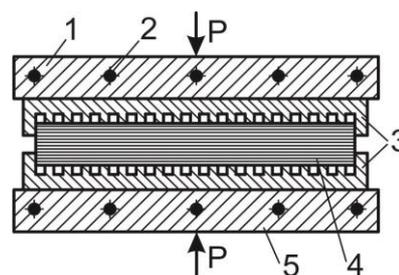


Рис. 37. Схема склеивания сотового пакета: 1 – верхняя плита пресса; 2 – трубчатые электронагреватели, 3 – приспособление гребенчатое, 4 – сотовый пакет; 5 – нижняя плита пресса

После охлаждения под давлением до температуры 25°C из склеенного сотового пакета в зоне технологического припуска вырезают три образца-свидетеля и передают на испытания в центральную заводскую лабораторию.

Пакеты сотовых наполнителей в сжатом состоянии разрезают на ленточнопильном станке модели ЛС-80-3 по копиру с припуском 8 мм по периметру при скорости резания 900 м/мин, минутной подаче 500 мм/мин [11].

Особенности фрезерования торцов алюминиевого сотового наполнителя

Фрезерование пакетов сотовых наполнителей в сжатом состоянии проводят на станке с ЧПУ модели ФП-17М с применением высокоскоростного фрезерного шпинделя. Абсолютная погрешность обработки – не более $\pm 0,05$ мм.

Заготовки алюминиевого сотового наполнителя хвостового отсека лопасти растягивают на автоматическом станке модели АРСБ-1. Сотовый пакет перед растяжением крепят на две каретки станка проволочными захватами через петли из тканевой ленты марки 500. Ленту в виде петель приклеивают к обеим сторонам сотового пакета по всей его длине с помощью рейки, пазы которой задают шаг и размер петель (рис. 38). Схема растяжения сотового блока из пакета показана на рис. 39, рабочая зона станка модели АРСБ-1 – на рис. 40.

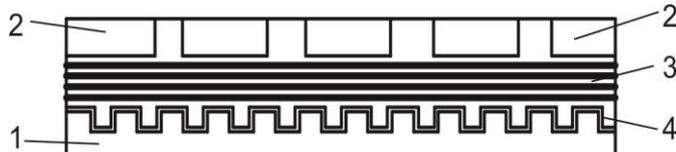


Рис. 38. Схема приклеивания тканевой ленты к сотовому пакету: 1 – рейка; 2 – груз; 3 – сотовый пакет; 4 – лента тканевая

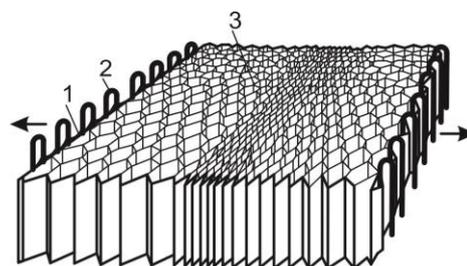


Рис. 39. Схема растяжения сотового блока: 1 – лента тканевая; 2 – проволочные захваты; 3 – сотовый блок



Рис. 40. Рабочая зона автоматического станка модели АРСБ-1

Степень растянутости сотового блока проверяют по количеству шестигранных ячеек – на длине 200 мм их должно быть 50 (+ 5, - 3). Слипшиеся ячейки расправляют вручную шилом.

Сотовые конструкции в виде хвостовых отсеков лопасти вертолета требуют обработки торцов сотовых заполнителей, непосредственно сопрягаемых с элементами аэродинамического обвода лопасти. Данная обработка требует специального подхода при выборе режимов резания, способов базирования и закрепления заготовок, схем фрезерной обработки, конструкции и формы режущего инструмента, средств удаления пыли и стружки из зоны резания.

Фрезерование торцов алюминиевого сотового заполнителя проводят на специальном фрезерном станке с ЧПУ модели РФП-6 (рис. 41, а).

На рис. 41, б показан внешний вид алюминиевого сотового заполнителя хвостового отсека лопасти вертолета Ми-8 после фрезерования торцов.

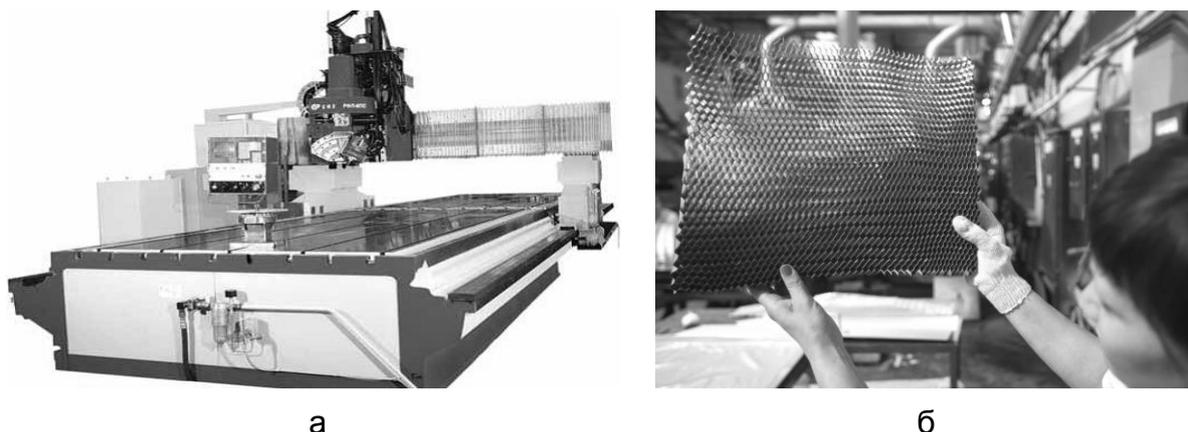


Рис. 41. Специальный станок с ЧПУ модели РФП-6 для фрезерования торцов алюминиевого сотового заполнителя

Технические характеристики фрезерного станка с ЧПУ модели РФП -6

Наибольшее перемещение, мм:	
- продольное X стола	6500
- поперечное Y каретки	1750
- вертикальное Z фрезерной головки	400
Максимальная частота вращения шпинделя, 1/мин	18000
Мощность шпинделя, кВт	7,0
Дискретность задания перемещения, мм	0,001
Количество управляемых одновременно координат	5
Габаритные размеры станка, мм:	
- длина	10365
- ширина	4700
- высота	3280
Масса станка, кг	29000

Компоновка фрезерного станка с ЧПУ модели РФП-6 позволяет вести обработку сотового заполнителя одновременно по пяти координатам:

- X – продольное перемещение портала;
- Y – поперечное перемещение каретки относительно портала;
- Z – вертикальное перемещение каретки относительно портала;
- B – поворот каретки вокруг поперечной оси Y портала на угол $\pm 30^\circ$;
- A – поворот каретки вокруг продольной оси X портала на угол $\pm 135^\circ$.

Алюминиевый сотовый наполнитель по торцу фрезеруют специальными грибковыми фрезами из быстрорежущей стали диаметрами от 12 до 70 мм.

Принятый режим резания торцов сотового блока: частота вращения фрезы – 18000 мин^{-1} , минутная подача – до 3500 мм/мин. Перед обработкой алюминиевый сотовый блок закрепляют на технологической плите, оборудованной системой каналов для циркуляции горячей и холодной воды, с помощью специального легкоплавкого клея – полиэтиленгликоля [11].

Обезжиривание сотового наполнителя, нанесение клея на торцы сот

После механической обработки алюминиевые сотовые наполнители обезжиривают в парообразном и жидком перхлорэтилене на конвейерной установке модели УОП-3 (рис. 42) со скоростью транспортной линии 3,5 м/мин.

Жидкий клей на торцы сотовых наполнителей наносят на установке модели УНК-2. При нанесении жидкого клея на торцах металлической фольги сотового наполнителя образуются галтели, обеспечивающие надежный контакт и прочное соединение сотового наполнителя с обшивкой. Схема нанесения жидкого клея на торцы плоского сотового наполнителя показана на рис. 43.

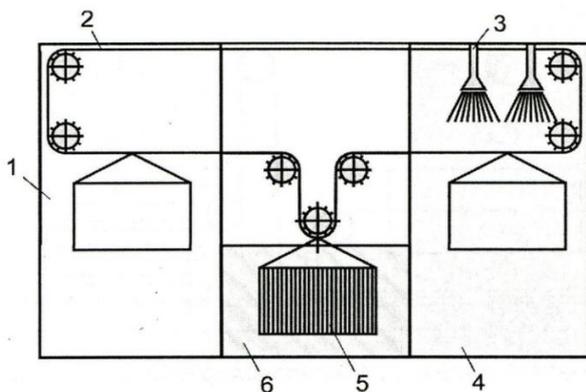


Рис. 42. Схема установки для обезжиривания сотового наполнителя: 1 – сушильная камера; 2 – транспортная линия; 3 – устройство для подачи парообразного перхлорэтилена; 4 – паровая камера обезжиривания; 5 – контейнер с сотовым наполнителем; 6 – камера обезжиривания окутанием

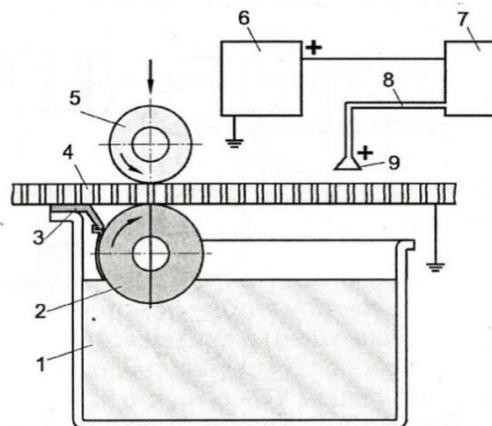


Рис. 43. Схема нанесения жидкого клея на торцы сотового наполнителя: 1 – ванна с клеем; 2 – клеенаносящий валик; 3 – скребок; 4 – сотовый блок; 5 – нажимной валик; 6 – источник высокого напряжения; 7 – емкость с клеем; 8 – дозатор; 9 – центробежный распылитель

Подготовка обшивок и нервюр хвостового отсека к склеиванию

Химическую обработку металлических обшивок и нервюр хвостового отсека лопасти в целях обеспечения высокой адгезии путем удаления жировых и других загрязнений и образования микропористого слоя на поверхности деталей проводят в ваннах и камерах по схеме, показанной на рис. 44.

После подготовки поверхности обшивки и нервюры хвостового отсека анодируют в гальванической ванне модели ВА-1 с размером рабочего пространства $2000 \times 7000 \text{ мм}$ (рис. 45). Толщина анодной пленки при хромовокислом анодировании составляет 5...8 мкм, производительность ванны – до $15 \text{ м}^2/\text{ч}$. После про-

мывки и сушки с помощью прибора модели ТПК-1 проверяют качество анодирования обшивок и нервюр хвостового отсека лопасти.

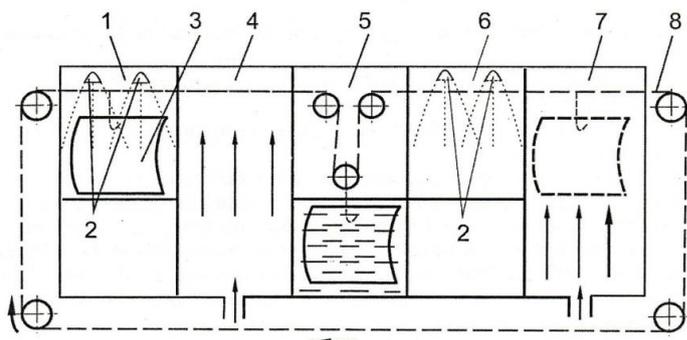


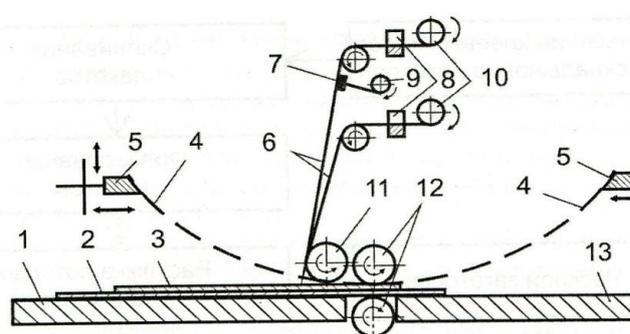
Рис. 44. Схема химической обработки листовых деталей: 1 – камера обезжиривания; 2 – распылитель; 3 – обшивка; 4,7 – сушильная камера; 5 – ванна травления; 6 – камера промывки; 8 – транспортер



Рис. 45. Анодирование металлических обшивок хвостового отсека лопасти вертолета в гальванической ванне (Ми-8)

Затем обшивки и нервюры хвостового отсека покрывают защитным грунтом марки СПМ-102 в электростатическом поле установки модели УГ-1, на которой за час покрываются грунтом до 100 м² площади листов (расход грунта – 50...60 г/м², скорость перемещения распылителей – до 4 м/мин) [11]. После отверждения грунта в сушильной камере контролируют качество нанесения грунта прибором модели ЛКД-1. На покрытые грунтом листы обшивок хвостового отсека наносят клеевую пленку толщиной 0,12 мм по схеме, показанной на рис. 46, а, где 1,13 – стол станка; 2 – технологический лист; 3 – плоская обшивка; 4 – цилиндрическая обшивка; 5 – поддерживающее устройство; 6 – клеевая пленка; 7 – дисковый нож; 8 – устройство для смачивания клеевой пленки; 9 – намоточный валик; 10 – рулоны клеевой пленки и защитного слоя; 11 – выравнивающий валик; 12 – валики для прикатывания клеевой пленки.

На рис. 46, б показан этап прикатывания клеевой пленки на нервюры хвостового отсека (Ми-8), который выполняют вручную резиновым валиком.

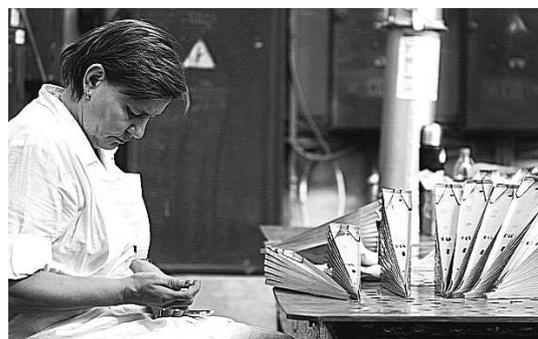


а

б

Рис. 46. Прикатывание клеевой пленки к металлическим обшивкам и нервюрам

Пленку хранят в холодильнике и перед прикатыванием нагревают до комнатной температуры для исключения возможности конденсации влаги на по-



верхность клеевой пленки.

Для прикатывания пленочных клеев к обшивкам и торцам сотовых заполнителей используют станки моделей СПК-1, СПК-2 и СПК-5. Станок модели СПК-5 обеспечивает скорость прикатывания пленки до 4 м/мин на листы обшивок шириной до 2100 мм и длиной до 7200 мм.

Для исключения сморщивания клеевой пленки перед прикатыванием алюминиевый сотовый наполнитель закрепляют на макетных нервюрах каркаса хвостового отсека (рис. 47).



Рис. 47. Закрепление сотового заполнителя на макетных нервюрах каркаса хвостового отсека

В качестве примера на рис. 47 показан сотовый наполнитель из алюминиевой фольги хвостового отсека металлической лопасти НВ вертолета Ми-8.

Особенности сборки металлического хвостового отсека лопасти

Узловую сборку-склеивание металлического хвостового отсека лопасти проводят в специальном механизированном приспособлении (рис. 48).

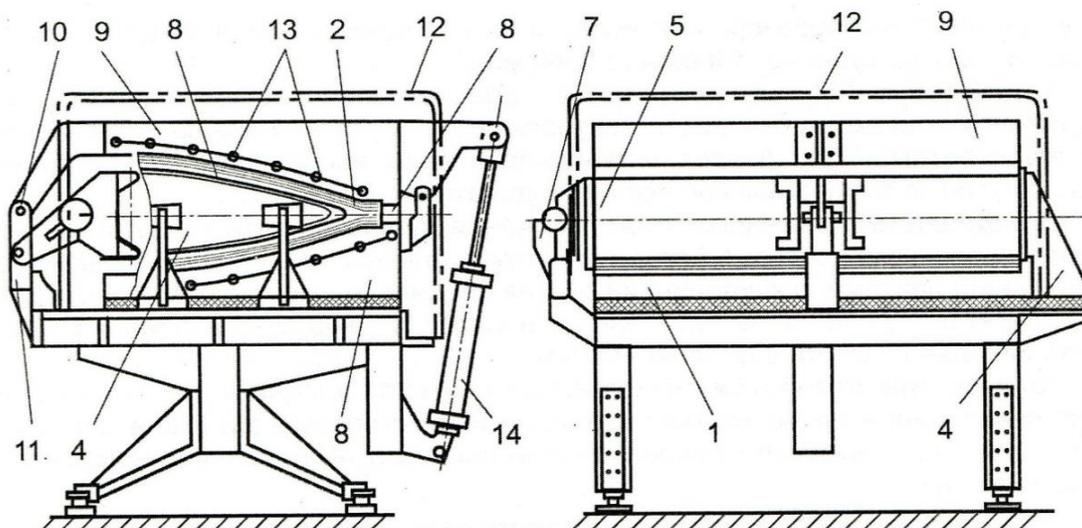


Рис. 48. Схема приспособления для сборки хвостового отсека лопасти

Металлический хвостовой отсек лопасти собирают в такой технологической последовательности [8]:

1. На нижней плите 1 приспособления закрепляют слои асбестовой ткани 2, на которые устанавливают хвостовой стрингер и обшивки хвостового отсека. Обшивки в поперечном направлении упирают в опорную планку 3, в продольном направлении – на торцевую плиту 4.

2. В полость между обшивками устанавливают сотовый наполнитель и нервюры с предварительно нанесенной клеевой пленкой.

3. Нервюры и сотовый наполнитель прижимают технологической плитой 5 к плите 6, закрепляют плиту 5 в рабочее положение фиксатором 7.

4. Устанавливают плиту-крышку 8 со слоями асбестовой ткани.

5. Закрывают плиту 9 с помощью гидроцилиндра 14 и закрепляют её фиксатором 10 в вилке 11.

6. Накрывают приспособление теплоизоляционным кожухом 12. Включают электронагреватели 13 верхней и нижней плит.

7. По окончании процесса склеивания снимают теплоизоляционный кожух 12, открывают верхнюю плиту 9 с помощью гидроцилиндра 14, снимают плиту - крышку 8 и отводят прижимную плиту 5.

8. Вынимают готовый хвостовой отсек лопасти из приспособления.

9. Проверяют качество склеивания хвостового отсека на установке с ЧПУ модели УКН-4П, оснащенной дефектоскопом модели ИАД-3.

10. Герметизируют торцы сотового наполнителя эластомерным герметиком или пенокомпанудом ПЭК-74.

11. Взвешивают и комплектуют отсеки на одну лопасть.

На рис. 49 показан участок комплектования металлических хвостовых отсеков лопасти НВ вертолета Ми-8.

Готовые металлические хвостовые отсеки лопасти для защиты от загрязнений при межоперационной транспортировке упаковывают механизированным способом в полиэтиленовую пленку на установке модели СУ-1 (рис. 50).



Рис. 49. Участок комплектования металлических хвостовых отсеков лопасти НВ вертолета Ми-8

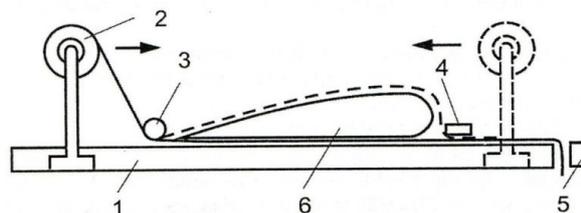


Рис. 50. Схема упаковывания хвостовых отсеков лопасти: 1 – стол; 2 – рулон пленки; 3 – ролик прижимной; 4 – электрод; 5 – планка прижимная; 6 – хвостовой отсек

Установка модели СУ-1 позволяет упаковывать хвостовые отсеки лопасти вертолета с производительностью до 60 м² в час.

Особенности стапельной сборки-склеивания металлической лопасти

На рис. 51, а показана схема секции стапеля для общей сборки металлической лопасти НВ вертолёта Ми-8, которая является типовой для сборочной оснастки в лопадном производстве. На рис. 51, б изображена компьютерная модель компоновки данной секции стапеля.

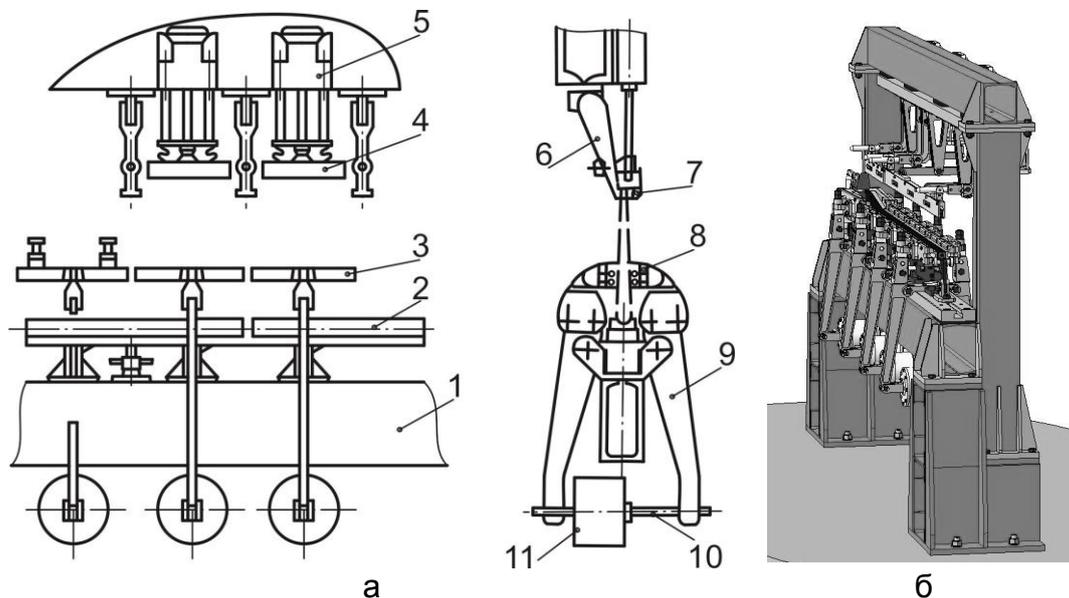


Рис. 51. Схема секции стапеля общей сборки металлической лопасти:

- 1 – рама; 2 – ложемент; 3 – прижим боковой; 4 – прижим верхний;
5 – пневмоцилиндр верхний; 6 – кронштейн; 7 – опора клиновая; 8 – колодка нагревательная; 9 – рычаг; 10 – шток; 11 – пневмоцилиндр нижний

Лонжерон лопасти устанавливают в стапеле на секционные ложементы, фиксирующие его положение в пространстве. Указанные ложементы установлены на нижней балке стапеля. Там же смонтированы пневмоцилиндры для прижима обшивок и фиксаторы дистанции торцевых нервюр хвостовых отсеков лопасти. На верхней балке стапеля установлены пневмоцилиндры для прижима хвостовых отсеков по линии хвостовика лопасти.

Склеивание хвостовых отсеков с лонжероном лопасти в стапеле выполняют по режимам клеевой пленки. Нагрев в процессе склеивания осуществляется электронагревателями в боковых колодках прижимов.

Операция стапельной сборки-склеивания металлической лопасти включает в себя следующие технологические переходы [8]:

1. Подготовка стапеля к выполнению операции сборки-склеивания.
2. Проверка лонжерона и хвостовых отсеков лопасти на отсутствие механических повреждений.
3. Установка лонжерона лопасти на ложементы стапеля с закреплением наконечника лонжерона по отверстиям в фиксаторах стапеля; закрепление концевой части лонжерона прижимом в ложементе. Контроль геометрической кривки торца лонжерона.
4. Комплектование и установка хвостовых отсеков лопасти. Демонтаж хвостовых отсеков и доработка на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ для обеспечения необходимого зазора между отсеками.

5. Раскрой нетканого полотна для армирования жидкого клея, нанесение клея на заднюю стенку лонжерона, прикатывание нетканого полотна к задней стенке лонжерона.

6. Нанесение клея на склеиваемые поверхности хвостовых отсеков.

7. Нанесение двух слоев клея на торцевые нервюры хвостовых отсеков и межотсечные вкладыши с последующей промежуточной выдержкой.

8. Последовательная установка хвостовых отсеков и межотсечных вкладышей. Фиксация хвостовых отсеков проводится верхним прижимом стапеля с помощью пневмоцилиндров.

9. Установка боковых прижимов стапеля в рабочее положение с контролем отсутствия зазоров между отсеками и прижимными элементами стапеля.

10. Приклеивание хвостовых отсеков к лонжерону лопасти при заданном температурном режиме (регламентированы скорость набора температуры, время выдержки и скорость охлаждения).

11. Контроль общей сборки лопасти в стапеле включает в себя проверку:
– положения хвостовых отсеков под давлением со стороны прижимов;
– величины увода хвостовых отсеков по хвостовой кромке от теоретического положения (увод кромки «вниз» не допускается).

12. Выемка металлической лопасти из стапеля и установка ее горизонтально на ложементы.

13. Зачистка излишков выдавившегося клея, осмотр лонжерона и отсеков лопасти на отсутствие механических повреждений.

14. Контрольные операции включают в себя внешний осмотр качества склейки лопасти и отсутствие непроклеев методом простукивания специальным молоточком (рис. 52, а);

15. Контроль геометрических параметров лопасти с помощью координатно-измерительной машины с ЧПУ (рис. 52, б), к которым относятся измерения кривизны лопасти, величины межотсечных зазоров и утяжек хвостовых отсеков.



а



б

Рис. 52. Контрольные операции для металлической лопасти (Ми-8):
а – внешний осмотр качества склейки лопасти и отсутствия непроклеев;
б – контроль геометрических параметров

Протокол измерений на КИМ с указанием отклонений реальной геометрии от заданной чертежом и техническими условиями является частью технологического паспорта металлической лопасти вертолета.

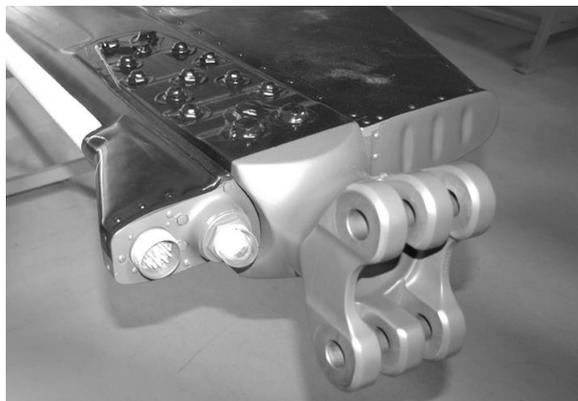
Содержание внестапельных работ для металлической лопасти

Внестапельные работы, завершающие процесс изготовления металлической лопасти вертолета, состоят из следующих технологических операций [8]:

1. Установка и герметизация заглушек на лонжероне, монтаж элементов электрической проводки к габаритному огню, установка обтекателей законцовки (рис. 53, а) и комлевой части лопасти (рис. 53, б).



а



б

Рис. 53. Установка обтекателей на законцовку (Ми-8) и комель лопасти (Ми-24)

2. Герметизация стыка наконечника с лонжероном, подготовка к окраске (рис. 54, а) и нанесение эксплуатационных надписей на лопасть (рис. 54, б).



а



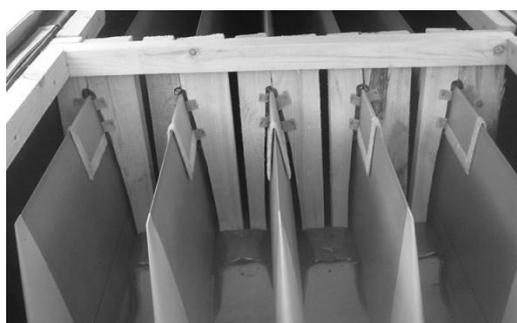
б

Рис. 54. Подготовка к окраске производственной партии лопастей (а) и комель лопасти вертолета Ми-8 после внестапельных работ (б)

3. Монтаж узла и проверка работоспособности контурного огня лопасти.
4. Проверка противообледенительной системы, в том числе:
 - в нормальных условиях (целостность электрической цепи);
 - испытание в ванне с водой;
 - проверка в режиме нагрева до 60...70 °С на поверхности носка в течение 10–15 мин с последующим контролем отсутствия непроклеев и прогаров.
5. Расчет и установка балансировочных грузов. Поперечная центровка лопасти на специальном приспособлении.
6. Взвешивание лопасти с точностью 0,01 кг.
7. Измерение углов свеса и маха лопасти на специальном стенде.
8. Приемочный контроль готовой металлической лопасти и сдача комплектов лопастей представителю заказчика (рис. 55).



а



б

Рис. 55. Готовые лопасти вертолета Ми-8: а – на технологической тележке; б – комплект лопастей на ложементках в грузовом транспортном контейнере

Лопастное производство в силу специфики изделия имеет развитую инфраструктуру технического контроля для проведения квалифицированной, всесторонней и достоверной оценки качества, предупреждения брака и обеспечения профилактического воздействия на процессы возникновения отклонений.

Невозможность количественной характеристики отдельных параметров металлических лопастей (параметры внешнего вида некоторых поверхностей, важных с точки зрения конструктивной прочности, пригодности для последующих технологических операций или требований заказчика), обусловила широкое применение в лопастном производстве контрольных образцов в качестве сравнительных эталонов. Такие контрольные образцы в обязательном порядке утверждаются разработчиком.

К числу специфических для лопастного производства методов технического контроля, необходимых для установления и подтверждения ресурса металлических лопастей, относятся динамические испытания.

При испытании в образцах создаются постоянная растягивающая нагрузка, соответствующая центробежной силе при максимальных оборотах винта, и динамическая изгибающая нагрузка с частотой 15...20 Гц, зависящей от динамических характеристик металлической лопасти [2, 12].

Основные динамические испытания лопастей НВ включают в себя: испытания парных комлевых образцов лопасти в плоскости тяги и плоскости вращения, а также испытания среднего участка лопасти в плоскости тяги [2, 12]. По результатам испытания исследуют характер и зоны разрушения, состояние клеевых соединений и целостности хвостовых отсеков лопасти.

Выводы

1. Металлические лопасти НВ и РВ вертолета независимо от конструкции должны удовлетворять весьма разнообразным и зачастую противоречивым требованиям, которые регламентированы международными правилами.

2. Обязательным этапом проектирования металлических лопастей НВ и РВ является отработка конструкции лопасти на технологичность с учетом обеспечения высокой усталостной прочности силовых элементов лопасти.

3. Качество особо ответственных агрегатов вертолета – лопастей НВ и РВ обеспечивают на этапах конструкторского проектирования, технологической подготовки и собственно лопастного производства.

4. Применение сплавов системы Al-Mg-Si для лонжеронов лопастей вертолетов обусловлено их хорошей прессуемостью, удовлетворительной коррозионной стойкостью и низкой чувствительностью к концентрации напряжений.

5. Прессованные лонжероны металлических лопастей НВ и РВ вертолета большинства зарубежных средних и тяжелых вертолетов имеют D-образное сечение, обеспечивающее наибольшую крутильную жесткость, приходящуюся на единицу веса лопасти.

6. Требуемый аэродинамический профиль металлической лопасти обеспечивается только лишь благодаря фрезерованию наружной поверхности с последующей геометрической круткой лонжерона на специальном технологическом оборудовании. Данная конструкция металлической лопасти НВ и РВ лучше всего подходит для прямоугольной в плане лопасти.

7. Цельнометаллические лопасти клееной конструкции позволяют избежать чрезмерной концентрации напряжений в лопасти и улучшить ее усталостные характеристики.

8. Серийное производство металлических лопастей и клееных конструкций вертолетов по многочисленному ряду конструктивно-технологических особенностей и требований относится к особо ответственному.

9. Одним из технологических путей повышения долговечности металлических лопастей НВ и РВ вертолета является упрочнение силовых деталей лопасти методами поверхностного пластического деформирования.

10. Обеспечение качества при производстве лопастей достигают путем использования технически обоснованных методов объективного контроля параметров технологических процессов, деталей, узлов и готовых лопастей.

11. Наиболее характерными дефектами и причинами их образования при сборке-склеивании наконечника, лонжерона и хвостовых отсеков металлической лопасти являются:

- пониженная прочность клеевого соединения вследствие плохого обезжиривания и неплотной подгонки склеиваемых поверхностей;
- несоблюдение температуры нагрева и времени выдержки под давлением вследствие низкой технологической дисциплины.

12. Все этапы жизненного цикла металлических лопастей НВ и РВ вертолета, как и любого современного изделия авиационной техники, должны быть неразрывно связаны с компьютерными интегрированными технологиями и автоматизированными системами управления.

13. Специфическими методами контроля качества для лопастного производства являются динамические испытания, необходимые для установления и подтверждения ресурса лопасти.

Список литературы

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Деякі питання вітчизняного авіабудування № 429-р від 10.05.2018 р.» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/429-2018-%D1%80>.
2. Дмитрієв, В. А. Методичний підхід до підтвердження заданих ресурсних показників при проведенні державних стендових випробувань лопатей несучого гвинта вертольоту / В. А. Дмитрієв, А. І. Сергієнко // Системи озброєння і військова техніка. – 2019. – № 2(58). – С. 86-91.
3. Далин, В. Н. Конструкция вертолетов: учебник / В. Н. Далин, С. В. Михеев. – М.: МАИ, 2001.– 352 с.
4. Дудник, В. В. Конструкция вертолетов /В. В. Дудник. – Ростов н/Д: Издательский дом ИУИ АП, 2005. – 158 с.
5. Конструирование агрегатов и систем вертолётов: учеб. пособие / К. Ю. Вишняков, В. Н. Доценко, Я. С. Карпов, В. С. Кривцов, Л. И. Лосев, В. И. Рябков, В. А. Урбанович. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 384 с.
6. Данилов, В. А. Вертолет Ми-8 / В. А. Данилов, А. Г. Другов, И. В. Тетерин. – М.: Транспорт, 1979. – 248 с.
7. Интегрированное проектирование винтокрылых летательных аппаратов транспортной категории: учеб. пособие: в 3 ч. /А. Г. Гребеников, Ю. А. Воробьев, П. А. Фомичев и др. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – Ч. 1. – 407 с.
8. Дьяченко, Ю. В. Технология изготовления лопастей вертолетов: учеб. пособие / Ю. В. Дьяченко, В. В. Коллеров, А. Н. Мещеряков. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 54 с.
9. Чучукалов, А. П. Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей / А. П. Чучукалов. – Ростов н / Д: ДГТУ, 2006. – 215 с.
10. Шамшура, С. А. Влияние технологических параметров на остаточные напряжения поверхностного слоя при виброударном упрочнении лонжеронов /С. А. Шамшура // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н / Д, 2004. – №4. – С. 190 – 193.
11. Спеціальні технології, обладнання і оснащення авіаційного виробництва: навч. посіб. / В. В. Коллеров, Ю. В. Д'яченко, В. Т. Сікульський та ін. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2017. – 72 с.
12. Бохоева, Л. А. Разработка стендов для ресурсных испытаний изделий авиационной и другой техники /Л. А. Бохоева, А. В. Перевалов., В.П. Ергонов // Вестн. ВСГУТУ. – 2013. – № 6. – С. 31-35.

Reference

1. The Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine (2018), «Deiaki pytannia vitchyznianoho aviabuduvannia No 429-pvid 10.05.2018 r.» [Some issues of domestic aircraft industry No 429-p dated 10.05.2018], available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/15-2017-%D0%BF (accessed 10 June 2019).
2. Dmytriiev, V.A., Serhiienko, A.I. Methodychnyi pidkhid do pidtverdzhennia zadanykh resursnykh pokaznykiv pry provedenni derzhavnykh stendovykh vyprobuvan lopatei nesuchoho hvynta vertolotu [Methodological approach to confirmation

of resource indicators when carrying out the state stand testing of helicopter main rotor blades] // Systems of Arms and Military Equipment. 2019. no. 2(58). – p. 86-91.

3. Dalin, V.N., Miheev, S.V. Konstruktsiya vertoletov: Uchebnik [The Design of the Helicopters]. Moscow. Moscow Aviation Institute, Publ., 2001. – 352 p.

4. Dudnik, V. V. Konstrukcija vertoletov [Helicopter design]. Rostov n/D, Izdatel'skij dom IUI AP Publ., 2005. – 158 p.

5. Vishnyakov, K. Yu., Dotsenko, V. N., Karpov, Ya. S., Krivtsov, V. S., Losev, L. I., Ryabkov, V. I., Urbanovich, V. A. Konstruirovaniye agregatov i sistem vertolyotov: ucheb. posobie [Design of the Helicopters Units and Systems]. Kharkov. National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Publ., 2005. – 384 p.

6. Danilov, V. A., Drugov, A. G., Teterin, I. V. Vertolet Mi-8 [Mil-8 Helicopter]. Moscow. Transport, Publ., 1979. – 248 p.

7. Grebenikov, A. G., Vorob'ev, Ju. A., Fomichev, P. A. Integrirovannoe proektirovaniye vintokrylyh letatel'nyh apparatov transportnoj kategorii: ucheb. posobie: v 3 ch. [Integrated design of rotary-wing aircraft transport category]. Khakov. Zhukovsky National Aerospace University, Kharkiv Aviation Institute. Publ., 2016, part1. – 407 p.

8. Dyachenko, Yu. V., Kollerov, V. V., Mescheryakov, A. N. Tehnologiya izgotovleniya lopastey vertoletov: ucheb. posobie [The manufacturing technology of helicopter blades]. Khakov. Kharkiv Aviation Institute, Publ., 1992. – 54 p.

9. Chuchukalov, A. P., Primeneniye vibratsionnykh tekhnologiy dlya povysheniya kachestva poverhnosti i ekspluatatsionnykh svoystv detaley [The use of vibration technology for the surface quality and parts operational properties improvement]. Rostov-on-Don. Don State Technical University, Publ., 2006. – 215 p.

10. Shamshura, S. A., Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na ostatochnyye napryazheniya poverhnostnogo sloya pri vibroudarnom uprochnenii lonzheronov [The influence of technological parameters on the residual stresses of the surface layer during vibration-strengthening of the spars]. Voprosyi vibratsionnoy tekhnologii, Mezhevuz. sb. nauch. tr., Rostov-on-Don, 2004, no. 4. – p. 190-193.

11. Special equipment and Technologies in Aviation Production [Electronic resource]: study guide / V. V. Kollerov, Yu. V. Diachenko, V. T. Sikulsky et al. – Kharkiv : National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», 2019. – 71 p.

12. Bokhoeva L. A., Perevalov A. V., Ergonov V. P. Developing of stands for endurance tests of products of aeronautical and other equipment // ESSUTM Bulletin. 2013. no. 6. – p. 31-35.

Поступила в редакцию 21.01.2020, рассмотрена на редколлегии 25.01.2020.

Конструктивно-технологічні особливості металевих лопатей несучого і рульового гвинтів вертольота

Проведено аналіз зарубіжного і вітчизняного досвіду розроблення, виробництва і експлуатації вертольотів з металевими лопатями несучого (НГ) і рульового (РГ) гвинтів. Сформульовано загальні вимоги до конструкції лопатей НГ і РГ вертольота. Розглянуто конструктивно-силову схему металевої лопаті НГ вертольота. Відмічено особливості конструкційних матеріалів для металевих лопатей. Наведено особливості конструкції металевих лопатей НГ і РГ з пресованим лонжероном і алюмінієвим стільниковим заповнювачем. Описано методику параметричного моделювання металевої лопаті НГ вертольота. Наведено

маршрутну технологію виготовлення і методику поверхневого зміцнення наконечника металевої лопати. Наведено схему і маршрутну технологію виготовлення алюмінієвого пресованого лонжерона, розглянуто особливості геометричної крутки, поверхневого зміцнення і складання лонжерона з наконечником лопаті. Показано особливості приклеювання електронагрівальної накладки на носок лонжерона. Розглянуто технологічні етапи виготовлення металевого хвостового відсіку лопаті: знежирення рулонної алюмінієвої фольги; виготовлення алюмінієвих стільникових пакетів; фрезерування торців алюмінієвого стільникового заповнювача. Наведено особливості складання хвостового відсіку лопаті та стапельного складання-склеювання металевої лопаті, дано зміст позастапельних робіт для металевої лопаті НГ вертольота.

Ключові слова: металева лопать, конструктивно-силова схема, наконечник, пресований лонжерон лопаті, алюмінієвий стільниковий заповнювач, складання.

Design and technological features metal blades of the main and tail rotors of a helicopter

Analysis of the foreign and domestic work experience, manufacturing and operation of the helicopters with metal blades of the main (MR) and tail (TR) rotors is performed. General requirements for the helicopter MR and TR blades design are formulated. Structural arrangement of the helicopter MR metal blade is reviewed, features of the construction materials for the metal blades are noted. Features of the MR and TR metal blades design with the pressed spar and aluminum honeycomb core are given. Parametric modeling technique of the helicopter MR metal blade is presented. The manufacturing rout technology and the method of the surface strengthening of the metal blade tip are presented. The scheme and the manufacturing rout technology of the pressed aluminum spar are given; the geometrical twist features, the surface strengthening and the assembling of the spar with the blade tip are reviewed. The features of the electric-heating patch bonding on the spar leading edge are shown. Following technological steps of the blade metal rear area manufacturing are reviewed: the rolled aluminum foil degreasing; the aluminum honeycomb structures manufacturing; the aluminum honeycomb core butt milling. The features of the blade rear area assembling and metal blade assembling by bonding in the jig are presented; the content of works outside of the jig for metal blade of the helicopter main rotor is given.

Keywords: metal blade, structural arrangement, tip, pressed blade spar, aluminum honeycomb core, assembly.

Сведения об авторах:

Гребеников Александр Григорьевич – доктор технических наук, профессор, зав. каф. 103 «Проектирование самолетов и вертолетов» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: agrebenikov@khai.edu

Дьяченко Юрий Вениаминович – кандидат технических наук, доцент, профессор каф. 104 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: yuvd50@gmail.com

Коллеров Вячеслав Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент каф. 104 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: khai134@ukr.net

Малков Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор каф. 103 «Проектирование самолетов и вертолетов» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: i.malkov@khai.edu

Москаленко Николай Иванович – главный конструктор, начальник управления по разработке и модификации вертолетной техники ОКБ «Мотор Сич», Запорожье, Украина,

Урбанович Владимир Антонович – доцент каф. 103 «Проектирование самолетов и вертолетов» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: urb_vl@ukr.net

Воронько Ирина Алексеевна – кандидат технических наук, ст. преподаватель каф. 104 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: iren1986@ukr.net

About the Authors:

Grebenikov Alexander – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Dep. No. 103 “Aircraft and Helicopter Design”, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: agrebenikov@khai.edu

Dyachenko Yuri – Candidate of Technical Sciences, associate professor, Dep. No. 103 “Aircraft and Helicopter Design”, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: yuvd50@gmail.com

Kollerov Vyacheslav – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dep. No. 104, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: khai134@ukr.net

Malkov Igor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dep. No. 103 “Aircraft and Helicopter Design”, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: i.malkov@khai.edu

Moskalenko Nikolay – General Designer, Head of Department for Development and Modification of Helicopter Equipment, Motor Sich Design Bureau, Zaporozhye, Ukraine.

Urbanovich Vladimir – Associate Professor, Dep. No. 103 “Aircraft and Helicopter Design”, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: urb_vl@ukr.net

Voronko Irina – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Dep. No. 104 National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: iren1986@ukr.net