

doi: 10.32620/oikit.2021.93.04

УДК 629.735.45.025-027.3
620.22-419

А. Г. Гребеников, Ю. В. Дьяченко,
В. В. Коллеров, В. Ю. Коцюба,
И. В. Малков, В. А. Урбанович,
И. А. Воронько

Анализ конструктивно-технологических особенностей лопастей несущих винтов тяжелых транспортных вертолетов

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

Проведен анализ конструктивно-технологических особенностей лопастей несущих винтов (НВ) тяжелых транспортных вертолетов. Представлены основные летно-технические характеристики (ЛТХ) тяжелых вертолетов. Сформулированы общие требования к конструкции лопастей НВ вертолета и технические условия на их производство. Рассмотрена конструктивно-силовая схема (КСС) лопасти НВ тяжелого вертолета. Отмечены особенности конструкционных материалов для изготовления лопастей НВ тяжелого транспортного вертолета. Лопасти НВ различают по своей конструкции ввиду различных подходов к материалам, изготовлению и компоновке их элементов. Лопасти НВ цельнометаллической конструкции из конструкторских и технологических соображений разделяют на две группы: каркасные конструкции с трубчатым стальным лонжероном и с алюминиевым прессованным лонжероном. В результате ряда принятых конструктивных и технологических мер ресурс лопасти НВ вертолета Ми-6 был доведен с 50 ч до 1500 ч. Принципиальная особенность стального трубчатого лонжерона лопасти НВ вертолета Ми-26 – отсутствие комлевого наконечника. Приведены особенности конструкции лопастей НВ смешанной конструкции. Представлена методика параметрического моделирования лопасти НВ вертолета. Применение в практике проектирования и конструирования трёхмерных параметрических моделей элементов конструкции 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. Метод параметрического моделирования лопасти НВ транспортного вертолета с помощью компьютерной системы CATIA V5 является модификацией метода интегрированного проектирования элементов авиационных конструкций. 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. Представлен технологический маршрут изготовления лопасти НВ, рассмотрена технология изготовления и поверхностного упрочнения стального трубчатого лонжерона. Описана технология изготовления и формования носовой части лопасти НВ смешанной конструкции. Рассмотрены технологические особенности стапельной сборки-склеивания лопасти НВ, приведено содержание внестапельных работ.

Данные материалы могут быть полезны при проведении теоретических и экспериментальных исследований по продлению ресурса лопастей НВ вертолетов Ми-26, которые в настоящее время эксплуатируются в Украине.

Ключевые слова: лопасть смешанной конструкции, конструктивно-силовая схема, наконечник, стальной трубчатый лонжерон лопасти, стапельная сборка.

Введение

По классификации ИКАО [1] к категории тяжелых вертолетов (взлетная масса свыше 15 тонн) в мировой авиационной технике можно отнести модели

наиболее тяжелых транспортных вертолетов ведущих мировых разработчиков вертолетной техники, показанные на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид тяжелых вертолетов: а – В-12; б – Ми-6; в – Ми-10; г – Ми-10К; д – Ми-26; е – Sikorsky CH-53К; ж – Boeing CH-47Е; з – Sikorsky CH-54

В табл. 1 представлены основные летно-технические характеристики (ЛТХ) этих тяжелых транспортных вертолетов.

Таблица 1

Основные ЛТХ тяжелых транспортных вертолетов

Основные ЛТХ	Модель тяжелого транспортного вертолета							
	В-12	Ми-6	Ми-10	Ми-10К	Ми-26	CH-53К	CH-47E	CH-54
Взлетная масса, т	97,0	39,7	38,0	37,0	49,6	16,6	22,7	17,2
Диаметр несущего винта, м	35,0	35,0	35,0	35,0	32,0	22,0	18,3	21,9
Диаметр рулевого винта, м	–	7,61	6,30		7,61	4,88	–	4,88
Длина, м	37,0	33,2	41,9	32,8	40,0	26,9	15,9	21,5
Высота по втулке НВ, м	12,5	9,2	9,9	7,8	8,2	5,2	5,6	5,7
Крейсерская скорость, км/ч	240		220	228	255	250	259	169
Практическая дальность, км	500	1450	250	770	800	420	1800	370
Статический потолок, м	3500	2250	3000		1800	5100	3090	4750
Полезная нагрузка, т	44	12		11,8	20	3,6	12,3	9,1
Вариант КСС лопасти НВ	1			2		3		
<p><i>Примечание.</i> Введены следующие обозначения различных КСС лопасти НВ: 1 – стальной трубчатый лонжерон, носок и хвостовые отсеки – металлические; 2 – стальной трубчатый лонжерон, носок и хвостовые отсеки – композитные; 3 – контурный алюминиевый прессованный лонжерон, хвостовые отсеки – металлические или композитные</p>								

Анализ данных табл. 1 показывает, что для тяжелых вертолетов с массой более 25 тонн, к которым относится мировой рекордсмен по полезной нагрузке Ми-26 и его предшественник Ми-6, в настоящее время наиболее распростра-

ненным является вариант лопасти НВ смешанной конструкции – стальной трубчатый лонжерон, носок и композитные хвостовые отсеки [1, 2].

Лопасть НВ является наиболее ответственным и нагруженным агрегатом, обеспечивающим создание потребной подъемной и пропульсивной сил для любого вертолета. При выборе КСС лопасти НВ вертолета необходимо определить все конструктивные элементы по их функциональному назначению.

Лопасть НВ независимо от конструкции должна удовлетворять разнообразным и зачастую противоречивым требованиям [1, 2]:

- получению высокого аэродинамического качества при создании подъемной силы;
- обеспечению требований статической прочности: напряжения в лонжероне лопасти под действием центробежных сил в полете и массовых сил на стоянке не должны превышать допустимые напряжения;
- обеспечению необходимого запаса жесткости по флаттеру;
- отсутствию резонансных колебаний;
- получению уровня динамических напряжений, обеспечивающих заданный ресурс лопасти;
- обеспечению достаточной жесткости лопасти на изгиб в плоскостях тяги и вращения, а также на кручение;
- обеспечению статического свеса лопасти на стоянке и угла взмаха в полете (конец лопасти не должен касаться других элементов планера);
- обеспечению невысокой (по ресурсу) стоимости и технологичности изготовления лопасти.

В настоящее время проходит совместные летные испытания модернизированный тяжелый транспортный вертолет Ми-26Т2В (рис. 2, а), который будет готов к серийному производству на заводе «Роствертол» в начале 2022 г. Конструкция и технология изготовления лопастей НВ вертолета Ми-26Т2В (рис. 2, б) по сравнению с серийным вариантом остались неизменными.



а



б

Рис. 2. Внешний вид вертолета Ми-26Т2В (а) и лопасти НВ серийного Ми-26 (б)

В конструкции НВ вертолета Ми-26 использован ряд технических новшеств: втулка выполнена из титанового сплава, обеспечивающего высокую усталостную прочность, а в конструкции лопастей со стальным трубчатым лон-

жероном для изготовления носка и обшивок из ПКМ широко применены высокопрочные стеклопластики, сотовые наполнители из полимерной бумаги и новые высокопрочные клеи. В результате НВ вертолета Ми-26, имея на 40 % меньшую массу, развивал на 30 % большую тягу [1].

При проектировании вертолета Ми-26 большое внимание было уделено выбору оптимальных параметров НВ: спроектированный восьми-лопастный НВ диаметром 28 м позволял получить значительно большую тягу, чем пяти-лопастный НВ диаметром 35 м вертолета Ми-6. Проведенные совместно с ЦАГИ исследования по оптимизации аэродинамической компоновки лопасти НВ обеспечили значительное увеличение коэффициента полезного действия.

По тематике, связанной с изготовлением лопастей НВ вертолета Ми 26, было защищено десять кандидатских диссертаций, получено двадцать семь авторских свидетельств на изобретения [3].

Компоновка вертолета Ми-26 выбрана такой же, как и вертолета Ми-6, однако габариты его меньше, чем Ми-6. Фюзеляж с такими же размерами и массой, как у Ми-6, имеет грузовую кабину, объем которой вдвое больше, чем у Ми-6, и которая рассчитана на перевозку вдвое большего груза, снабжена устройствами, облегчающими загрузку и выгрузку [1].

Вертолет Ми-26 с 1980 г. серийно производится на ОАО «Роствертол», изготовлено свыше 310 вертолетов для гражданского и военного применения.

Помимо Украины и других республик бывшего СССР, вертолеты Ми-26 эксплуатируются в Венесуэле, Индии, Кипре, Мексике, Малайзии, Перу, Северной Корее, Южной Корее и Греции. Кроме того, вертолет Ми-26 активно используется на правах лизинга и на основе программ ООН и Красного Креста.

Целью данной статьи является анализ разработок по проектированию и производству лопастей НВ тяжелых транспортных вертолетов Ми-6 и Ми-26, в том числе научных и учебных материалов, накопленных за многие десятилетия в ХАИ при подготовке авиационных специалистов для ОАО «Роствертол» и ПАО «Мотор Сич».

Конструктивно-силовая схема лопасти НВ тяжелого вертолета

При выборе конструктивно-силовой схемы (КСС) лопасти НВ 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 [1, 2]. Однако компоновка и исполнение этих элементов весьма специфичны, что объясняется особенностями нагружения лопасти вертолета в процессе эксплуатации.

Типовая КСС сечения лопасти НВ вертолета Ми-26 состоит из общей носовой части и отдельных хвостовых отсеков (рис. 3, а). Лопасти смешанной конструкции имеют стальной трубчатый лонжерон, подкрепленный по длине кольцевым слоем полимерного композитного материала (ПКМ). КСС носовой части лопасти НВ вертолета Ми-26 [1, 4] показана на рис. 3, б.

Лопасть тяжелого вертолета Ми-26 со стальным трубчатым лонжероном и хвостовыми отсеками, образующими перо лопасти, имеет прямоугольную форму в плане (рис. 4).

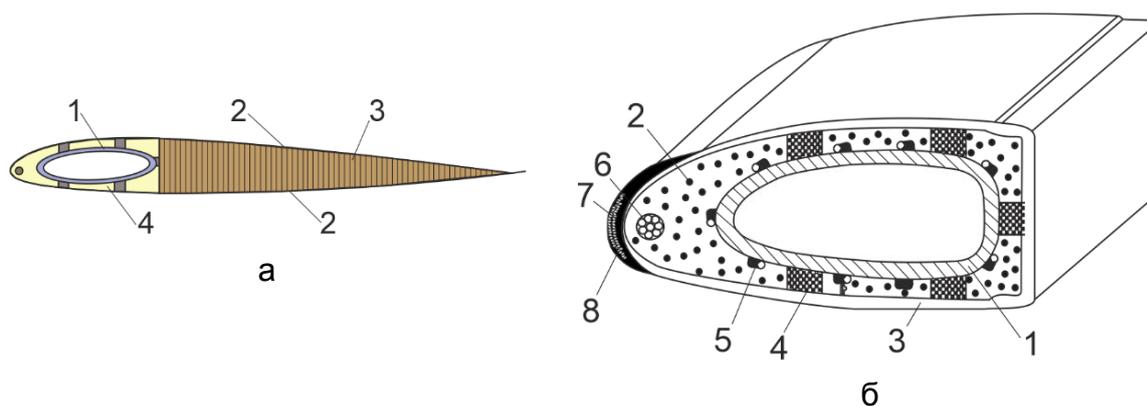


Рис. 3. Типовая КСС сечения лопасти НВ (а): 1 – стальной трубчатый лонжерон; 2 – обшивка из стеклопластика; 3 – сотовый наполнитель из полимерсотопласта; 4 – композитный каркас носка лопасти; КСС носовой части лопасти НВ (б) тяжелого транспортного вертолета Ми-26: 1 – стальной трубчатый лонжерон; 2 – наполнитель из самовспенивающегося пенопласта; 3 – обшивка из стеклопластика; 4 – компенсатор из стеклоткани; 5 – каналы системы обнаружения усталостных трещин в лонжероне; 6 – провода ПОС; 7 – противоабразивная накладка; 8 – нагревательная накладка ПОС

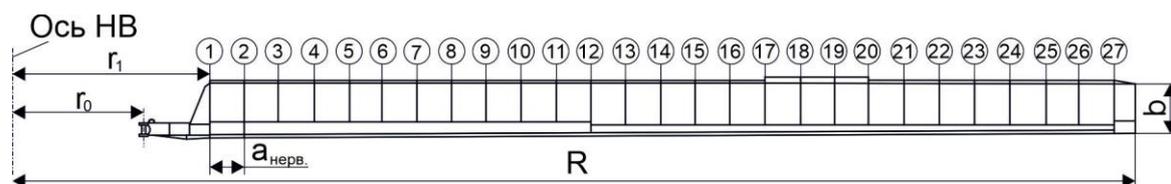


Рис. 4. Схема лопасти НВ со стальным трубчатым лонжероном в плане: 1 – 28 – номера сечений лопасти; r_0 – расстояние от оси НВ до оси наконечника лопасти; r_1 – расстояние от оси НВ до начала пера лопасти; R – длина лопасти; b – ширина (хорда профиля) лопасти; $a_{\text{нerv.}}$ – расстояние между нервюрами

Выбор КСС должен обеспечивать требуемые жесткостные и резонансные характеристики лопасти. В качестве наглядного примера можно привести организацию самостоятельных хвостовых отсеков в залонжеронной 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 [4].

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 [1, 3].

Каждый хвостовой отсек состоит из обшивки, полимерсотопластового наполнителя марки ПСП-1, нервюра, стрингера, усиливающих накладок, закрылков (на отсеках 1 – 16, 20 – 26) и отгибаемых триммерных пластин (на отсеках 17 – 19). Обшивка, стрингер, нервюры изготовлены из стеклопластика. Все детали склеены между собой при помощи высокопрочного клея ВК–32–200.

Закрылки, установленные на отсеках 1 – 16, 20 – 26 предназначены для снижения нагрузок в системе управления НВ; триммерные пластины, установленные на отсеках 17 – 19, предназначены для введения комплекта лопастей в соконусность.

Длина лопасти НВ составляет 14,3 м, хорда лопасти – 0,8 м. НВ тяжелого транспортного вертолета Ми-26 – восьмилопастный, с шарнирным креплением лопастей и гидравлическими демпферами. Лопасти НВ прямоугольной формы в плане имеют усовершенствованные аэродинамические профили с относительной толщиной 0,12 у комля и 0,09 на конце лопасти. Крютка лопасти – от 0° на конце лопасти до 5°28' в комле [1, 3].

В концевой части лопасти расположены балансировочные пластины, предназначенные для подгонки ее статического момента.

Особенности конструкции лопасти НВ вертолета Ми-6

В ОКБ М. Л. Миля при проектировании тяжелого транспортного вертолета Ми-6 применили принципиально новую конструкцию цельнометаллических лопастей НВ. Лопасть НВ состоит из стального трубчатого лонжерона с отдельными секциями каркаса, которые крепились к лонжерону только в одной средней точке. Секции не имели жесткого соединения между собой и поэтому не нагружались при общем изгибе лопасти (рис. 5).

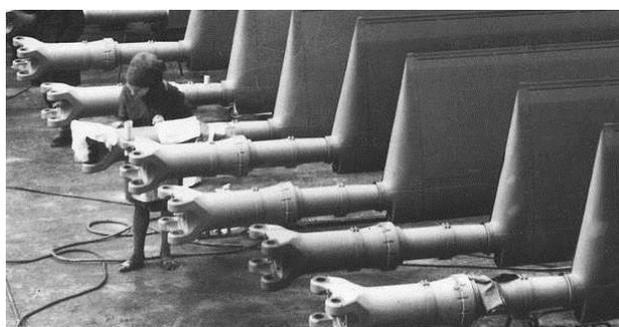


Рис. 5. Общий вид вертолета Ми-6 и лопасти НВ на переднем плане

Система пневматической сигнализации повреждения лонжерона для цельнометаллической лопасти НВ вертолета Ми-6 привела к созданию сложной конструкции соединения комлевого наконечника лопасти (рис. 6, а) с круглой трубой стального лонжерона (рис. 6, б).



а



б

Рис. 6. Общий вид комлевых наконечников (а) и лопастей НВ (б) вертолета Ми-6

Для тяжелого транспортного вертолета Ми-6 отсек цельнометаллической лопасти НВ со стальным трубчатым лонжероном состоит из носовой и хвостовой частей, закрепленных на лонжероне (рис. 7) [1, 3].

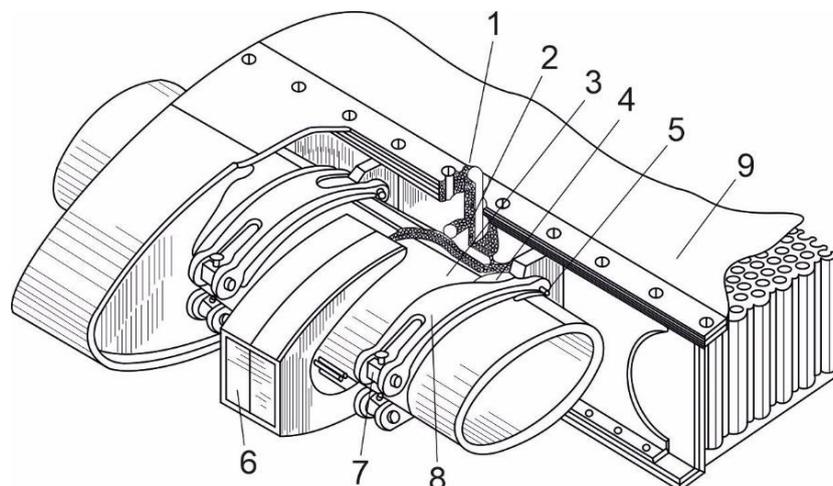


Рис. 7. Схема отсека металлической лопасти НВ со стальным трубчатым лонжероном: 1 – башмак; 2 – цапфа; 3 – труба лонжерона; 4 – хомут; 5 – болт; 6 – пенопластовый блок; 7 – крестовина; 8 – бандажная лента; 9 – хвостовой отсек

Основа носовой части каждого из отсеков лопасти НВ – металлическая обшивка, имеющая подсежку для укладки пакета ПОС. По бокам хвостовой части имеются торцевые нервюры, к которым прикреплены накладки, предназначенные для соединения винтами носовых и хвостовых частей отсеков.

Спереди носовой части приклеен дюралюминиевый башмак с выступающими передними поясами, которые охватывают сзади часть лонжерона и опираются на хомуты, приклеенные к лонжерону (рис. 8, а).



а



б

Рис. 8. Внешний вид носовой части лопасти НВ с трубчатым лонжероном (а) и бандажных лент для крепления хвостовых отсеков к лонжерону (б)

В поясах имеются отверстия под болты для крепления бандажных лент, притягивающих хвостовые части отсеков к лонжерону (рис. 8, б). Ленты воспринимают моменты, действующие на отсек. Для крепления хвостовых частей отсеков к лонжерону использованы стальные цапфы, которые закреплены с помощью клея и притянуты двумя хомутами.

В местах расположения башмаков и хомутов (см. рис. 8, б) на трубе лонжерона зафиксированы с помощью клея пенопластовые блоки, на внешней стороне которых расположен металлический носок лопасти (рис. 9).



Рис. 9. Внешний вид пенопластового блока между лонжероном и носком

Хвостовой отсек лопасти включает в себя алюминиевую стенку корытообразного сечения, к которой присоединены путем склеивания обшивка, торцевые нервюры и сотовый наполнитель из алюминиевой фольги (рис. 10).



Рис. 10. Внешний вид хвостового отсека со стороны трубчатого лонжерона

Сотовый наполнитель клиновидной формы каждого из отсеков придает жесткость хвостовой части отсека. Это позволяет воспринимать и передавать на лонжерон центробежные и перерезывающие силы [5].

Использование в конструкции отдельных секций позволяет в производстве легко обеспечить крутку лопасти, а в случае повреждения одной из секции заменить ее, не заменяя всей лопасти [5, 6].

Особенности конструкции лопасти НВ вертолета Ми-26

Принципиальная особенность стального трубчатого лонжерона лопасти НВ вертолета Ми-26 – отсутствие комлевого наконечника (рис. 11). Весь лонжерон, включая проушины комлевого стыка, изготовлен как единое целое. Отсутствие комлевого наконечника и, соответственно, неизбежной концентрации напряжений в местах его крепления позволило существенно увеличить ресурс по условиям выносливости, а также уменьшить массу лопасти.

Схема лопасти НВ вертолета Ми-26 показана на рис. 12 [1, 2, 6].

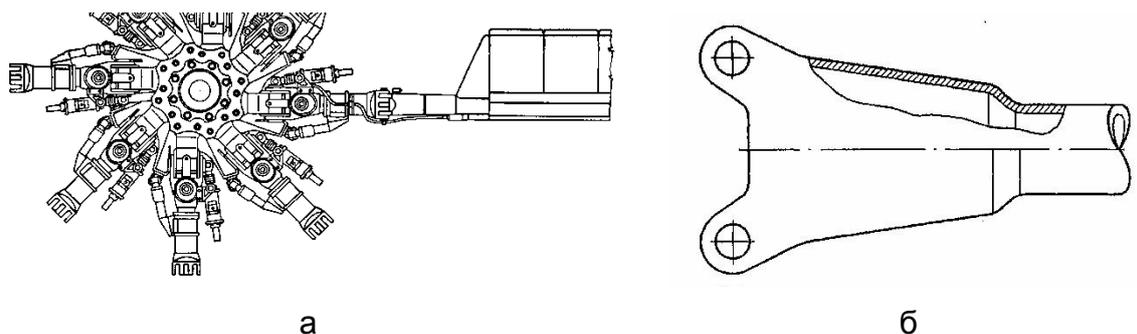


Рис. 11. Схемы втулки (а) и стыковочного узла (б) лопасти НВ (Ми-26)

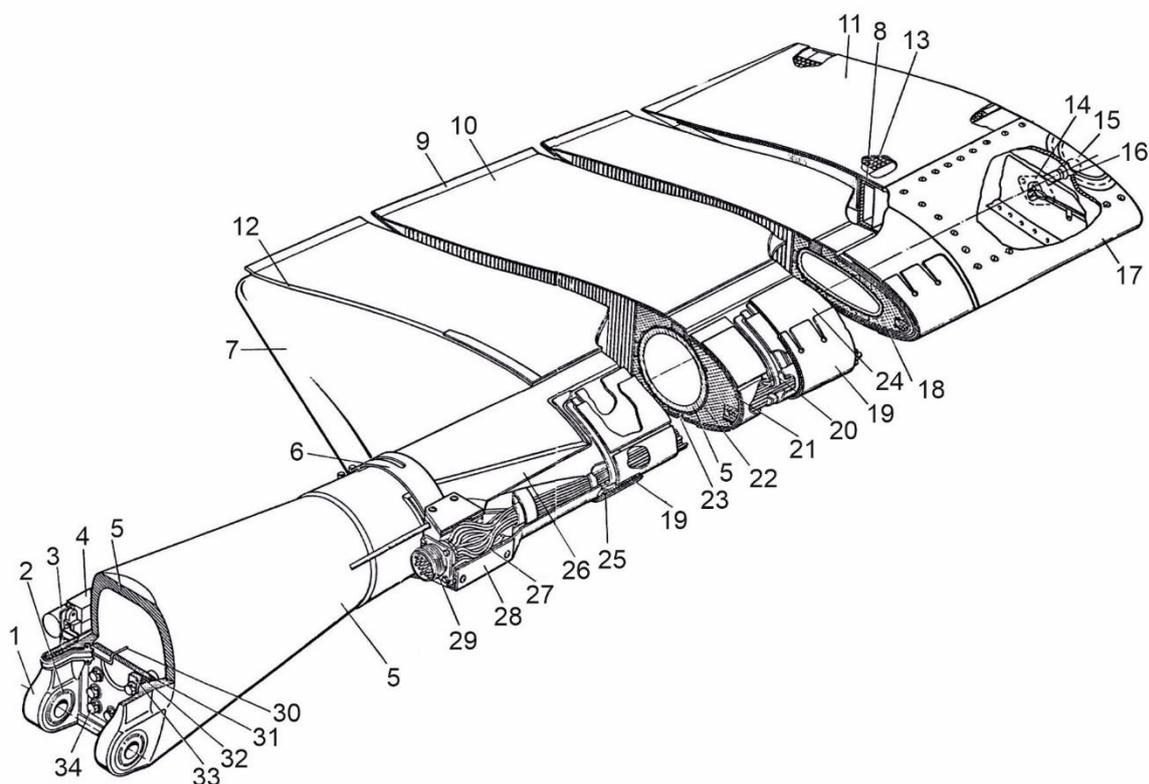


Рис. 12. Схема лопасти НВ с трубчатым лонжероном:

- 1 – проушина; 2 – разрезная втулка; 3 – сигнализатор давления; 4 – механизм проверки исправности сигнализатора; 5 – лонжерон; 6 – хомут крепления комлевого обтекателя; 7 – хвостовая часть комлевого обтекателя; 8 – профиль; 9 – пластина; 10 – хвостовой отсек лопасти; 11 – хвостовая часть законцовки; 12 – межотсечный вкладыш; 13 – сотовый наполнитель; 14 – кронштейн; 15 – стекло; 16 – лампа контурного огня; 17 – носовая часть законцовки; 18 – облицовка; 19 – оковка титановая; 20 – шина нагревательного элемента; 21 – пенопластовый наполнитель; 22 – воздухопроводящий канал; 23 – компенсатор; 24 – нагревательная накладка; 25 – ПОС; 26 – носовая часть комлевого обтекателя; 27 – провода; 28 – съемная крышка; 29 – штепсельный разъем; 30 – трубка подачи воздуха внутрь лонжерона; 31 – заглушка; 32 – уплотнение; 33 – основание; 34 – стяжной болт

Контруктивно лопасть НВ с трубчатым лонжероном состоит из носовой части, содержащей лонжерон 5, двадцать шесть хвостовых отсеков 10, комлевые 7 и 26 обтекатели, носовые 17 и хвостовые 11 части законцовки, ПОС 25, системы обнаружения повреждения лонжерона и узла для статической балансировки лопасти.

Основным силовым элементом лопасти НВ вертолета Ми-26 является стальной трубчатый лонжерон 5 переменного по длине сечения. Проушины 1 крепления к втулке НВ выполнены как единое целое с комлевым участком лонжерона. На лонжероне крепится каркас, состоящий из носовой части, изготовленной по профилю носовой части лопасти, двадцати шести хвостовых отсеков, комлевых обтекателей, законцовки, узлов балансировки и швартовки.

Для предохранения стыковочных отверстий комлевой части трубы, предназначенных для крепления лопасти к втулке НВ, по их внутреннему диаметру приклеены стальные разрезные втулки 2, состоящие из четырех секторов, а по наружным поверхностям проушин трубы приклеены стальные шайбы, предохраняющие отверстия и плоскости проушин от фреттинг-коррозии.

Для вертолета Ми-26 носовая часть, изготовленная по форме профиля лопасти, состоит из лонжерона 5 (см. рис. 12), пенопластового заполнителя 21 и пакета ПОС 25. Стеклопластиковый компенсатор 23 является промежуточным звеном, передающим нагрузку с каркаса лопасти на лонжерон, и представляет собой монолитную многослойную стеклопластиковую ленту из листов стеклоткани. Все стеклопластиковые элементы конструкции набраны из листов ткани марки Т-10-80, пропитаны связующим составом ЭДТ-10П и после опрессовки представляют собой монолитные детали.

В комлевой части лопасти установлен сигнализатор давления воздуха 3, предназначенный для сигнализации о повреждении лонжерона в процессе эксплуатации лопасти. Каждый хвостовой отсек 10 лопасти состоит из стеклопластиковых обшивки и нервюр, титановых накладок, сотового заполнителя из фольги, пластин 9 (на отсеках 1 – 16 и 20 – 26), закрылков (на отсеках 17 – 19). Все детали склеены между собой при помощи высокопрочного клея.

На хвостовых отсеках 1 – 16 и 20 – 26 в целях уменьшения шарнирного момента лопасти и соответственно усилий в системе управления несущим винтом установлены на клею дюралевые пластины 9. Между отсеками имеются зазоры, которые обеспечивают возможность разворота отсеков относительно друг друга при изгибе лонжерона. Для предотвращения перетекания воздуха между отсеками установлены межотсечные вкладыши 12.

Закрылки на отсеках 17 – 19 предназначены для введения лопастей в соконусность. В концевой части лопасти расположены балансировочные пластины, предназначенные для подгонки лопастей в комплект по статическому моменту, и лампа контурного огня 16.

Лопасть НВ вертолета Ми-26 снабжена электротепловой ПОС 25, состоящей из шести нагревательных пакетов, наклеенных в специально выполненную подсечку в носке лопасти. Каждый нагревательный пакет представляет собой самостоятельную секцию ПОС. Питание нагревателей ПОС осуществляется переменным трехфазным током напряжением 200 В через штепсельный разъем 29, установленный в комлевой части лопасти. Питание лампы контурного огня осуществляется также переменным током через трансформатор, понижающий напряжение до 7,5 В. К штепсельному разъему 29 присоединены провода 27, проложенные в носке лопасти.

На передней кромке лопасти установлена (см. рис. 12) титановая оковка 19 из листового титанового сплава ОТ-4-1, предназначенная для защиты передней кромки носовой части лопасти от абразивного износа. Из технологических соображений оковка изготавливается из отдельных полос длиной по 500 мм, соединяющихся по размаху лопасти встык. К носовой части лопасти титановая оковка приклеивается высокопрочным клеем. Во избежание включения оковки в изгиб лопасти при ее работе по краям полос сделаны поперечные прорезы, в результате чего оковка представляет собой ряд лепестков, соединенных узкими перемычками (рис. 13).

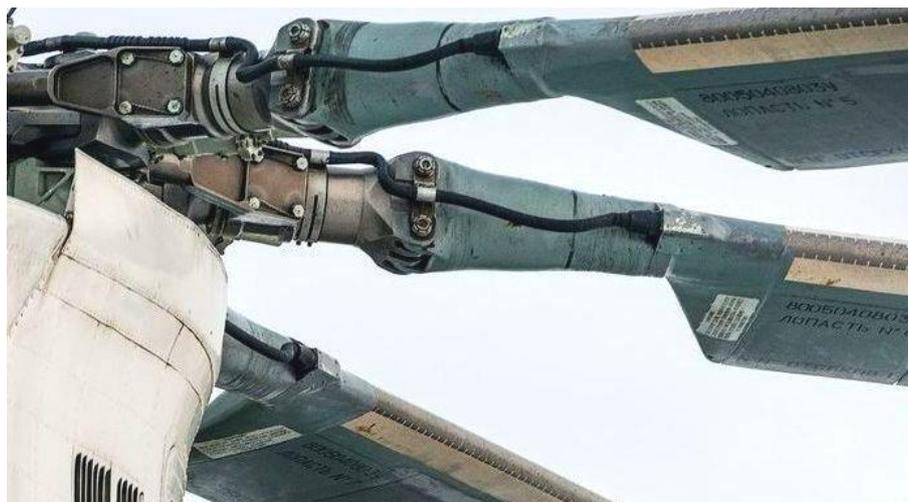


Рис. 13. Титановая оковка для защиты передней кромки носовой части лопасти НВ от абразивного износа (Ми-26)

Для предохранения отверстий проушин от забоин по внутреннему диаметру этих отверстий приклеены разрезные титановые втулки, а по торцам проушин – шайбы, которые являются «жертвенными» деталями. При снятии или установке лопасти НВ на вертолет разрезные втулки принимают на себя удары при монтаже и повреждения, предохраняя основную поверхность стыковочных отверстий, что способствует повышению надежности и ресурса (рис. 14).

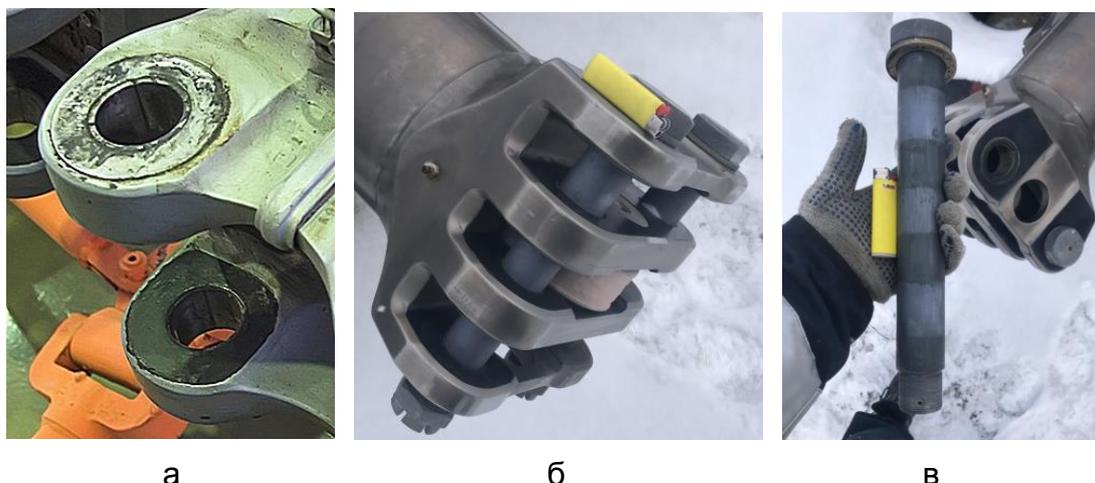


Рис. 14. Внешний вид втулки с шайбами на проушине комлевого стыка лонжерона (а) и болтового соединения лопастей на втулке НВ (б, в)

Методика параметрического моделирования 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 [6].

Исходными параметрами для создания ТПМЭК лопасти НВ вертолета являются:

- радиус лопасти R , хорда лопасти $b_{\text{корн}}$, сужение лопасти η ;
- геометрическая крутка лопасти;
- тип законцовки и её геометрические параметры;
- тип захвата лопасти и его геометрические параметры;
- тип ПОС и её геометрические параметры;
- тип защиты лопасти от аэроабразивного износа и его геометрические параметры;
- тип системы сигнализации повреждения лонжерона и его геометрические параметры;
- количество и геометрические параметры крепёжных элементов;
- расстояние между нервюрами хвостовых отсеков и их геометрические параметры.

Параметрическая мастер-геометрия лопасти НВ представляет собой линейчатую поверхность, созданную на основе базовых профилей (рис. 15, а). Она описывает все точки, лежащие на поверхности лопасти, и является основой для разработки модели распределения внутреннего пространства (рис. 15, б) и создания модели полного определения лопасти НВ.

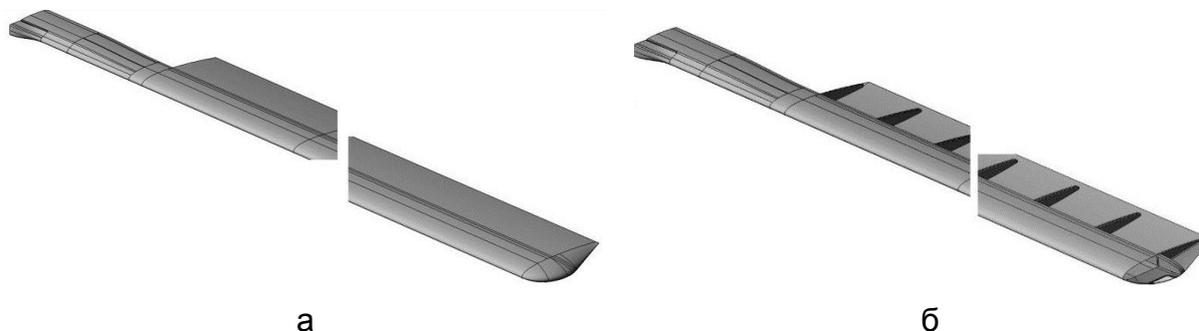


Рис. 15. Фрагменты мастер-геометрии (а) и модели распределения внутреннего пространства (б) лопасти НВ

Процесс создания мастер-геометрии лопасти НВ вертолета обычно разделяют на следующие этапы:

1. Разработка математической модели лопасти НВ.
2. Создание модели поверхности лопасти НВ.
3. Создание каркаса (нанесение следов базовых поверхностей конструктивно-силового набора в объеме теоретического чертежа и КСС лопасти).

На базе мастер-геометрии строят модель распределения внутреннего пространства лопасти НВ вертолета. Эта модель определяет положение осевых плоскостей силового набора лопасти НВ, на которых при дальнейшем проектировании будут базироваться модели деталей лопасти.

Процесс создания модели распределения внутреннего пространства лопасти НВ вертолета имеет следующие этапы:

1. Разработка конструктивно-технологического членения.
2. Создание плоскостей элементов конструктивно-силового набора.

Разработка модели полного определения всего изделия включает в себя следующие этапы:

1. Позонное моделирование:
 - размерно-точных компонентов конструкции лопасти со всеми связями и сопряжениями;
 - систем с конструктивными элементами крепления;
 - очертаний агрегатов и приборов с точной привязкой элементов крепления, а также с проверкой элементов конструкции для определения наличия интерференции, зазоров и собираемости лопасти.
2. Посекционное моделирование:
 - аналитических эталонов всех элементов конструкции (рис. 16);
 - базы данных чертежей;
 - наполнения атрибутивной информацией.
3. Определение массовых и инерционных характеристик лопасти.

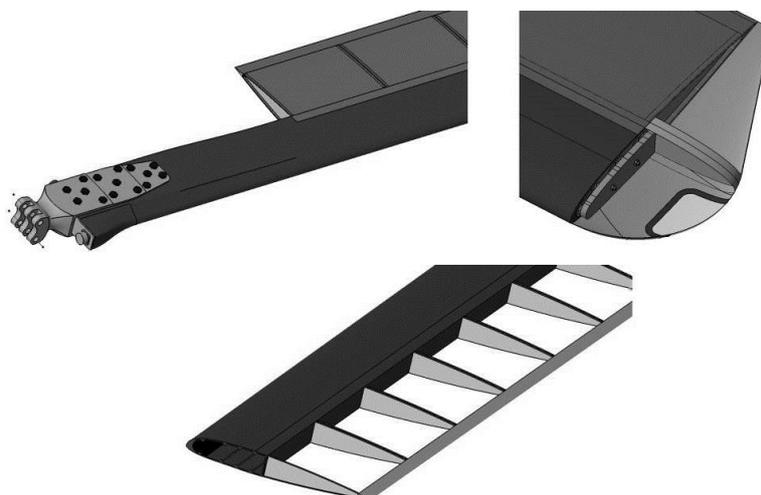


Рис. 16. Фрагменты аналитических эталонов элементов конструкции лопасти

Блок-схема параметрического моделирования лопасти НВ с помощью системы CATIA V5 включает в себя такие 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.

Результатом параметрического моделирования лопасти НВ с помощью системы CATIA V5 является разработка конструкторской, технологической, сертификационной и эксплуатационной документации [6].

Маршрутная технология изготовления лопасти НВ вертолета Ми-26

Технологический маршрут изготовления лопасти с трубчатым лонжероном НВ смешанной конструкции содержит следующие основные операции [8, 9]:

1. Механическая обработка трубчатой заготовки лонжерона, которая включает в себя следующие технологические операции:

- входной контроль заготовки лонжерона;
- расконсервация;
- пескоструйная обработка наружной и внутренней поверхностей трубы металлическим песком;
- правка трубчатой заготовки;
- термическая обработка трубчатой заготовки (отпуск);
- фрезерная и слесарная обработка проушины наконечника;
- ленточное шлифование наружной и внутренней поверхностей трубы;
- контрольные операции (контроль контура, твердости, качества внутренней поверхности, толщины стенок трубы);
- шлифование наружной и внутренней поверхностей проушины;
- контроль отсутствия прижогов и обезуглероживания;
- взвешивание и определение статического момента лонжерона;
- ротационное упрочнение наружной поверхности и гидropескоструйный наклеп внутренней поверхности лонжерона;
- магнитный контроль.

2. Покрытие наружной и внутренней поверхности трубы лонжерона клеем ВК-32-200, сушка и зачистка (шерохование).

3. Установка и фиксация трубы лонжерона в стапеле сборки по ложементам и фиксатору комлевой части.

4. Укладка на наружной поверхности лонжерона жгутов из фторопласта для формирования каналов системы сигнализации его целостности.

5. Установка на наружной поверхности лонжерона двух контурных облицовок из стеклоткани и последующая их полимеризация в автоклаве.

6. Приклеивание на поверхность внутренней облицовки трубы лонжерона опорных бобышек и компенсаторов из пенопласта. Полимеризация клеевых соединений в вакуумных мешках, помещенных в автоклав.

7. Формование носовых вкладышей лопасти в пресс-форме с подогревом для частичной полимеризации.

8. Установка носовых вкладышей на внутренней облицовке трубы лонжерона со слоями компенсаторов – слоев пропитанной стеклоткани, формование аэродинамического контура в пресс-форме первого перехода.

9. Фрезерование компенсаторов и пазов в пенопластовых вкладышах для закладки электрических жгутов ПОС.

10. Установка электрических жгутов ПОС в пазы и заливка клеем.

11. Укладка слоёв стеклоткани и нагревательных накладок ПОС, противоабразивной резины и титановых оковок на оправки, полимеризация набора, установка его на носовую часть лопасти с прикаткой.

12. Формование носовой части лопасти окончательно в пресс-форме второго перехода.

13. Удаление фторопластовых жгутов из каналов облицовки трубчатого лонжерона, продувка полостей каналов азотом. Герметизация каналов в облицовке трубчатого лонжерона.

14. Изготовление нервюр, стрингеров из листового стеклопластика, сотовых блоков из полимерсотопласта марки ПСП-1, склейка хвостовых отсеков.

15. Установка в стапель общей сборки отформованной носовой части лопасти по базам – отверстиям в проушинах комлевой части и на базовые бобышки, расположенные на трубе лонжерона.

16. Последовательная установка хвостовых отсеков вдоль лонжерона лопасти с прирезкой кромок обшивок. Подготовка поверхности носовой части лопасти под склейку, удаление продуктов зачистки.

17. Нанесение клея на склеиваемые поверхности с последовательной установкой хвостовых отсеков по фиксаторам стапеля. Рабочий уровень давления и температурный режим в зоне склейки обеспечивают пневматические прижимы и наличие обогревательных элементов стапеля.

18. Транспортировка (после завершения операции склейки извлечь из стапеля с помощью специальной траверсы кран-балкой лопасть и уложить на специальный ложемент в горизонтальное положение).

19. Удаление выдавившегося клея, герметизация в соответствии с требованиями чертежа.

20. Выполнение внестапельных работ.

Ниже рассмотрены отдельные этапы технологии изготовления лопасти НВ смешанной конструкции тяжелого транспортного вертолета Ми-26.

Технология изготовления стального трубчатого лонжерона

Заготовка стального трубчатого лонжерона из стали 40ХН2МА-Ш представляет собой горячекатанную трубу длиной 15 метров с постоянной толщиной стенки и утолщением в комлевой части (рис. 17) [7].

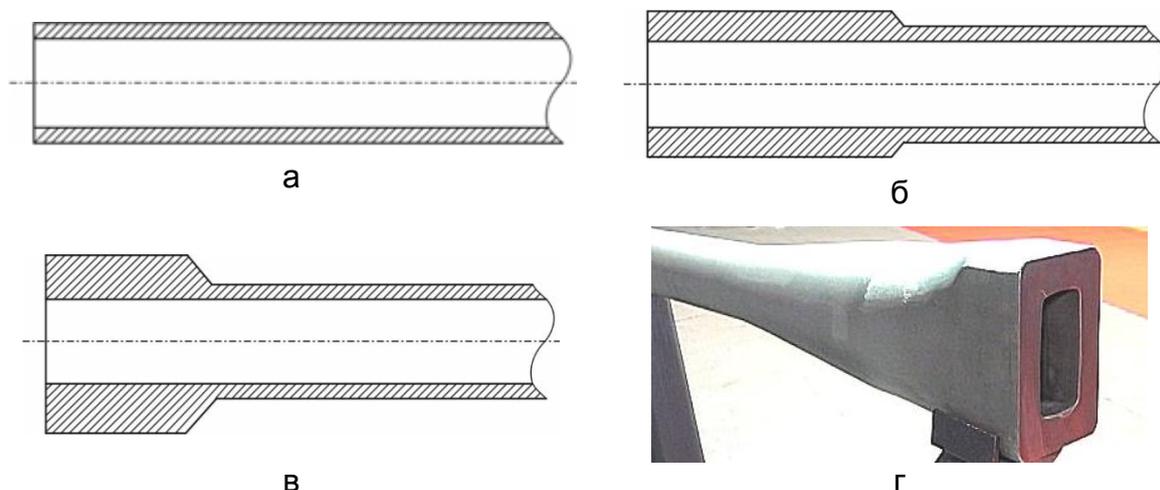


Рис. 17. Схема высадки наконечника заготовки стального трубчатого лонжерона: а – исходная труба диаметром и толщиной стенки 273×24 мм; б – первый переход: размеры стенки – 310×42,5 мм, длина – 610 мм, коэффициент высадки – 0,95; в – второй переход: размеры стенки – 380×77,5 мм, длина – 315 мм, коэффициент высадки – 1,15; г – общий вид заготовки трубчатого лонжерона во время поставки на авиационный завод

Форма поперечного сечения трубчатой заготовки в зависимости от длины меняется от круглой до овальной в результате сплющивания с определенным шагом.

Сталь 40ХН2МА-Ш обладает высокой прочностью, вязкостью и глубокой прокаливаемостью. Легирующие добавки в стали этой марки повышают ее прочность и стойкость. Введение молибдена в состав стали 40ХН2МА-Ш способствует снижению чувствительности к отпускной хрупкости и перегреву [8].

В табл. 2 приведен химический состав высокопрочной стали 40ХН2МА-Ш (ГОСТ 4543-71). Электрошлаковый переплав снижает загрязненность металла и другие дефекты, тем самым повышается качество стали.

Таблица 2

Химический состав стали марки 40ХН2МА-Ш (ГОСТ 4543-71), %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu
0,37 - 0,44	0,17 - 0,37	0,5 - 0,8	1,25 - 1,65	до 0,025	до 0,025	0,6 - 0,9	0,15 - 0,25	до 0,3

Полученная с металлургического трубопрокатного завода заготовка проходит расконсервацию и входной контроль, после чего проводят пескоструйную очистку наружной и внутренней поверхностей заготовки.

Затем заготовку лонжерона устанавливают в специальное контрольное приспособление, где с помощью оптического квадранта выявляют возможные отклонения формы. При необходимости на гидравлическом прессе выполняют операцию правки. Последующая термическая обработка (отпуск) в индукционной печи позволяет снять внутренние напряжения в металле трубчатой заготовки лонжерона.

Далее трубчатая заготовка лонжерона (см. рис. 17, г) поступает на участок механической обработки, где проводят фрезерование и шлифование проушины наконечника, сверление и растачивание стыковочных отверстий для навешивания лопасти на втулку НВ вертолета (рис. 18).



Рис. 18. Внешний вид проушины лонжерона после механической обработки

После обработки проушины наконечника выполняют ленточное шлифование наружной и внутренней поверхностей трубчатого лонжерона на специализированных ленточно-шлифовальных станках моделей СШЛН (наружное шлифование) и СШЛВ (внутреннее шлифование) после рентген-контроля и закалки заготовки [6].

Строчечное шлифование наружной поверхности лонжерона 1 выполняют

абразивной лентой 2 шириной 90 мм (рис. 19, а). Технологические параметры ленточного шлифования – глубина Δh и ширина l_p снимаемого слоя металла.

К обрабатываемой трубчатой поверхности лента прижата пневматическим контактным роликом 3. В процессе строчечного ленточного шлифования заготовка лонжерона 1 перемещается по продольной оси станка с подачей от 5 до 25 м/мин и в промежутках между рабочими циклами поворачивается на заданный угол. Гидравлическая система станка следит за профилем изделия с помощью роликов, смещение которых регулирует давление прижима абразивной ленты (от 0,2 до 1,2 МПа) в зависимости от радиуса кривизны сечения лонжерона.

На рис. 19, б показана схема ленточного шлифования внутренней поверхности заготовки лонжерона на станке модели СШЛВ. Перед шлифованием в заготовку 1, установленную в приводных люнетах и зажатую в патронах станка, с помощью штанги 2 продевают абразивную ленту 3 шириной 90 мм и концы ее склеивают. Электродвигатель передает вращение приводному шкиву 4, на который надета абразивная лента. Лента прижата к обрабатываемой поверхности упругим элементом 5, наполненным сжатым воздухом через штангу 2. Давление воздуха в упругом элементе – 0,05 МПа, скорость перемещения ленты по строке шлифования в результате подачи упругого элемента – 5 м/мин, скорость главного движения шлифовальной ленты – 20 м/с.

На рис. 20 показан стальной трубчатый лонжерон после шлифования.

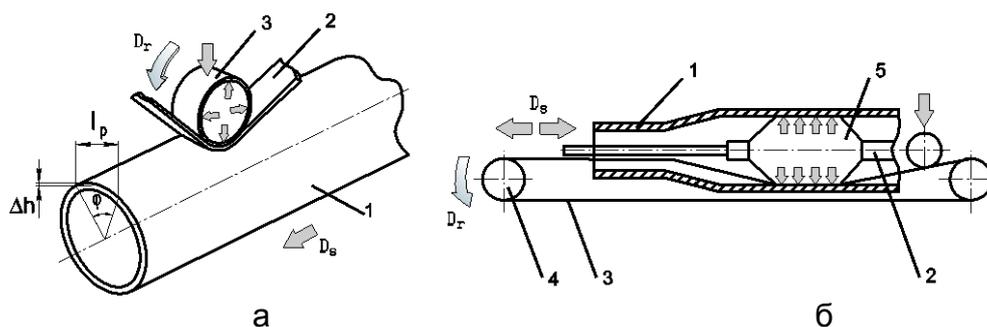


Рис. 19. Схема ленточного шлифования трубчатого лонжерона

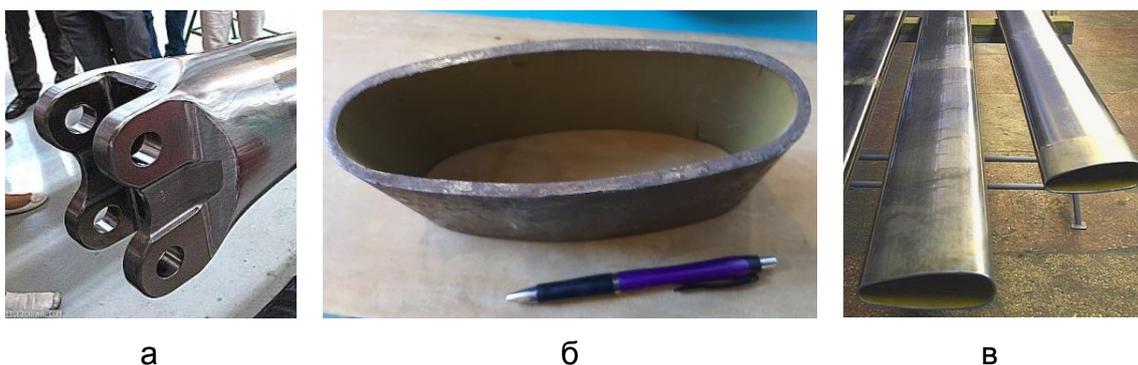


Рис. 20. Внешний вид трубчатого лонжерона после шлифования со стороны: а – наконечника; б – образца-темплета из средней части трубы; в – консоли

По завершении контрольных операций (контроля контура, твердости, качества внутренней и наружной поверхностей, толщины стенок трубы) следует плоскошлифовальная обработка наружной и внутренней поверхностей проуши-

ны. Затем стальной трубчатый лонжерон проходит контроль на отсутствие прижогов после шлифования, его взвешивают и определяют статический момент.

Для повышения усталостной прочности стального трубчатого лонжерона при динамических нагрузках применяют технологию обкатывания роликами, виброударную обработку методами поверхностно-пластического деформирования. Заготовку трубчатого лонжерона 2 (рис. 21) обкатывают за два рабочих хода при встречном и попутном вращениях обкатника 3 и лонжерона [6].

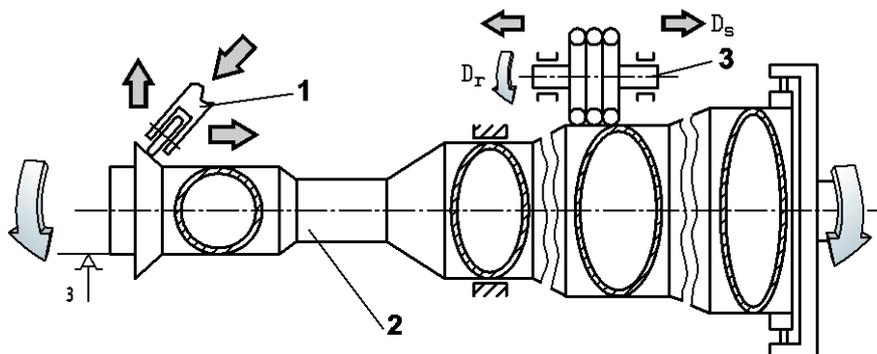


Рис. 21. Схема обкатывания заготовки стального трубчатого лонжерона

Поверхности лонжерона цилиндрической и овальной формы обкатывают трех- или пятирядными шариковыми обкатниками 3. Галтели проушины наконечника упрочняют однорядными роликовыми обкатниками 1. Частота вращения обкатников – 2500 мин^{-1} , стального трубчатого лонжерона – 6 мин^{-1} , продольная подача обкатников – $0,15 \text{ мм/об}$. Давление деформирующего инструмента 50 Н на обкатываемую поверхность создается тарированными пружинами [9]. Стыковочные отверстия в наконечнике трубчатого лонжерона упрочняют с помощью выглаживающей прошивки на прессе (рис. 22).

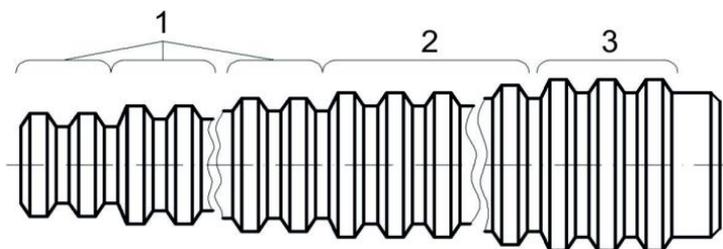


Рис. 22. Схема расположения секций на выглаживающей прошивке:
1 – направляющая; 2 – выглаживающая; 3 – калибрующая

Для удаления окисной пленки поверхность лонжерона после упрочняющей обработки декапируют в растворе кислоты. После нанесения на внутреннюю поверхность трубы атмосферостойкого грунта ВЛ-02 стальной трубчатый лонжерон массой 300 кг поступает в специальное приспособление изготовления носовой части лопасти смешанной конструкции.

Технология изготовления носовой части лопасти смешанной конструкции

Аэродинамический контур носовой части лопасти смешанной конструкции вертолета Ми-26 образован стеклопластиковой обшивкой (рис. 23) [8].

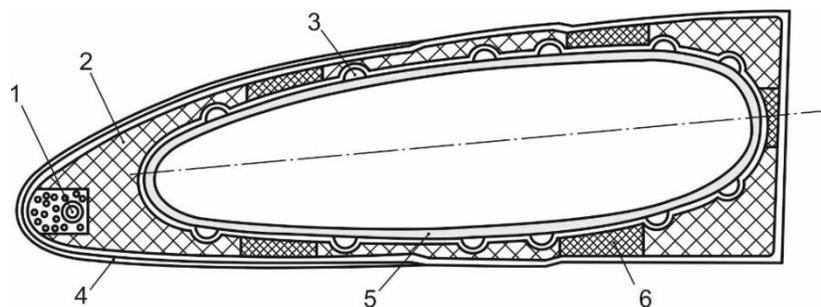


Рис. 23. Схема носовой части лопасти смешанной конструкции:

1 – электрический жгут ПОС; 2 – наполнитель пенопластовый; 3 – воздушный канал; 4 – противобрызговая накладка; 5 – лонжерон; 6 – компенсатор

Маршрутная технология изготовления носовой части лопасти НВ смешанной конструкции предусматривает следующие операции [8, 9]:

1. Покрытие наружной поверхности трубчатого лонжерона тремя слоями адгезионного подслоя ВК-3.

2. Установка и фиксация лонжерона в сборочном приспособлении по ложементам и отверстиям проушины комлевой части. Укладка на трубу лонжерона жгутов из фторопласта).

3. Установка на наружную поверхность лонжерона лент из стеклоткани и их полимеризация (автоклав модели АЭ 2,5-20).

4. Приклеивание носовых вкладышей, опорных бобышек и компенсаторов на облицованную поверхность лонжерона и их полимеризация (специальное автоклавное приспособление).

5. Фрезерование пазов в носовых вкладышах для закладки жгутов ПОС (ручной пневматический инструмент).

6. Выкладывание наружной обшивки из восьми слоев стеклоткани на выклеечную форму, полимеризация пакета (автоклав модели АЭ 2,5 – 20).

7. Укладка электрических жгутов в паз и заливка клеевой мастикой, измерение параметров ПОС (контрольный стенд модели АСКЭ).

8. Установка наружной обшивки на опорные бобышки, носовые вкладыши и компенсаторы облицованной трубы лонжерона. Вспенивание пенопластового наполнителя (пресс-форма первого перехода).

9. Установка на наружную обшивку носовой части лопасти слоёв стеклоткани и нагревательных накладок ПОС, слоя противобрызговой резины и секций металлической оковки, окончательное формование носовой части лопасти (пресс-форма второго перехода).

10. Зачистка торцевой поверхности носовой части под склейку с хвостовыми отсеками, удаление продуктов зачистки, контроль переменной малки (приспособление контрольно-доводочное).

11. Удаление фторопластовых жгутов и герметизация каналов облицовки лонжерона, продувка полостей каналов азотом (контрольный стенд).

12. Контроль закрутки носовой части лопасти, взвешивание (специальное приспособление).

13. Испытание ПОС в условиях вибрации, влажной атмосферы, низкой температуры (вибростенд; термобарокамера модели КТКБ).

Для формирования воздухопроводящих каналов системы сигнализации повреждения лонжерона на его внешнюю поверхность по всей длине укладывают двойные фторопластовые шнуры. После обматывания облицовочной лен-

той из стеклоткани и полимеризации в пресс-форме фторопластовые шнуры удаляют, в результате чего образуются воздушные каналы диаметром 2 мм, открытые со стороны внешней поверхности трубы лонжерона. Появление усталостной трещины на стенке трубы в зоне каналов приводит к падению давления воздуха внутри трубы и срабатыванию сигнализатора системы повреждения лонжерона [10, 11].

Расположение шнуров по периметру трубчатого лонжерона определяют двумя торцовыми плитами специального приспособления (рис. 24, а). Схема расположения фторопластовых шнуров 2 в каналах облицовочной ленты 1 комлевой части трубчатого лонжерона 3 показана на рис. 24, б.

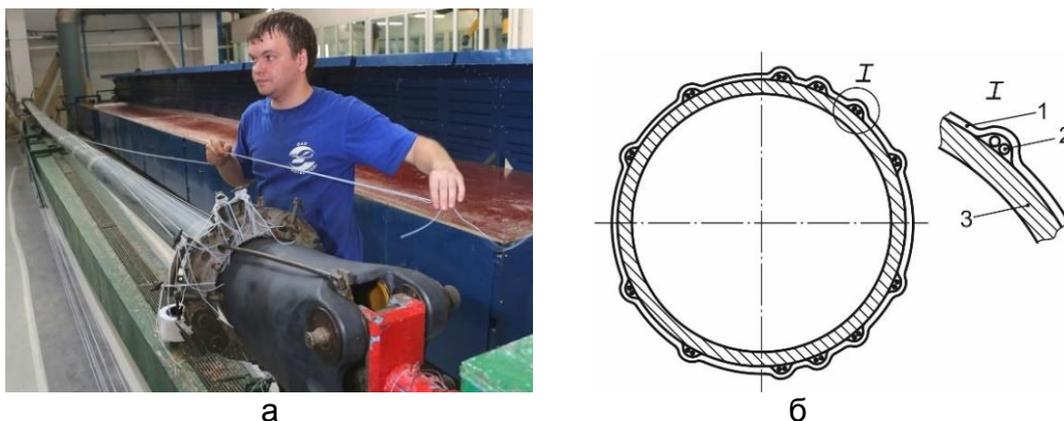


Рис. 24. Общий вид приспособления (а) и схема расположения шнуров на трубе лонжерона (б):
1 – лента облицовочная; 2 – шнур фторопластовый; 3 – лонжерон

Фторопластовые шнуры укладывают на наружную поверхность трубы лонжерона попарно для уменьшения вероятности их обрыва при вытягивании из полости канала длиной 14 метров [11].

Стеклопластиковую обшивку носка лонжерона лопасти смешанной конструкции приклеивают к носовым вкладышам и опорным бобышкам (аналог нервюр крыла) и продольным компенсаторам (аналог стрингеров).

Установку и приклеивание носовых вкладышей и продольных компенсаторов на наружную поверхность трубы лонжерона, облицованную лентами стеклоткани, выполняют в специальном сборочном приспособлении (рис. 25).



Рис. 25. Общий вид (а) приспособления для установки и приклеивания носовых вкладышей (б) и компенсаторов на трубу лонжерона лопасти

На переднем плане рис. 26, а показана облицованная труба лонжерона с приклеенными компенсаторами, носовыми вкладышами и опорными бобышками (вид с консольной стороны лонжерона) перед закладкой в специальное автоклавное приспособление, которое расположено на заднем плане.



а



б

Рис. 26. Внешний вид облицованной трубы лонжерона лопасти НВ с компенсаторами, носовыми вкладышами и опорными бобышками до автоклавного формования (а) и после него (б)

Из соображений технологичности пресс-форма данного приспособления выполнена секционной (см. рис. 26, а) в связи с тем, что трубчатый лонжерон имеет сложное, изменяющееся по длине поперечное сечение.

На рис. 26, б показана производственная партия трубчатых лонжеронов с компенсаторами, носовыми вкладышами и опорными бобышками после формования и полимеризации.

Далее после формования и полимеризации следует фрезерование пазов в носовых вкладышах лонжерона для закладки электрических проводов ПОС.

Жгуты электрических проводов укладывают в паз, который заливают клеевой мастикой. Затем на носовую часть лонжерона лопасти устанавливают слои стеклоткани и нагревательные наклейки ПОС.

Установку ПОС, резиновую накладку защиты от абразивного износа и секций металлической окантовки на носовой части лонжерона лопасти выполняют прикатыванием на пленочный клей.

Далее автоклавное формование носовой части лопасти НВ смешанной конструкции происходит окончательно в пресс-форме второго перехода.

После включения нагревателей связующее композитного материала и клеевая пленка размягчаются и переходят в вязкотекучее состояние. При температуре начала желатинизации проводят полное смыкание секций пресс-формы с помощью пневматических цилиндров. Под действием температуры и давления носовая часть лопасти НВ полностью заполняет объем пресс-формы, излишки связующего композиционного материала отжимаются и вытекают по специальным канавкам [11].

После проведения нагрева пресс-форму охлаждают, сбрасывают давление воздуха в пневматических цилиндрах, открывают плиты и вынимают сформованную носовую часть лопасти совместно с трубчатым лонжероном.

Зачистку торцевой поверхности носовой части под склеивание с хвостовыми отсеками лопасти, удаление продуктов зачистки, контроль переменной малки с помощью комплекта шаблонов контура сечения ШКС выполняют в контрольно-доводочном приспособлении (рис. 27).



Рис. 27. Общий вид приспособления для доводки носовой части лопасти НВ

Приспособление оборудовано перфорированным поддоном с пневматической вытяжкой для удаления продуктов зачистки и поворотными ложементами для базирования, закрепления и кантования носовой части лопасти.

На рис. 28 показана носовая часть лопасти НВ смешанной конструкции с комлевой стороны после зачистки торцевой поверхности.



Рис. 28. Общий вид носовой части лопасти НВ вертолета Ми-26 после зачистки

После удаления фторопластовых жгутов проводят продувку полостей каналов облицовки трубы азотом, герметизацию каналов и заполнение зазоров между полосами титановой оковки клеевой мастикой.

Далее проводят контроль закрутки носовой части лопасти, взвешивание, испытание ПОС в условиях вибрации, влажной атмосферы и низкой температуры [9, 11]. Готовые носовые части смешанной конструкции передают на участок окончательной сборки лопасти НВ.

Технология изготовления композитного хвостового отсека лопасти НВ

Схема изготовления композитных хвостовых отсеков лопастей для НВ тяжелого транспортного вертолета показана на рис. 29.

Технология изготовления сотовых блоков из полимерной бумаги (полимерсотопласта марки ПСП-1) была создана в Украинском научно-исследовательском институте технологии машиностроения (УкрНИИТМ, г. Днепрпетровск) в 2001 году на основе исследований В. И. Сливинского [10].

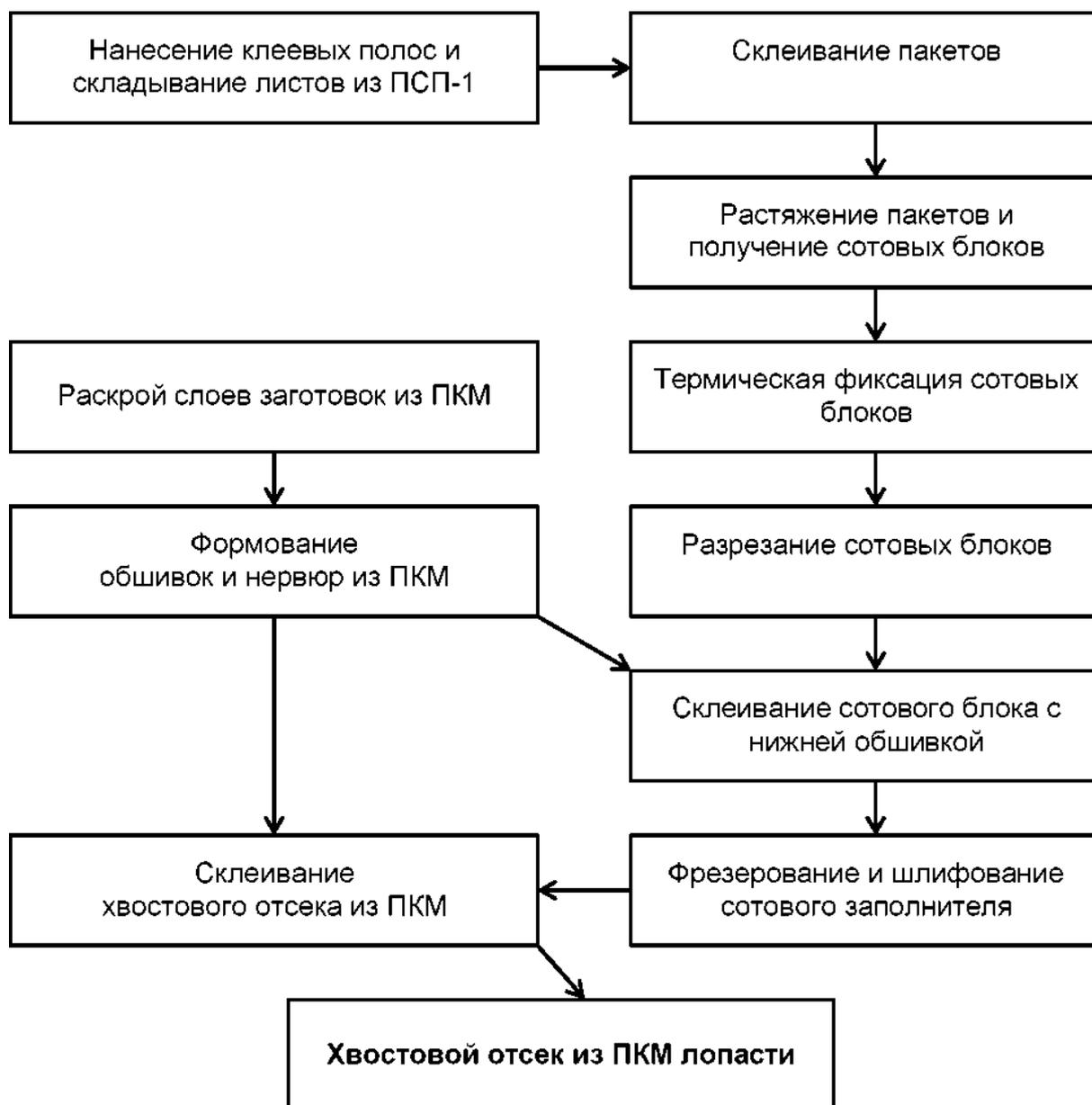


Рис. 29. Схема изготовления композитных хвостовых отсеков лопасти

Полимерный сотовый блок изготавливают в следующей технологической последовательности:

- нанесение клеевых полос жидкого клея ВК-25 на препрег из рулонного полимерсотопласта ПСП-1 и складывание пакета (установка для нанесения клеевых полос модели УНКП-1, автомат складывания пакета модели АСП-1);
- склеивание сотового пакета (пресс гидравлический с электрическим подогревом пакета модели Д-2938);
- обрезка пакета (машина для резки бумаги модели БР-125К);
- высечка заготовок пакета (пресс гидравлический модели ДБ-2430);
- растяжение сотового пакета (установка модели УРСП-1);
- термическая фиксация растянутого сотового пакета (печь с индукционным нагревом);
- разрезание сотового пакета (ленточнопильный станок модели ЛС-80).

Технологическая линия производства полимерных сотовых пакетов включает в себя установку нанесения клеевых полос модели УНКП-1, гидравлический пресс с электрическим обогревом модели ДБ-2430 для склеивания пакетов до 500 листов бумаги и бумагорезательную машину модели БР-125К для обрезки сотового пакета (рис. 30).

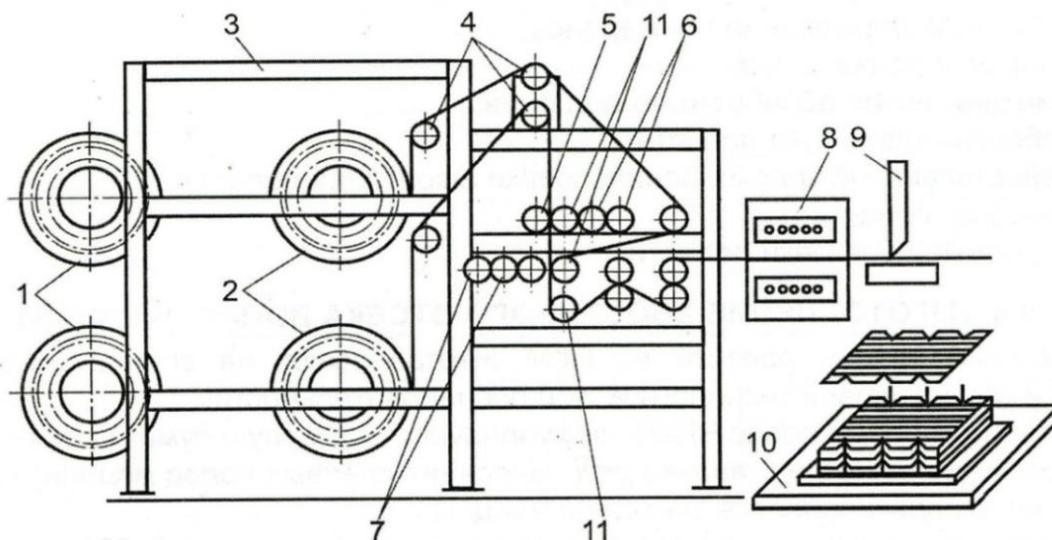


Рис. 30. Схема технологической линии:

- 1 – рулоны бумаги; 2 – сматывающее устройство; 3 – станина;
- 4, 11 – направляющие валики; 5 – прижимные валики;
- 6 – валики для нанесения клея; 7 – валики для передачи клея;
- 8 – сушильная камера; 9 – режущее устройство;
- 10 – устройство складывания пакета

Протяжка препрега рулонной полимерной бумаги при нанесении и сушке клеевых полос происходит со скоростью 3 м/мин. После этого рулон автоматически разрезается на листовые заготовки длиной 920 мм.

Листы укладывают на сборочную плиту устройства складывания пакета, базируя на штыри. Каждый лист укладывается со смещением клеевых полос на полшага относительно предыдущего, так что полосы одного листа получаются между полосами предыдущего.

Затем сверху укладывают вторую сборочную плиту. Между пакетом и каждой из плит прокладывают полиэтиленовую пленку и резиновый лист для защиты плит от клея и равномерной передачи давления.

Далее сотовый пакет упаковывают в вакуумный мешок и загружают в камеру установки СВЧ-нагрева, где проводится предварительное склеивание в течение 10 минут. После охлаждения сотовый пакет извлекают из вакуумного мешка, помещают в термическую камеру для окончательного склеивания.

Готовые сотовые пакеты обрезают, взвешивают, измеряют высоту и ширину, определяют объемную массу будущего растянутого сотового блока (для полимерсотопласта марки ПСП-1 норма должна составлять $25 \pm 5 \text{ кг/м}^3$). Срок хранения сотовых пакетов из ПСП-1 не должен превышать один год [10].

Схема растяжения пакета с помощью приклеенных к крайним листам технологических пластин показана на рис. 31, а. Фиксация сотового блока в

растянутом состоянии выполняется между двумя рамками с помощью четырех шпилек (рис. 31, б).

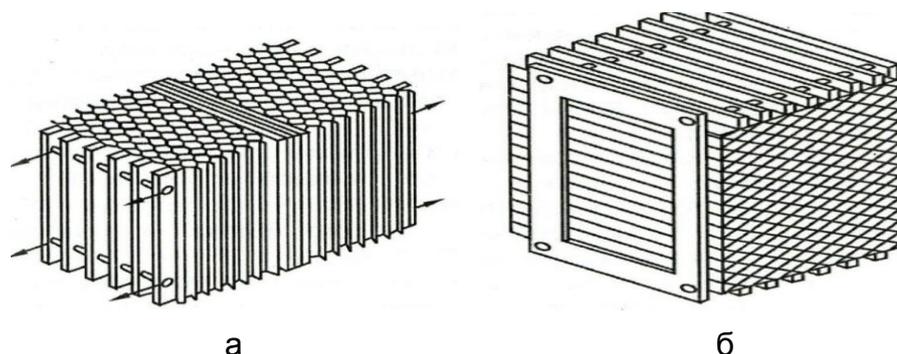


Рис. 31. Схема растяжения пакета и фиксации блока из полимерсотопласта

Полимерсотопласт в отличие от алюминиевой фольги имеет высокую упругость и свободный сотовый блок после растяжения изменяет форму.

Заготовку растягивают на приспособлении, помещают на две рамки с расположенными по периметру зубцами и термостатируют в камеру при температуре 190°С в течение пяти часов. После охлаждения сотовый блок снимают с рамок и контролируют цвет, форму ячеек, размер по ширине.

Разрезание сотовых блоков из полимерсотопласта марки ПСП-1 выполняют на ленточнопильном станке модели ЛС-80 с системой вытяжки пыли и экранированием рабочей зоны, станочник работает в респираторе и головном уборе (рис. 32, а).

Сотовый блок устанавливают на штыри технологической плиты с системой вытяжки пыли. Разрезание сотовых блоков из полимерсотопласта выполняют ленточной мелкозубой пилой (рис. 28, б). На рис. 32, в показан сотовый блок после разрезания ленточной пилой перед изготовлением из него сотового заполнителя клиновидной формы для хвостового отсека лопасти НВ.



Рис. 32. Общий вид ленточнопильного станка и разрезанных сотовых блоков

Для удаления махры после разрезания выполняют шлифование плоскости одного из двух торцов полимерного сотового блока на плоскошлифовальном станке мелкозернистой абразивной лентой.

Технология изготовления полимерного хвостового отсека лопасти

Работы по изготовлению полимерного хвостового отсека лопасти проводят в следующей технологической последовательности [9, 11]:

- изготовление обшивок из ПКМ (установка для формования обшивок);
- формование композитных нервюр (установка для формования нервюр);
- шерохование обшивок и нервюр для уменьшения гладкости поверхности (установка для шерохования поверхности);
- прикатывание пленочного клея ВК-3 к обшивкам (установка СПК-1);
- нанесение жидкого клея ВК-9 на торцы полимерного сотового блока (установка для нанесения клея модели УНК-1П);
- склеивание сотового блока с нижней обшивкой (специализированная установка для склеивания модели УССБ);
- обработка верхней поверхности сотового блока на клин для получения сотового заполнителя (станок с ЧПУ модели РФП-6);
- сборка-склеивание хвостового отсека (специализированная автоклавная установка модели УСХ-2).

Раскрой препрега из стеклоткани для композитных обшивок и нервюр хвостового отсека лопасти выполняют на плоттере с ЧПУ (рис. 33, а).

Система ЧПУ данного раскройного комплекса оснащена специализированным программным обеспечением *Smart Cut Auto Plot* для раскроя препрега любой конфигурации (рис. 33, б).



а



б

Рис. 33. Общий вид плоттера с ЧПУ для раскроя заготовок из рулона препрега

В условиях опытного и серийного вертолетного производства раскрой рулонного препрега также проводят ручными механизированными ножницами (рис. 34, а) по светящимся линиям от лазерного проектора (рис. 34, б) фирмы Eastman (США) или LAP (Германия). Точность проекционной системы модели CAD-PRO LD составляет $\pm 0,2$ мм/м, модели CAD-PRO HP – $\pm 0,06$ мм/ м, максимальный угол проецирования – 80° .

Лазерный проектор создает на рабочей поверхности раскройного стола последовательность точечных изображений красного или зелёного цвета в соответствии с конфигурацией и размерами листовых заготовок (рис. 34, в).

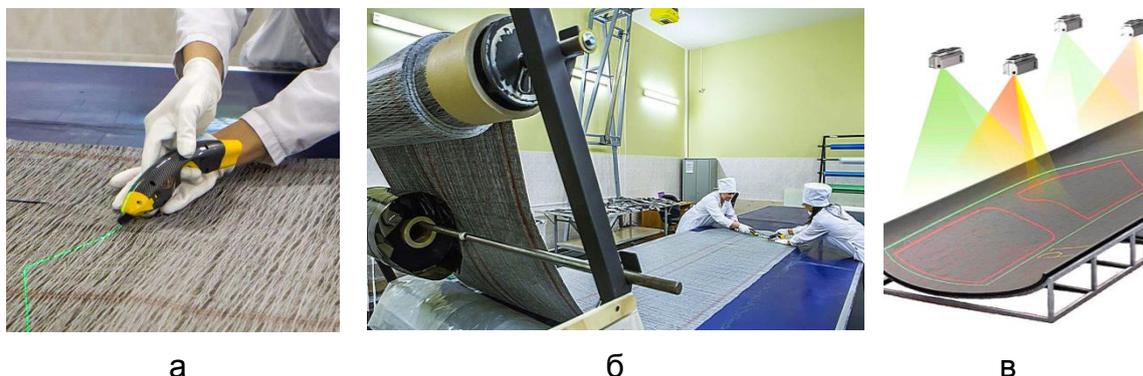


Рис. 34. Общий вид оснащения и оборудования для раскроя препрега

Обшивки хвостового отсека лопасти изготавливают методом выкладки «сухим» способом. На рис. 35 показаны этапы ручного и автоматического комплектования пакета препрега из определенного количества слоев стеклоткани для формования обшивки хвостового отсека лопасти.



Рис. 35. Общий вид оснащения и оборудования для комплектования пакета препрега обшивки отсека лопасти:

а – вручную; б – автоматически на роботизированной установке с ЧПУ

Схема выкладки слоев композитной обшивки хвостового отсека лопасти с использованием вакуумного мешка для автоклавного формования изображена на рис. 36, а. Этап герметизации вакуумного мешка для автоклавного формования композитной обшивки хвостового отсека лопасти изображен на рис. 36, б.

На поверхность металлической выклеечной формы 1 наносят разделительный слой 2 для предотвращения адгезии между связующим на ткани препрега 3 и выклеечной формой. На разделительный слой укладывают пакет препрега и пористую пленку 4. Избыточное связующее, протекая через пористую пленку, будет впитываться адсорбционным материалом 5.

На верхний разделительный слой 6 накладывают металлическую цулагу 7

для равномерности передачи давления формования на пакет. Дренажные слои 5 и 8 отводят испаряющиеся компоненты эпоксидного связующего из-под вакуумного мешка 9, который герметизируют жгутом 10 [9, 10].

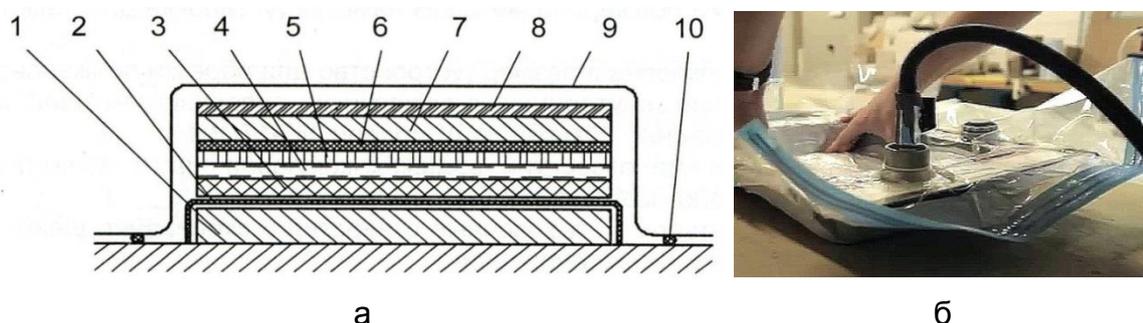


Рис. 36. Схема выкладки (а) и вакуумирования (б) композитной обшивки хвостового отсека лопасти

Технология формования композитных нервюр хвостового отсека лопасти

Формование композитных нервюр хвостового отсека лопасти выполняют с применением металлических выклеечных форм (рис. 37, а). Формование пакета нервюр хвостового отсека из ПКМ происходит в вакуумном мешке, помещенном в автоклав (рис. 37, б) [9].

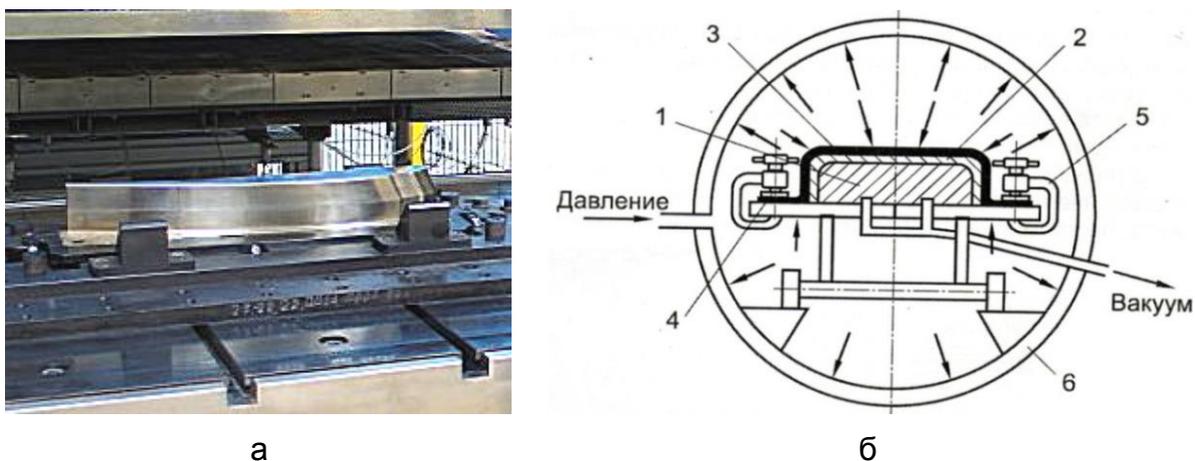


Рис. 37. Внешний вид металлической выклеечной формы (а) и схема автоклавного формования композитной нервюры (б)

На металлическую выклеечную форму 1 (см. рис. 37, б) выкладывают скомплектованный пакет препрега 2, на котором вслед за разделительной антиадгезионной пленкой укладывают цулагу в виде резинового мешка 3.

Затем форму герметизируют с помощью прижимного кольца 4 и струбцин 5. Выклеечную форму помещают в автоклав 6. Отверждение связующего происходит при заданном термическом режиме и избыточном давлении.

Работы по формованию композитных нервюр хвостового отсека лопасти выполняют в следующей технологической последовательности [11]:

1. Нанести на выклеечную форму два слоя антиадгезионной смазки.
2. Провести входной контроль стеклотканевого препрега.

3. Выложить заготовки препрега на выклеечную форму в соответствии с чертежом и схемой выкладки.

4. Уложить разделительную антиадгезионную пленку и установить цулагу, герметизировать выклеечную форму.

5. Поместить выклеечную форму в автоклав и подсоединить к вакуумной системе. Закрывать автоклав, задать термический режим и избыточное давление автоклавного формования.

6. Охладить выклеечную форму в автоклаве до температуры 40°C, не уменьшая давления и вакуума. Снять давление и вакуум, открыть автоклав, отсоединить дренажную систему и извлечь выклеечную форму.

8. Разобрать выклеечную форму, извлечь отформованную нервюру.

9. Обрезать у нервюры технологический припуск, удалить подтеки клея.

10. Провести визуальный осмотр отформованной нервюры на отсутствие раковин, трещин, складок; контролировать геометрические параметры и массу.

11. Провести в центральной заводской лаборатории испытания на разрыв и контроль содержания и степень полимеризации связующего в стеклопластике на образцах из технологического припуска нервюры.

Выкладывание антиадгезионной пленки и пакета препрега на поверхность выклеечной формы композитной нервюры хвостового отсека выполняют по светящимся линиям лазерного проектора (рис. 38).



а



б

Рис. 38. Общий вид выклеечной формы на этапах выкладывания антиадгезионной пленки (а) и пакета препрега (б) с использованием лазерного проектора

Для контроля геометрических параметров выклеечной оснастки композитных изделий применяют стационарные (рис. 39, а) и мобильные (рис. 39, б) контрольно-измерительные машины с ЧПУ.



Рис. 39. Общий вид стационарного (а) и мобильного (б) измерительного оборудования для контроля геометрических параметров выклеечной оснастки

Технология изготовления сотового заполнителя хвостового отсека

Изготовление полимерного сотового заполнителя хвостового отсека лопасти выполняют в следующей технологической последовательности [9, 11]:

- приклеивают на одну из обшивок хвостового отсека с помощью пленочного клея шлифованную плоскость полимерного сотового блока (рис. 40, а). Этот технологический этап называется склеиванием по первому переходу;

- проводят черновую (рис. 40, б) и чистовую обработку (рис. 40, в) второй плоскости полимерного сотового заполнителя на специализированном фрезерном станке с ЧПУ модели РФП-6.

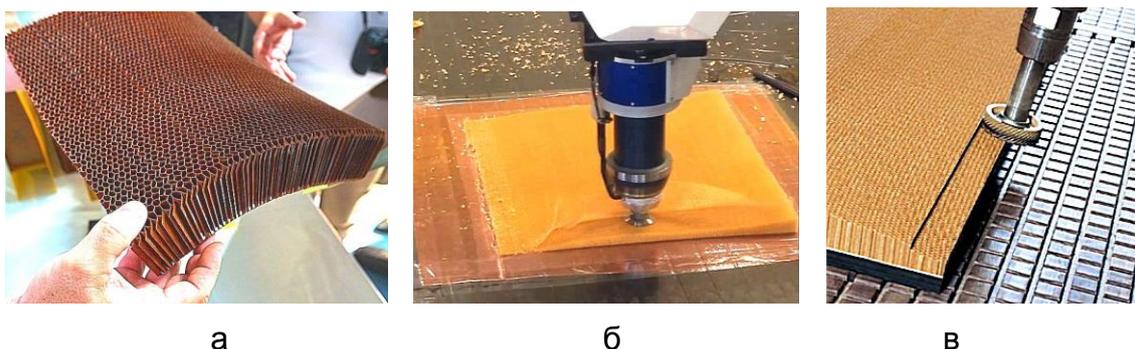


Рис. 40. Внешний вид сотового блока марки ПСП-1 (а) и верхней плоскости сотового заполнителя при черновом (б) и чистовом (в) фрезеровании

На второй торцевой плоскости полимерного сотового заполнителя после фрезерования оставляют технологический припуск на ленточное шлифование.

Для удаления стружки и пыли из зоны фрезерования ПКМ на станках с ЧПУ предусмотрена специальная вытяжная вентиляция (рис. 41, а).



Рис. 41. Общий вид вытяжной вентиляции на специализированном станке с ЧПУ (а), приемника стружки и пыли из зоны фрезерования (б) и клиновидного сотового заполнителя из полимерсотопласта ПСП-1 после фрезерования (в)

Вытяжная вентиляция имеет систему гибких трубопроводов и приемник-уловитель для удаления стружки и пыли непосредственно из зоны фрезерной обработки ПКМ (рис. 41, б). На рис. 41, в показан демонстрационный образец сотового заполнителя хвостового отсека лопасти НВ из полимерсотопласта марки ПСП-1 с остатками пленочного клея на торцах сот после фрезерования.

Разломаченный после фрезерования торец сотового заполнителя шлифуют абразивной лентой на плоскошлифовальном станке с вакуумным прижимом обшивки к плите специального станочного приспособления. После шлифования верхней плоскости сотового заполнителя удаляют пыль промышленным пылесосом, проверяют качество и точность контура сотового заполнителя.

Далее склеивают полимерный сотовый заполнитель по второму технологическому переходу – со второй обшивкой и нервюрами.

Схема выклеечной формы для автоклавного формования композитного хвостового отсека лопасти показана на рис. 42, а [10]. Этап укладки впитывающего слоя из ткани объемного плетения на выклеечную форму хвостового отсека лопасти показан на рис. 42, б.

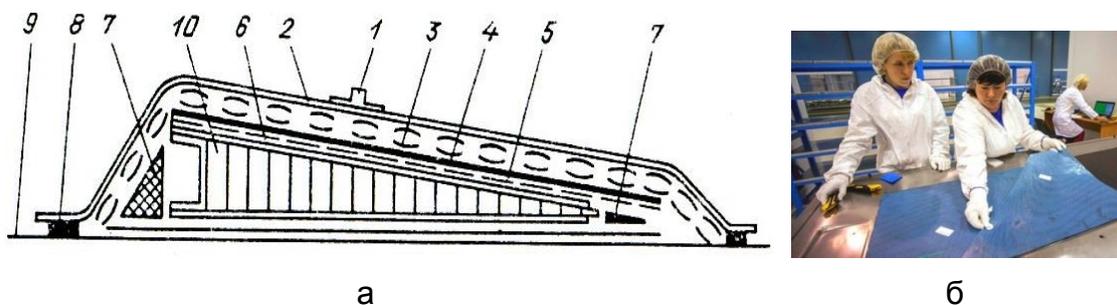


Рис. 42. Схема (а) и общий вид (б) выклеечной формы для автоклавного формования композитного хвостового отсека лопасти

Выкладку подборок композитного хвостового отсека лопасти на выклеечную форму для автоклавного вакуумного формования выполняют в следующей технологической последовательности (см. рис. 42, а):

1. Обезжиривание рабочей поверхности плиты 9 выклеечной формы;
2. Нанесение антиадгезионной пленки 5 на плиту 9 и установка базовых фиксаторов 7;
3. Базирование нижней обшивки с сотовым наполнителем 10, верхней обшивки 6 и нервюр (на схеме условно не показаны) на фиксаторах 7;
4. Монтаж в зоне технологического припуска двух термопар для обеспечения автоматического температурного режима отверждения;
5. Нанесение на внешний слой верхней обшивки антиадгезионной пленки 5 и укладка впитывающего слоя из ткани объемного плетения 3;
6. Монтаж дренажного слоя 4 для обеспечения равномерного распределения разрежения под вакуумным мешком 2;
7. Подгонка вакуумного мешка 2 из газонепроницаемой пленки со штуцером 1 для присоединения вакуумной системы;
8. Герметизация вакуумного мешка эластичным жгутом 8.

Упакованные выклеечные формы ставят на технологическую тележку, которую закатывают в автоклав и подключают дренажный канал выклеечной формы к автономной системе вакуумирования автоклава (рис. 43, а).

После формования и охлаждения сбрасывают давление в автоклаве и вакуум под мешком, открывают крышку автоклава, выкатывают технологическую тележку и снимают отформованные композитные хвостовые отсеки лопасти. На рис. 43, б показана производственная партия выклеечных форм для формования хвостового отсека лопасти перед выемкой из автоклава.

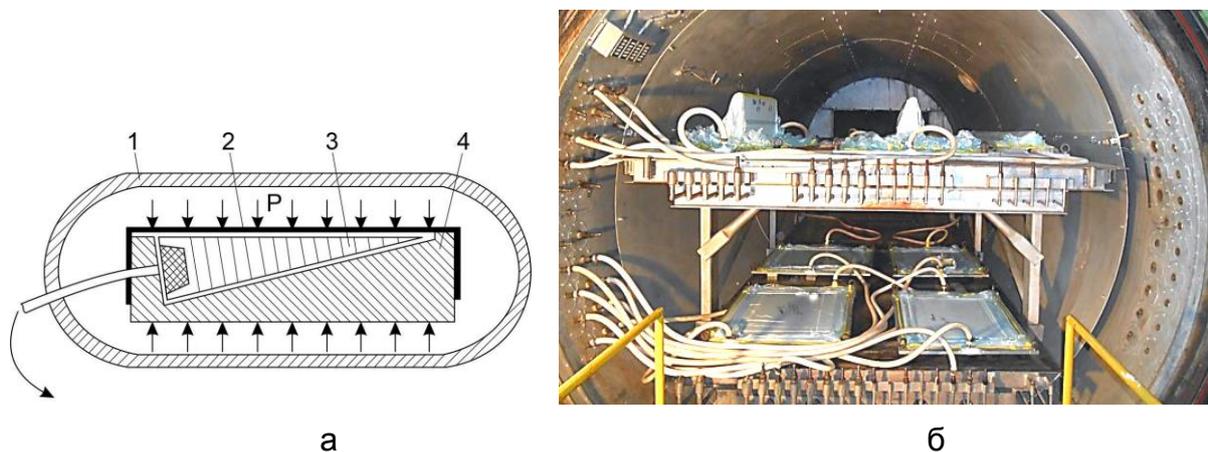


Рис. 43. Схема (а) и общий вид (б) оснащения для автоклавного формования композитного хвостового отсека:

- 1 – автоклав; 2 – вакуумный мешок;
- 3 – хвостовой отсек; 4 – пресс-форма

Композитный хвостовой отсек лопасти НВ тяжелого транспортного вертолета Ми-26 после автоклавного формования показан на рис. 44.



Рис. 44. Общий вид хвостового отсека лопасти после автоклавного формования

Контроль качества изготовления композитного хвостового отсека

Контроль композитного хвостового отсека лопасти НВ и РВ после склеивания на авиационном заводе осуществляют, выполняя следующие типовые операции:

- визуальное выявление раковин, отслоений, инородных включений;
- проверка сплошности склеивания сотового заполнителя и обшивок с нервюрами акустическим методом неразрушающего контроля;
- измерение геометрических размеров и массы хвостового отсека, комплектация по весу отсеков на лопасть.

Типовыми дефектами конструкций из ПКМ хвостовых отсеков лопасти НВ являются следующие:

- дефекты в монолитном слое обшивки: расслоения, включения, трещины, полости (рис. 45, а);
- дефекты в одиночном сотовом заполнителе: зазор между сотоблоками, потеря устойчивости стенок сот, разрыв стенок сот, вода в сотах (рис. 45, б);
- дефекты между одиночными слоями обшивки: непрочлеи, инородные включения, отслоение от сотового заполнителя (рис. 45, в).

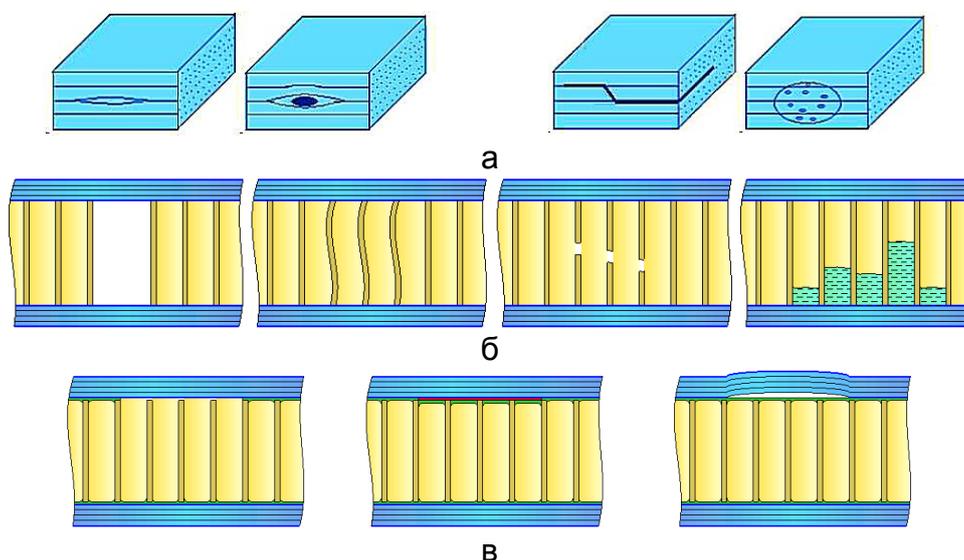


Рис. 45. Схема характерных видов дефектов композитного хвостового отсека

Для неразрушающего контроля изделий из ПКМ предназначен акустический дефектоскоп модели АД-60К (рис. 46, а). Принцип работы дефектоскопа основан на определении отличия полного акустического сопротивления (импеданса) доброкачественного участка от дефектного (рис. 46, б).

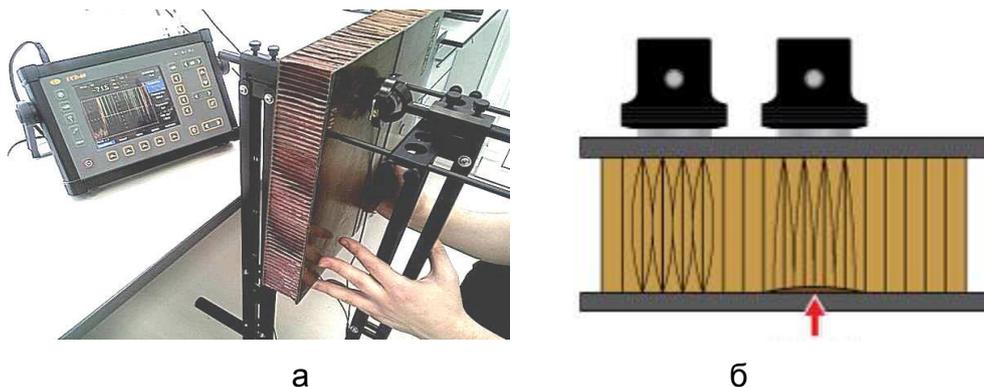


Рис. 46. Общий вид (а) и схема неразрушающего контроля непрочности композитной обшивки к сотовому наполнителю хвостового отсека (б)

На рис. 47, а показана роботизированная линия для автоматизированного неразрушающего контроля качества склеивания композитных хвостовых отсеков лопасти, на рис. 47, б – рабочий пост контроля.



Рис. 47. Общий вид роботизированной линии (а) и рабочего поста (б) неразрушающего контроля качества склеивания композитного хвостового отсека

В центральной заводской лаборатории завода проводят обязательный контроль образцов-свидетелей композитных изделий на плотность, пористость, содержание компонентов и степень полимеризации смолы (рис. 48, а).

Прочностные испытания фрагментов композитного хвостового отсека лопасти на изгиб (рис. 48, б), сжатие (рис. 48, в), растяжение, отрыв обшивки от полимерного сотового наполнителя проводят в соответствии с требованиями технических условий и паспортами на используемые материалы.

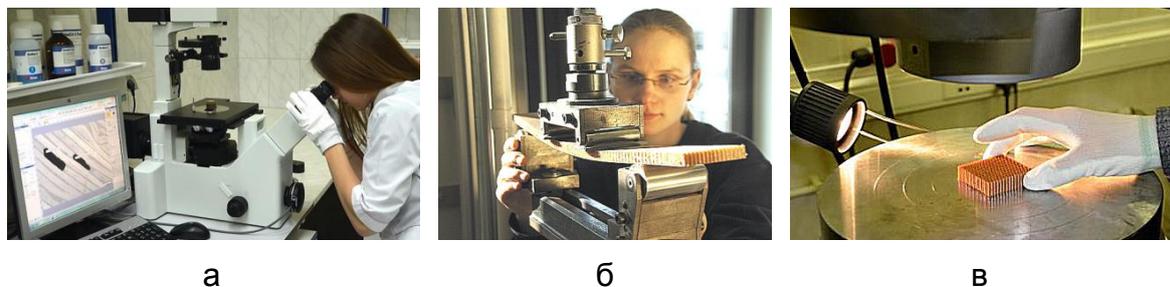


Рис. 48. Общий вид лабораторного оборудования для контроля фрагментов композитного хвостового отсека

Технология ступенчатой сборки-склеивания композитной лопасти НВ

Ступень сборки-склеивания лопасти вертолёта Ми-26 представляет собой двух-балочную конструкцию, балки опираются на кронштейны несущих колонн, которые установлены на полу корпуса и закреплены с помощью анкерных болтов. Положение лопасти в ступе – хорда лопасти вертикальна, носком вниз.

В ступе со стороны комлевой части, установлен подвижный базовый фиксатор наконечника лопасти (за отверстия и проушины), а с концевой стороны лонжерона – базовый ложемент с прижимом для фиксации [11].

На рис. 49 показана схема и компьютерная модель секции ступа для общей сборки лопасти НВ смешанной конструкции вертолёта Ми-26, которая является типовой для сборочной оснастки в лопастном производстве.

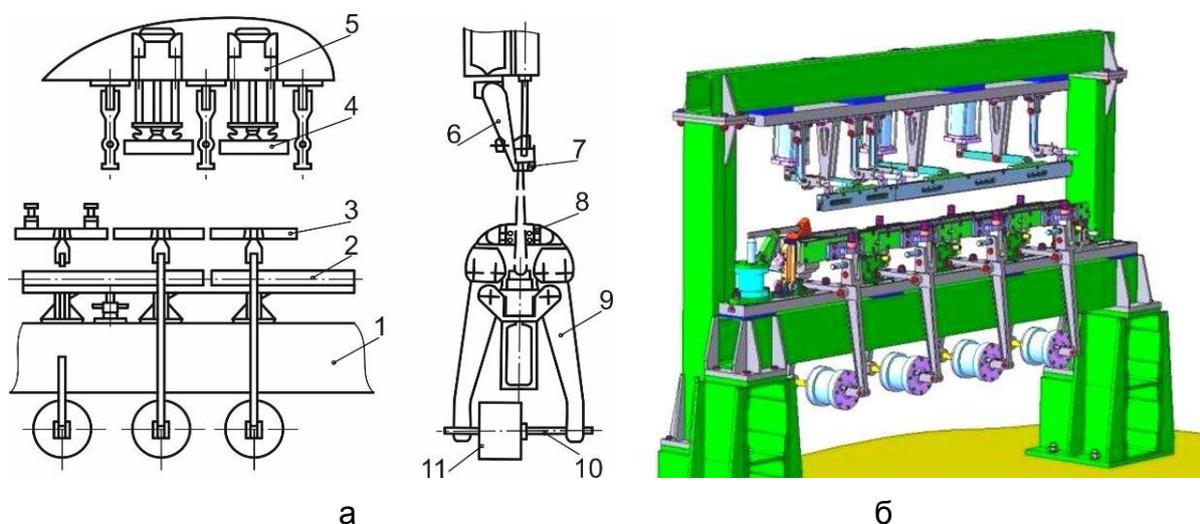


Рис. 49. Схема (а) и компьютерная модель (б) секции ступа общей сборки лопасти НВ:

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

Носовую часть лопасти НВ, как технологическую подсборку, устанавливают в ступе по промежуточным ложементам, фиксирующим её положение в пространстве. Указанные ложементы находятся на нижней балке ступа.

На нижней балке ступа также смонтированы боковые прижимы, корпуса с пневматическими камерами прижима носовой части лопасти, фиксаторы дистанции торцевых нервюр. На верхней балке ступа установлены фиксаторы – прижимы хвостовых отсеков по линии хвостовика лопасти НВ.

На рис. 50, а показан общий вид ступа общей сборки лопасти НВ тяжелого транспортного вертолета Ми-26 [11]; на рис. 50, б – компьютерная модель ложементов для базирования и закрепления носка лопасти; на рис. 50, в – этап установки композитного хвостового отсека на торцовую поверхность носовой части лопасти НВ смешанной конструкции.

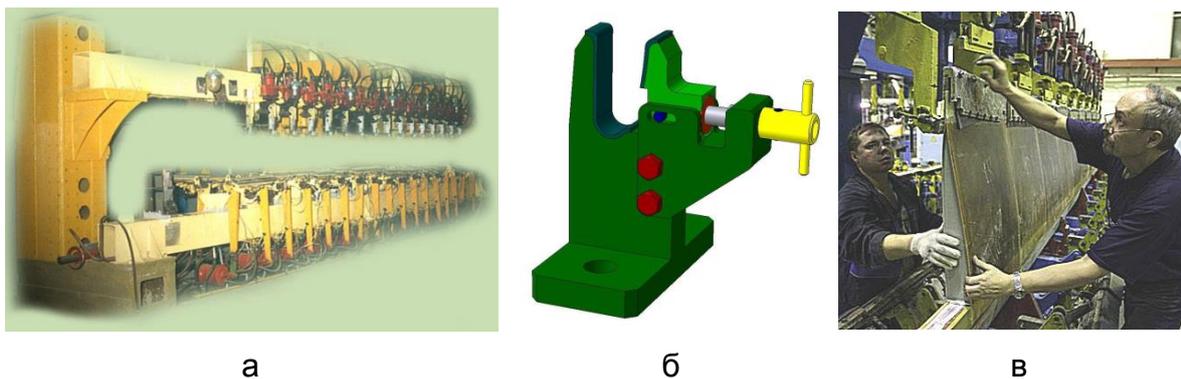


Рис. 50. Общий вид (а) и компьютерная модель ложеамента (б) стапеля общей сборки, этап установки хвостового отсека лопасти НВ в стапель (в)

Стапель оборудован электрическими элементами для нагрева зон склеивания и пневмосистемой с камерами для создания поджима склеиваемых поверхностей. Склеивание хвостовых отсеков с лонжероном лопасти в стапеле выполняют с использованием режимов клеевой пленки. Контроль и поддержание температурного режима в зоне склеивания осуществляется в автоматическом режиме.

Операция стапельной сборки-склеивания лопасти НВ вертолета Ми-26 включает в себя следующие технологические переходы [11]:

1. Подготовка стапеля к выполнению операции сборки-склеивания.
2. Проверка носовой части и хвостовых отсеков лопасти на отсутствие механических повреждений.
3. Установка носовой части лопасти на ложеамента стапеля с закреплением наконечника лонжерона по отверстиям в фиксаторах стапеля; закрепление концевой части трубчатого лонжерона прижимом в ложеаменте. Контроль геометрической кривки торца носовой части лопасти.
4. Комплектование и установка хвостовых отсеков лопасти. Демонтаж хвостовых отсеков и механическая доработка на фрезерном станке с ЧПУ для обеспечения необходимого зазора между отсеками.
5. Раскрой нетканого полотна для армирования жидкого клея, нанесение клея на заднюю стенку носовой части лопасти, прикатывание нетканого полотна к задней стенке.
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 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 задней стенке носовой части лопасти при заданном температурном режиме.
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 склеенной лопасти из стапеля и установка ее горизонтально на ложементы.

13. Зачистка излишков выдавившегося клея (рис. 51, а), осмотр носовой части и отсеков лопасти на отсутствие механических повреждений (рис. 51, б).

14. Контроль геометрических параметров лопасти на базе координатно-измерительной машины с ЧПУ (рис. 51, в).



Рис. 51. Общий вид оснащения для доводочных (а) и контрольных (б, в) операций для лопасти НВ смешанной конструкции вертолета Ми-26

Внестапельные работы для лопасти НВ смешанной конструкции

Выполнение внестапельных работ для лопасти НВ смешанной конструкции выполняют в следующей технологической последовательности [11]:

1. Установка – приклеивание технологических втулок и шайб в стыковочные отверстия наконечника лопасти НВ.
2. Монтаж разъема сигнализатора давления лонжерона (рис. 52, а).
3. Установка окантовки и стекла на обтекателе лопасти (рис. 52, б)
4. Контроль ПОС по электрическим параметрам в воздушной среде.
5. Проверка закрутки лопасти относительно базового сечения № 1 в специальном приспособлении. Измерение хорды лопасти во всех сечениях и длины лопасти относительно базовых элементов.
6. Шпатлевание и зашкуривание межлепестковых зазоров оковок и подсечек в носовой части лопасти (рис. 52, в).
7. Заполнение полости стального трубчатого лонжерона азотом, проверка герметичности системы сигнализации повреждения лонжерона.
8. Подготовка и окраска лопасти НВ в малярной камере. Нанесение эксплуатационных надписей на нижнюю плоскость лопасти (рис. 52, г).
9. Проверка ПОС лопасти в ванне с водой.
10. Размагничивание лопасти, контроль отсутствия магнетизма.
11. Отгиб пластин закрылков на отсеках лопасти НВ, проверка углов установки и отсутствия расклея в местах установки пластин закрылков.
12. Взвешивание лопасти до балансировки, установка балансировочных грузов. Контрольное взвешивание лопасти; поперечная центровка.
13. Приемочный контроль готовой лопасти НВ и сдача комплектов лопастей представителю заказчика.
14. Оформление технического паспорта на комплект лопастей.

Межоперационное перемещение готовых лопастей НВ вертолета Ми-26 производят на специальной транспортной тележке (рис. 52, д).

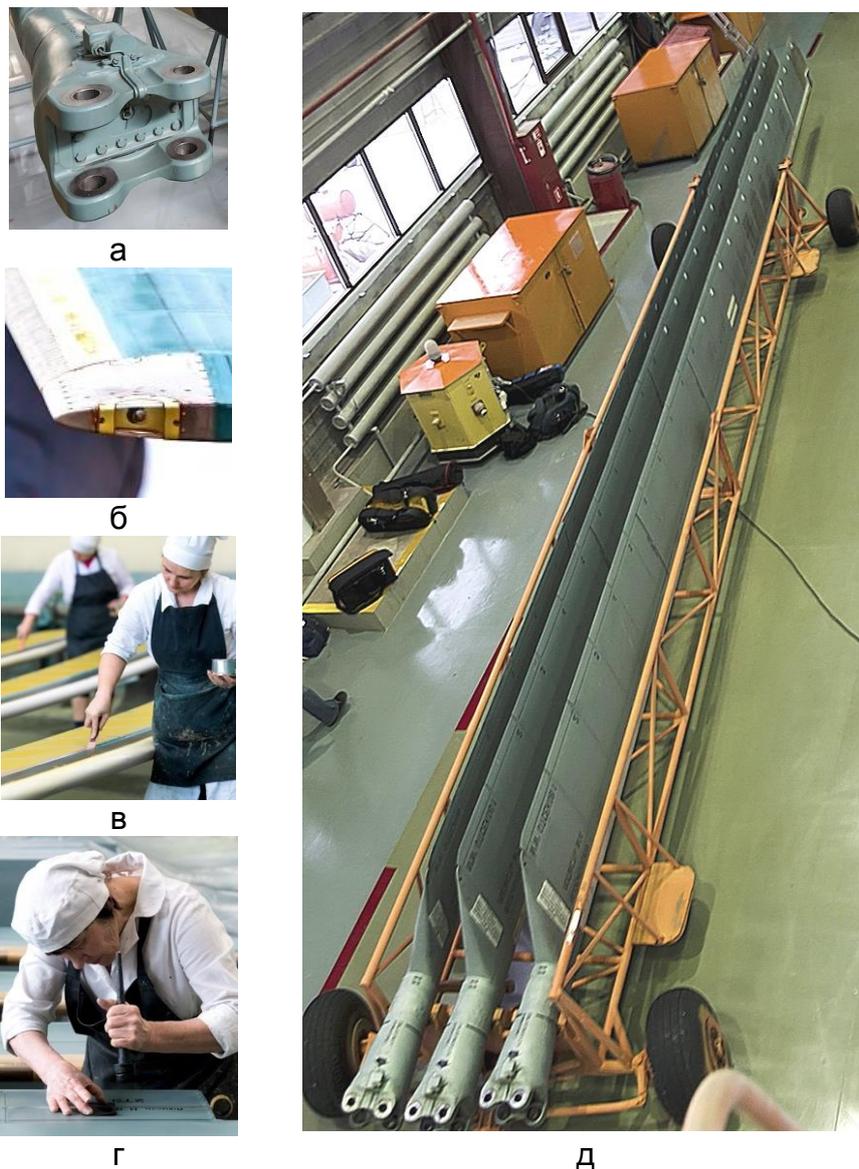


Рис. 52. Примеры выполнения некоторых внестapelных работ для лопасти НВ

Невозможность количественной характеристики отдельных параметров лопастей (параметры внешнего вида некоторых поверхностей, важных с точки зрения конструктивной прочности, пригодности для последующих технологических операций), обусловила широкое применение в лопастном производстве контрольных образцов в качестве сравнительных эталонов. Такие контрольные образцы в обязательном порядке утверждаются разработчиком [9, 11].

При производстве лопастей НВ вертолета Ми-26 используют около 50 сравнительных эталонов, среди которых, например, образцы внешнего вида:

- зашкуренной поверхности деталей из стеклопластика;
- титановой фольги до и после нанесения клея ВК-25;
- наружной и внутренней поверхностей стального трубчатого лонжерона после шлифования;

- обшивки, нервюры и пластина хвостового отсека в сборе (рис.53, а);
- лопасти НВ до и после окраски (рис. 53, б).



а



б

Рис. 53. Примеры контрольных образцов в качестве сравнительных эталонов лопасти вертолета Ми-26: а – обшивки, нервюры и пластина хвостового отсека в сборе; б – лопасти НВ до и после окраски

К числу специфических для лопастного производства методов технического контроля, необходимых для установления и подтверждения ресурса лопастей вертолета, относятся динамические испытания (рис. 54, а).

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 лопасти [11, 12].



а



б

Рис. 54. Общий вид стенов ресурсных испытаний трансмиссии и лопастей

Основные динамические испытания лопастей НВ включают в себя: испытания парных комлевых образцов лопасти в плоскости тяги и плоскости вращения (рис. 54, б), а также испытания среднего участка лопасти в плоскости тяги [8, 11, 12]. По результатам испытания исследуют характер и зоны разрушения, состояние клеевых соединений и целостности хвостовых отсеков лопасти.

Некоторые особенности эксплуатации трансмиссии вертолета Ми-26

Особенностью тяжелого вертолета Ми-26 является удобство наземного обслуживания. В фюзеляже предусмотрены технические люки (рис. 55, а) и встроенные трапы (рис. 55, б). Для обслуживания силовой установки и транс-

миссии на обтекателях двигателей имеются откидные панели, используемые как рабочие площадки (рис. 55, в, г, д, е). Для зачехления и расчехления лопастей НВ и РВ предусмотрена телескопическая тележка (рис. 55, ж).

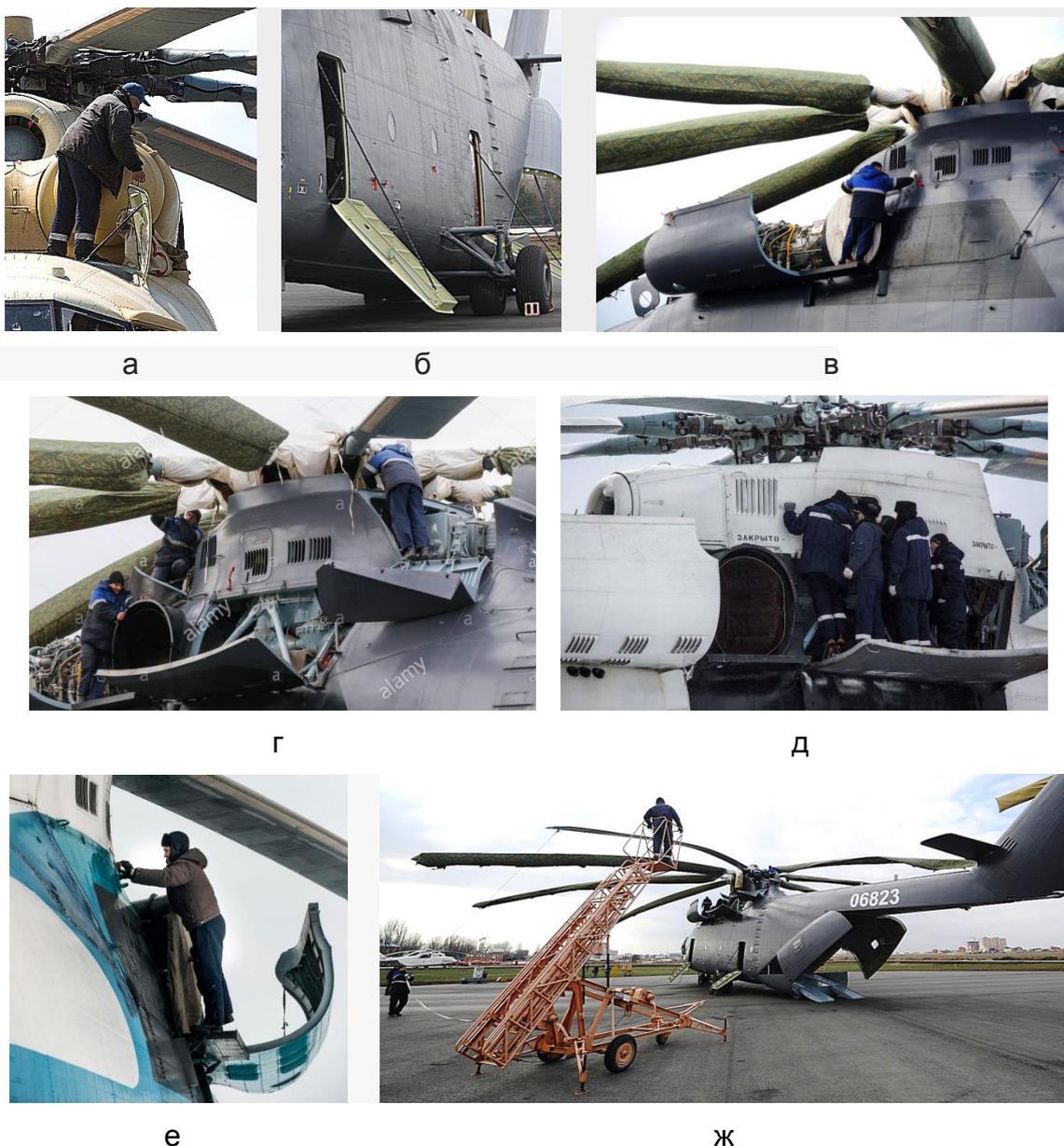


Рис. 55. Примеры высокой эксплуатационной технологичности вертолета Ми-26

Выводы

1. Проведен анализ конструктивно-технологических особенностей лопастей НВ тяжелых транспортных вертолетов. Сформулированы общие требования к конструкции лопастей НВ вертолета.
2. Рассмотрены КСС и особенности конструкционных материалов для лопастей НВ тяжелых транспортных вертолетов.
3. Представлена методика параметрического моделирования лопастей НВ вертолета, которая учитывает особенности их конструкции.

4. Лопасті НВ вертолета повинні задовольняють дуже різноманітним і часто суперечливим вимогам, які регламентовані міжнародними авіаційними правилами.

5. Обов'язковим етапом проектування лопастей НВ є обробка конструкції лопастей на технологічність з урахуванням забезпечення високої усталостної міцності силових елементів лопастей.

6. Якість особливо відповідальних агрегатів вертолета – лопастей НВ забезпечують на етапах проектування, технологічної підготовки і виробництва.

7. Використання сталі 40ХН2МА-Ш для трубчатого лонжерона лопастей НВ важкого транспортного вертолета Ми-26 обумовлено високою міцністю, в'язкістю і глибокою прокаливаемістю даної марки сталі.

8. Одним з технологічних шляхів підвищення довговічності лопастей НВ змішаної конструкції є обробка сталевих трубчатих лонжеронів методами поверхневого пластичного деформування.

9. Потрібний аеродинамічний профіль носової частини лопастей НВ змішаної конструкції вертолета Ми-26 утворюється склопластиковою обшивкою, яка підкріплена приклеєними компенсаторами, носовими вкладками і опорними бобышками.

10. Система сигналізації пошкодження трубчатого лонжерона потребує формування повітропроводячих каналів з допомогою фторопластових шнурів.

11. Сотові блоки з полімерсотопласта на відміну від алюмінієвої фольги мають високу еластичність і потребують термофіксації після розтягнення.

12. Композитні обшивки і нервюри хвостових секцій лопастей потребують обов'язкового контролю зразків-свідетелів на щільність, пористість, збереження компонентів і ступінь полімеризації смоли.

13. Композитні хвостові секції лопастей потребують міцнісних випробувань фрагментів на вигин, стиснення, розтягнення, відірвання обшивки від полімерного сотового заповнювача.

14. Забезпечення якості при виробництві лопастей досягають шляхом використання технічно обґрунтованих методів об'єктивного контролю параметрів технологічних процесів, деталей, вузлів і готових лопастей.

15. До числа специфічних для лопастного виробництва методів технічного контролю, необхідних для встановлення і підтвердження ресурсу лопастей вертолета, відносяться динамічні випробування.

16. Важкі транспортні вертолети потребують спеціальних конструкторських рішень для забезпечення експлуатаційної технологічності при наземній обслуговуванні силової установки і трансмісії (технічні люки, капоти з відкидними панелями, лазы і вбудовані трапи).

Список литературы

1. Конструирование агрегатов и систем вертолётотв: 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.

2. Далин, В. Н. Конструкция вертолётотв: учебник / В. Н. Далин, С. В. Михеев. – М.: МАИ, 2001. – 352 с.

3. Дудник, В. В. Конструкция вертолетов /В. В. Дудник. – Ростов н/Д: Издательский дом ИУИ АП, 2005. – 158 с.
4. Богданов, Ю. С. Конструкция вертолетов: учебник / Ю. С. Богданов, Р. А. Михеев, Д. Д. Скулков. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. Конструкция и прочность самолетов и вертолетов: учебник / К. Д. Миртов, М. С. Воскобойник, Г. С. Лагосюк и др., под общ. ред. К. Д. Миртова и Ж. С. Черненко – М.: Транспорт, 1972.– 440 с.
6. 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.
7. Голенков В. А., Радченко С. Ю. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки. – М.: Машиностроение, 1997. – 226 с.
8. Проектирование тяжелых одновинтовых вертолетов и их трансмиссий: учебник. Ч. 1. /А. Г. Гребеников, А. М. Гуменный, Ю. В. Дьяченко и др. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 331 с.
9. 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.
10. 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.
11. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов /Б. Н. Слюсарь, М. Б. Флек, Е. С. Гольдберг и др. – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. – 230 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.

References

1. 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.
2. Dalin, V.N., Miheev, S.V. *Konstruktsiya vertoletov: Uchebnik* [The Design of the Helicopters]. Moscow. Moscow Aviation Institute, Publ., 2001. – 352 p.
3. Dudnik, V. V. *Konstrukcija vertoletov* [Helicopter design]. Rostov n/D, Izdatel'skij dom IUI AP Publ., 2005. – 158 p.
4. Bogdanov, Yu. S., Miheev, R. A., Skulkov, D. D. *Konstruktsiya vertoletov: Uchebnik* [The Design of the Helicopters]. Moscow. Mashinostroenie, Publ., 1990. – 272 p.
5. Mirtov, K. D., Voskoboynik, M. S., Lagosyuk, G. S. *Konstruktsiya i prochnost samoletov i vertoletov: Uchebnik* [The Design and Strength of Aircraft and Helicopters]. Moscow. Transport, Publ., 1972. – 440 p.
6. Grebenikov, A. G., Vorob'ev, Ju. A., Fomichev, P. A. *Integririvannoe 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.

7. Golenkov V. A., Radchenko S. Yu. *Tekhnologicheskiye protsessy obrabotki metallov davleniyem s lokal'nym nagruzheniyem zagotovki* [Technological processes of metal forming with local loading of the workpiece]. Moscow. Mechanical Engineering. Publ., 1997. – 226 p.

8. Grebenikov, A.G., Gumennyj, A.M., D'jachenko, P.A. *Proektirovanie tjazhelyh odnovintovyh vertoletov i ih transmissij. Ch. 1. Uchebnik*. [Design of heavy single-rotor helicopters and their transmissions]. Khakov. Zhukovsky National Aerospace University, Kharkiv Aviation Institute. Publ., 2007, 331p.

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

10. *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.

11. Sljusar', B.N., Flek, M.B., Gol'dberg, E.S. *Tehnologija vertoletostroenija. Tehnologija proizvodstva lopastej vertoletov i aviacionnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov* [Helicopter technology. The production technology of helicopter blades and aircraft structures made of polymer composite materials]. Rostov n/D, JuNC RAN Publ., 2013, 230 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.

Надійшла до редакції 21.10.2021, розглянута на редколегії 25.10.2021

Аналіз конструктивно-технологічних особливостей лопатей несучих гвинтів важких транспортних вертольотів

Проведено аналіз конструктивно-технологічних особливостей лопатей несучих гвинтів (НГ) важких транспортних вертольотів. Наведено основні льотно-технічні характеристики (ЛТХ) важких вертольотів. Сформульовано загальні вимоги до конструкції лопатей НГ вертольота і технічні умови для їх виробництва. Розглянуто конструктивно-силову схему (КСС) лопаті НГ важкого вертольота. Відмічено особливості конструкційних матеріалів для виготовлення лопатей НГ важкого транспортного вертольота. Лопаті НГ розрізняють за своєю конструкцією з огляду на різні підходи до матеріалів, виготовлення і компонування їх елементів. Лопаті НГ суцільнометалевої конструкції з конструкторських і технологічних міркувань поділяють на дві групи: каркасні конструкції з трубчастим сталевим лонжероном і з алюмінієвим пресованим лонжероном. У результаті ряду вжитих конструктивних і технологічних заходів ресурс лопаті НГ вертольота Мі-6 був доведений з 50 год до 1500 год. Принципова особливість сталевого трубчастого лонжерона лопаті НГ вертольота Мі-26 – відсутність окоренового наконечника. Наведено особливості конструкції лопатей НГ змішаної конструкції. Подано методику параметричного моделювання лопаті НГ вертольота. Застосування в практиці проектування і конструювання тривимірних параметричних моделей елементів конструкції дає можливість проводити числові розрахунки аеродинамічних і

міцнісних характеристик як окремих агрегатів, вузлів і деталей, так і всього вертольота в цілому за допомогою методу скінченних елементів. Метод параметричного моделювання лопаті НГ транспортного вертольота за допомогою комп'ютерної системи CATIA V5 є модифікацією методу інтегрованого проектування елементів авіаційних конструкцій. Параметрична майстер-геометрія лопаті НГ являє собою лінійчату поверхню, створену з базових профілів лопаті. На базі параметричної майстер-геометрії будують модель розподілу простору, яка визначає положення осьових площин силового набору лопаті для подальшої побудови моделей деталей лопаті. Подано технологічний маршрут виготовлення лопаті НГ, розглянуто технологію виготовлення і поверхневого зміцнення сталевого трубчастого лонжерона. Описано технологію виготовлення і формування носової частини лопаті НГ змішаної конструкції. Розглянуто технологічні особливості stapельного складання-склеювання лопаті НГ, наведено зміст внестапельних робіт.

Подані матеріали можуть бути корисними при проведенні теоретичних і експериментальних досліджень щодо продовження ресурсу лопатей НГ вертольотів Мі-26, які в цей час експлуатуються в Україні.

Ключові слова: лопать змішаної конструкції, конструктивно-силова схема, наконечник, сталевий трубчатий лонжерон, stapельне складання.

Analysis of design and technological features of the main rotor blades of heavy transport helicopters

The analysis of the design and technological features of the rotor blades of heavy transport helicopters is carried out. The main performance characteristics of heavy helicopters are presented. General requirements to helicopter main rotor blades design and specifications for their production are formulated. The design and force diagram of heavy helicopter main rotor blades is considered. The features of structural materials for the main rotor blades of heavy transport helicopters are marked. The main rotor blades differ in their design due to different approaches to materials, manufacturing and layout of blade elements. The main rotor blades of an all-metal design, for design and technological reasons, are divided into two groups: a frame structure with a tubular steel spar and an aluminum extruded spar. As a result of a number of design and technological measures the service life of the main rotor blade of helicopter Mi-6 was brought from 50 hours to 1500 hours. The principal peculiarity of the steel tubular spar of the main rotor blade of the Mi-26 helicopter is the absence of the shaft lug. The features of mixed design main rotor blades are presented. The method of parametric modeling of helicopter main rotor blades is presented. The application of the three-dimensional parametric models of structural elements in practice of designing and construction enables to perform numerical calculations of aerodynamic and strength characteristics both of separate aggregates, units and details and of the helicopter as a whole by means of the finite element method. The method of parametric modeling of the main rotor blade of the transport helicopter with the computer system CATIA V5 is a modification of the method of integrated designing of the elements of aviation constructions. Parametric master geometry of the main rotor blade is a linear surface, created by basic profiles of the blade. On the basis of parametric master geometry a space distribution model is created that determines the position of axial planes of the power set of the blade for further creation of the blade detail models. Technological flowchart of main rotor blade manufacturing is presented, manufacturing and surface hardening technology of

steel tubular spar is considered. The technology of manufacturing and molding the nose part of the blade of the main rotor mixed design. The technological features of slipway assembly-gluing of the main rotor blade are considered, the content of off-slipway work is given.

These materials can be useful in theoretical and experimental studies to extend the service life of the rotor blades of Mi-26 helicopters, which are currently in operation in Ukraine.

Keywords: mixed blade design, structural-force diagram, tip, steel tubular blade spar, slipway assembly.

Сведения об авторах:

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

ORCID: 0000-0002-1509-0665.

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

Коцюба Виктор Юрьевич – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора по созданию и модернизации вертолетной техники АО «Мотор Сич» – начальник опытно-конструкторского бюро, Запорожье, Украина

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

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, доцент каф. 104 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: iren1986@ukr.net