

УДК 678.5.067

А.В. ГАЙДАЧУК<sup>1</sup>, А.В. КОНДРАТЬЕВ<sup>1</sup>, Е.В. ОМЕЛЬЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>Харьковское государственное авиационное производственное предприятие, Украина

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АВИАКОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Разработана многоуровневая классификация технологических дефектов, возникающих в процессе производства конструкций авиационно-космической техники из полимерных композиционных материалов. В основу классификации положены фундаментальные принципы и правила теории классификации. Приведен классификатор, содержащий 8 видов типовых дефектов, включающий 24 класса. Классификатор предназначен для синтеза обоснованных полей допусков на технологические отклонения параметров изделия от заложенных в проектной документации и прогнозирования возможностей снижения дефектов в серийном производстве по мере освоения изделия.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, классификация, технологический дефект, поле допусков, серийное производство.

### Введение

Известно, что в период технологической подготовки и начальных стадий освоения в серийном производстве новых авиационных изделий вообще, а интегральных композитных конструкций в особенности, имеет место достаточно большое количество и разнообразие технологических дефектов [1, 2]. Уровень этих дефектов часто превышает допустимый по требованиям конструкторской документации (КД) и, следовательно, приводит к браку изделий.

Многие из этих дефектов являются следствием недостаточной отработки ряда технологических процессов в опытном производстве и (или) ошибок в КД до ее передачи в серийное производство. Другая часть дефектов вызвана недоработками оснащения, отклонениями в технологических режимах, влиянием человеческого фактора непосредственно в серийном производстве [3, 4].

В связи с этим представляется необходимой разработка классификатора типовых технологических дефектов с последующим анализом их причинно-следственной связи между собой, степени влияния на несущую способность интегральных конструкций в эксплуатации, а также путей и способов их устранения или снижения до безопасного уровня.

Этим вопросам посвящена настоящая работа.

### Результаты исследований

Интегральная конструкция из полимерных композиционных материалов (ПКМ) представляет со-

бой конструкцию, которая формируется (собирается) из неотвержденных или частично отвержденных компонентов с возможностью присоединения к ним так же и отвержденных элементов и последующим совместным формованием всей конструкции за один технологический цикл. Процесс формования за один технологический цикл нескольких заранее полученных элементов, например, прессованием, намоткой или выкладкой, как правило, неотвержденных или частично отвержденных в едином конструкционном узле с последующим совместным отверждением под давлением, можно назвать интегральным. Технологическая оснастка для осуществления интегрального процесса обычно многокомпонентна и сложна [5].

Использование принципа интегральности при создании конструкций из ПКМ в общем случае повышает несущую способность конструкции, снижает себестоимость и сокращает технологический цикл изготовления. При создании конструкций интегрального типа этапы проектирования, разработки технологии, изготовления и конструирования многокомпонентной технологической оснастки (устройств) слиты воедино. Конструкция и материалы технологической оснастки непосредственно влияют на качество и стоимость изготовленных в ней деталей из КМ. Поэтому недостаточно тщательно разработанные процесс и оснастка могут привести к низкой прочности соединений элементов конструкций, расположенных под прямым углом (обшивка-лонжерон, обшивка-нервюра, пояс лонжерона-стенка), из-за недостаточной прочности ПКМ на сдвиг и отрыв, технологических дефектов и концентраторов

напряжений в местах соединений. Для снижения влияния указанных дефектов могут быть использованы прошивка, заформовка иглолок, применен клей, эластичная оснастка [5, 6].

Впервые укрупненная классификация технологических несовершенств в конструкциях из ПКМ была предложена в работе [1] с последующим развитием в [2] и изложением в учебниках для вузов [3, 4]. В этих работах многообразие встречающихся

в технологической практике несовершенств сведено к минимальному количеству типовых по технологическим признакам. На рис. 1 показана классификация типовых технологических несовершенств КМ, возникающих в элементах конструкций при их производстве [3, 4].

Отклонения в процентном содержании связующего  $\Delta\theta$  от регламентированного  $[\theta]$ , влияют на физико-механические и прочностные свойства КМ.



Рис. 1. Схема типовых технологических несовершенств полимерных КМ

При регулярном отклонении, вызванном нестабильностью регулирования привеса связующего в процессе пропитки препрега или волокон, регламентация свойств КМ состоит в обеспечении свойств материала изделия.

Так как основными причинами возникновения локализаций с повышенным или пониженным  $\theta$  являются неровности пропиточных валков и система регулирования натяжения препрега в пропиточной машине (наплывы связующего), то геометрические размеры прогнозируемых локализаций должны выбираться в соответствии с разрешающей способностью пропиточного оборудования.

Отклонения в структуре армирования связаны с регулировкой намоточных приспособлений и агрегатов, жесткостью (стабильностью) технологической системы станок - приспособление - оправка - нить (СПОН), а также квалификацией операторов, производящих выкладку препрега (шпона), и качеством применяемых при этом приспособлений.

Образование складок наблюдается при пропитке в замкнутой пресс-форме при высоких давлениях. Механизм складкообразования зависит от объемной

плотности пакета, типа наполнителя, коэффициента трения между пакетом и пресс-формой, вязкости связующего и других факторов.

Нарушения сплошности КМ возможны четырех типов: регулярные воздушные включения (поры); одиночные и групповые локальные включения (непроклей); одиночные и групповые порезы и нестыки слоев; сквозная и несквозная локальная непропитка.

По месту расположения КМ, причинам возникновения, а также по степени влияния на прочность материала различают два вида пористости: поры в связующем, между слоями армирующего материала; поры, расположенные внутри армирующей нити между элементарными волокнами.

Пористость в связующем появляется в результате неправильного его приготовления или нанесения на поверхность изделия. Пузырьки воздуха попадают в смолу при ее перемешивании с инициаторами, замедлителями, красителями и т. д. Когда такую смолу наносят на волокнистый материал, воздушные пузырьки оказываются в материале конструкции.

Появление пористости внутри армирующей нити объясняется теми же причинами, что и в связующем, в первом случае она имеет ряд своих специфических предпосылок, например, трудность проникновения связующего в пространство между волокнами, занятое воздухом. Поэтому, если связующее имеет чрезмерно большую вязкость или очень быстро полимеризуется, может иметь место неполная пропитка нити.

Причиной возникновения пористости в армирующей нити может быть и отсутствие подходящего для данного связующего аппретирующего состава, покрывающего волокна. Пористость появляется также в результате использования армирующего материала повышенной влажности. В процессе термических реакций при отверждении излишняя влага в армирующем материале испаряется, пары воды, попадая в смолу, остаются в ней, образуя мелкие включения (пустоты).

Локальные воздушные включения (непроклеи) представляют собой пустоты вытянутой или округлой формы, расположенные в связующем между слоями армирующего материала. Чаще всего они находятся в контакте с одним или двумя слоями ткани, между которыми они расположены, и возникают при послойной укладке армирующего материала. Воздух, захватываемый армирующим материалом в момент его укладки, остается под ним и образует в смоле воздушный пузырь.

Воздушные включения в материале конструкции возникают также вследствие неправильной укладки армирующего материала по стыкам. При изготовлении крупногабаритных конструкций армирующая ткань укладывается в несколько рядов; если в местах соединения полотнищ ткань недостаточно уплотнена по стыкам, то могут появиться воздушные включения. Непроклеи могут образовываться вследствие слабой адгезии между отдельными слоями армирующего материала из-за неравномерного распределения связующего. Места, обедненные смолой, не обеспечивают хорошей связи между соседними слоями армирующего материала. Слабая адгезия наблюдается и в том случае, когда процесс изготовления конструкций (вследствие технологических условий или производственной необходимости) прерывается. При возобновлении работ волокнистый материал укладывают на отвержденную поверхность пластика, которая кое-где может оказаться неровной». При этом адгезия между слоями уменьшается, а в отдельных случаях и вообще нарушается, что приводит к частичному расслоению.

Особенно часто непроклеи и расслоения изделий из КМ встречаются в местах перегиба конструкций, имеющих резкие переходы из одной плоскости в другую. Непроклеи КМ могут возникать

также при изготовлении крупногабаритных деталей с использованием оснастки для обжатия конструкций. Качество материала в этом случае зависит от жесткости оснастки и правильности соединения полуформ. Воздух, попадая между поверхностями соединяемых полуформ, может оставаться внутри детали, а после полимеризации могут обнаруживаться расслоения. Несовременная схема обжатия оснастки также приводит к образованию воздушной полости внутри детали.

Расслоения встречаются в соединениях наружной обшивки в приформовках силового набора. Качество соединения в этом случае в основном зависит от подготовки поверхности соединяемых конструкций, причем некачественная зачистка приводит к отслоению закладных элементов.

Появление микротрещин связано с напряжениями при усадке связующего в процессе его полимеризации. Отверждение КМ иногда сопровождается выделением большого количества тепла, вследствие чего температура внутри материала может достигать значительной величины. В процессе охлаждения изделия в результате различных коэффициентов температурного расширения волокон и связующего возникает концентрация напряжений, что и приводит к возникновению трещин.

Местные трещины полимерного связующего могут также возникать вследствие концентрации напряжений из-за плотной упаковки арматуры из параллельных волокон.

Концентрация напряжений от плотности упаковки волокон усиливается температурными остаточными напряжениями, вызванными разными коэффициентами термического расширения волокон и полимерного связующего, которые появляются в процессе охлаждения КМ после его отверждения.

Локальная пропитка зависит от качества валиков пропиточной машины или от конфигурации оснастки и расположения источников при пропитке под давлением. Эти факторы определяют возможную геометрию локализаций.

Локализации в виде надрезов слоев – это следствие слесарной операции при разьеме и зачистке готового изделия оператором, а нестыковки – при небрежностях рабочего в процессе выкладки препрега.

Посторонние включения, т.е. мелкая шлаковая пыль, заносимая вентиляцией, обрывки волокна и другие, не предусмотренные в составе КМ, попадая под слой волокнистого материала, мешают его уплотнению; в районе этого включения собирается связующее либо остается воздух.

Локальные сквозные пережоги, как правило, связаны с серьезным нарушением технологического процесса полимеризации (термостабилизации) изделия.

Такие несовершенства при формировании интегральных авиаконструкций из КМ, как технологическая погибь, в большинстве технологических процессов практически неизбежны и связаны с термолупругими характеристиками компонентов КМ. Технологическое коробление элементов конструкции может быть существенно снижено применением специальных процессов формирования, а также изменением структуры пакета, достигаемым соответствующим чередованием армирующих слоев.

Каждый из рассмотренных выше дефектов отрицательно сказывается на физико-механических свойствах изделий из КМ. Степень влияния определяется видом дефекта, его размером, местоположением и условиями работы материала.

Таким образом, предложенный в [1] и нашедший практическое применение [2-4] классификатор типовых дефектов полимерных КМ, которые по-видимому следует отнести к полученному на основе классификаций вспомогательного типа [7-8], дающих возможность эффективно найти тот или иной индивидуальный объект какого-либо множества по внешним легко обозримым данным.

Этот классификатор не является полным, так как не позволяет осуществить прогнозирование и учет технологических дефектов конструкций авиакосмической техники (АКТ) из ПКМ как в процессе проектирования, так и в процессе изготовления.

По-видимому, необходима классификация этих дефектов, позволяющая выявить и систематизировать средства и способность их нейтрализации или снижения в производстве.

Близкими к идее такого классификатора является предложенный в [9] классификатор дефектов сотовых конструкций, возникающих на разных этапах технологического цикла их изготовления.

Преимуществом этого классификатора является его опора на фундаментальные положения теории классификаций и принцип математической логики деления объема понятий, а также основным правилам деления объема понятия [8]:

– в одной и той же классификационной ветви необходимо применять одно и то же основание – признак, позволяющий родственное понятие нижеследующей составляющей разделить на его виды, классы, подклассы, группы и подгруппы более низкого уровня этой структуры;

– соразмерности деления классификационной ветви, т.е. объем ее составляющих должен соответствовать полному объему основания деления понятия;

– составляющие одной классификационной ветви должны взаимно исключать друг друга, т.е. ни одна составляющая не должна входить в объем другой;

– подразделение на составляющие структуры нижестоящих уровней должно быть непрерывными, отвечая принципу плавного изменения степени сходства между ними.

В качестве высшей структуры деления объема понятия-категории может быть выбрано любое, достаточно общее понятие, которое в свою очередь может быть дифференцировано по схеме: категории-виды-классы, подклассы-группы-подгруппы.

В рассматриваемой сфере понятий наивысшим его объемом (иерархом) является «дефекты конструкций технических систем». Первичным сужением этого понятия в [9] принято понятие «дефекты конструкций АКТ», а вторичным – «дефекты сотовых конструкций АКТ». Именно это понятие, по-видимому, следует принять в качестве исходного в иерархии рассматриваемой классификации. Основанием деления объема этого понятия на видовые является общий признак – происхождение (природа) дефектов сотовых конструкций АКТ (СК АКТ).

В соответствии с этим в качестве видов приняты виды дефектов СК, включающие в себя: дефекты, являющиеся следствием ошибок проектирования объекта (нормирование воздействий, расчета и выбора конструктивных решений); дефекты, возникающие в нормированных условиях эксплуатации и дефекты, связанные с технологией изготовления объекта.

Деление понятия на классы осуществляется на основе общего для них признака (основания) – конструктивный элемент СК АКТ, в котором проявляется дефект того или иного вида.

Для классификационных ветвей этого вида понятия, в том числе и для дефектов технологии производства СК АКТ, в качестве основания его деления принят этот общий признак, реализованный четырьмя конструктивными элементами СК, включающими сотовые заполнители (СЗ), несущие слои (обшивки) СК, узлы соединений СЗ с несущими слоями СК и связи СЗ с несущими слоями и узлами соединений (рис. 2).

Однако работа [9] позволила обоснованно выделить только все составляющие СК и верхний уровень видов их дефектов, не конкретизируя классы, подклассы и группы дефектов каждого вида, без сопоставления нижних уровней классификации с технологическими операциями их возникновения и уровнями вплоть до вскрытия характера их интегрального влияния на соответствующую конечную продукцию.

Отсутствие результатов таких исследований не дает возможности регламентации допусков на соответствующие группы дефектов, интеграция которых по вертикали снизу доверху позволила бы установить технологически обоснованное качество продукции (СК и СЗ).

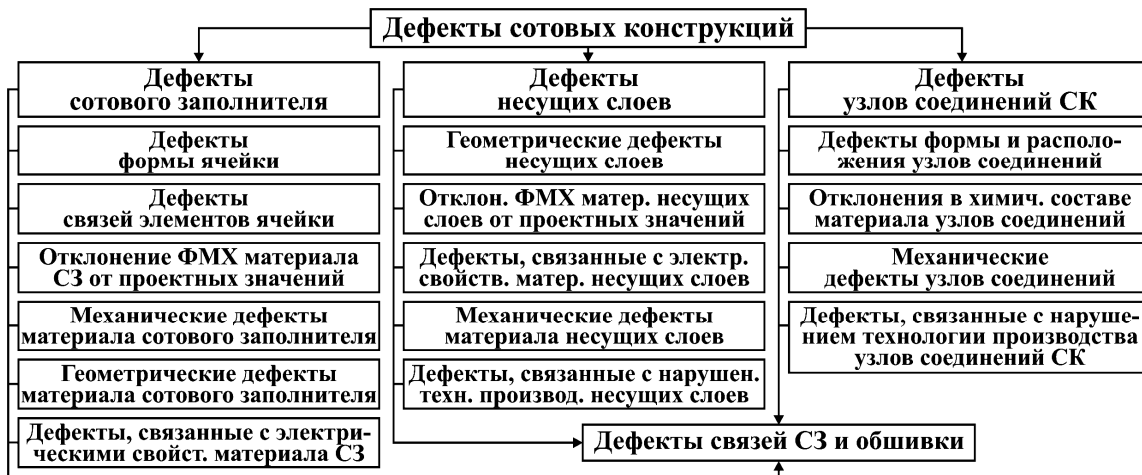


Рис. 2. Классификация дефектов СЗ и СК, возникающих на разных этапах технологического цикла их изготовления

В связи с этим в [10] сделана попытка синтеза полной классификации дефектов СЗ как основной составляющей СК.

В результате всестороннего анализа, основывающегося на эвристическом подходе применительно к исследованиям технологии получения СЗ изметаллической фольги, и производственного опыта в работе [10] разработан классификатор СЗ, верхний уровень которого представлен на рис. 3.

Как утверждает автор [10], предложенный классификатор СЗ позволяет в достаточной для практики степени глубины проводить исследования, направленные на научное обоснование полей допусков на все виды дефектов по принципу их влияния на конечный характер эксплуатационной эффективности СК АКТ путем разработки и реализации соответствующих математических моделей и основанных на них методик анализа количественных характеристик индивидуального и интегрального влияния этих дефектов.

Отмечая неоспоримую эффективность предложенного в [10] классификатора как в аспекте его основания на фундаментальные положения и правила теории классификаций [7, 8], так и в плане практической реализации применительно к СЗ, представляется необходимым отметить и некоторые замечания относительно исходной цепочки, на которой построены классификационные уровни.

Прежде всего по горизонтали за видом дефекта представляется оправданным разместить его класс, раскрывающий видовые особенности дефекта. Затем в горизонтальной цепочке признаков после технологической операции возникновения дефекта ввести признак причины возникновения дефекта. После этого признака для конструкций АКТ из ПКМ представляется оправданным вместо дифференцированными для СЗ первичной и вторичной стадиями проявления дефекта ввести интегральную стадию его

проявления, так как для рассматриваемого объекта классификации установления различных стадий проявления, как правило, невозможно, затруднительно или не информативно.

С учетом отмеченных замечаний ниже представлена многоуровневая классификация дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций АКТ из полимерных КМ (рис. 4).

В классификаторе выделено 8 видов дефектов, включающих 24 класса.

## Вывод

Предложенный многоуровневый классификатор позволит проводить анализ влияния всех видов дефектов и их классов на базе соответствующих математических моделей, направленных на поиск обоснованных полей допусков с целью прогнозирования технологических возможностей серийного производства прогрессивных интегральных конструкций АКТ из полимерных композиционных материалов, а также динамики их снижения по мере освоения изделия.

## Литература

1. Гайдачук В.Е. Теоретические основы технической подготовки производства авиаконструкций из композиционных материалов: дис. ... докт. техн. наук: 05.07.04 – технология производства летательных аппаратов / Гайдачук Виталий Евгеньевич – Х., 1979. – 438 с.
2. Гайдачук В.Е. О возможности регламентации технологических несовершенств в конструкциях из композиционных материалов / В.Е. Гайдачук, Н.Б. Воронцов, А.И. Рукавишников // Прочность конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. / М-во высш. и среднего спец. образования СССР, Харьк. авиац. ин-т им. Н.Е. Жуковского. – Х., 1981. – Вып. 6. – С. 124-129.

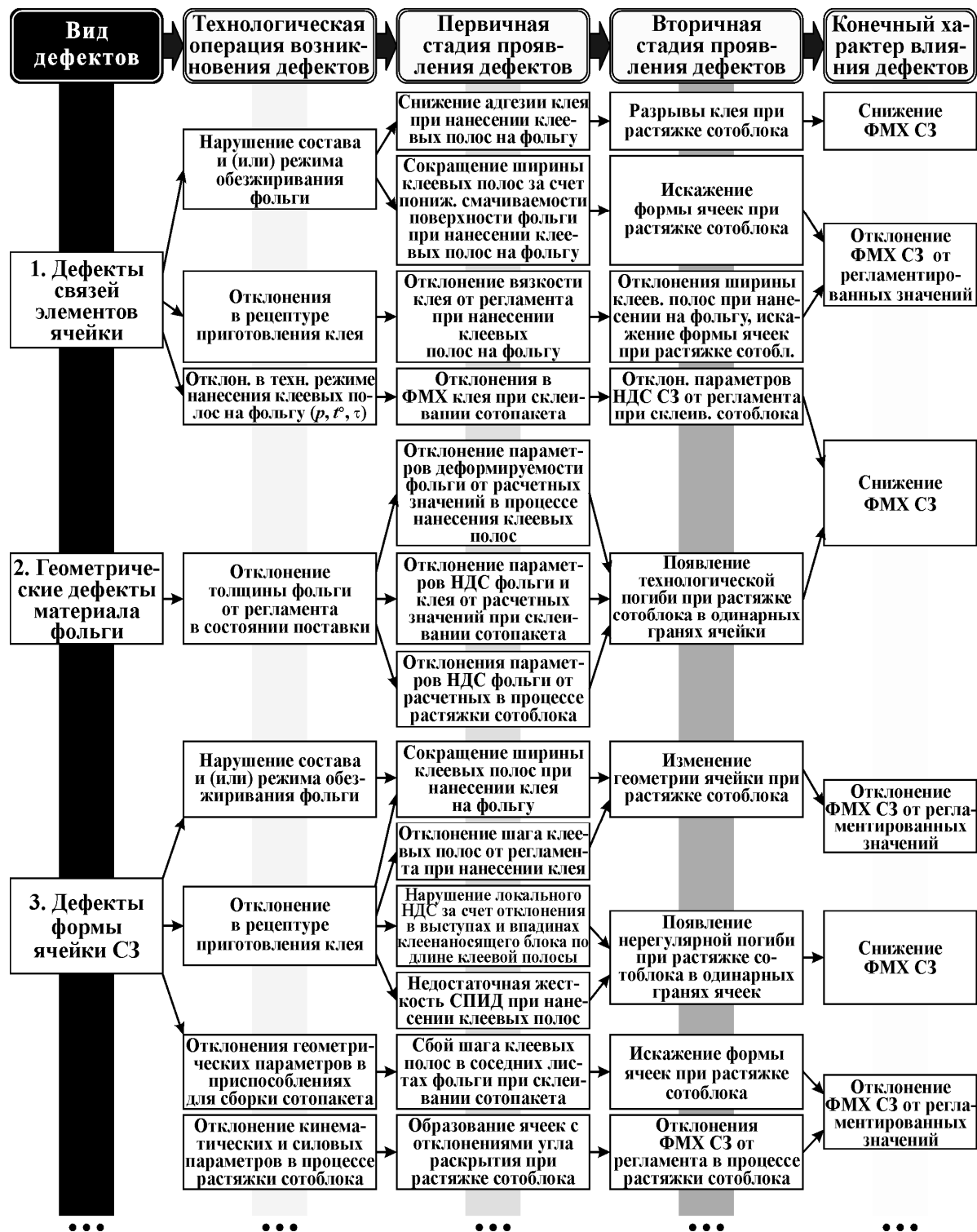


Рис. 3. Классификатор дефектов заполнителей металлической фольги (верхний уровень)

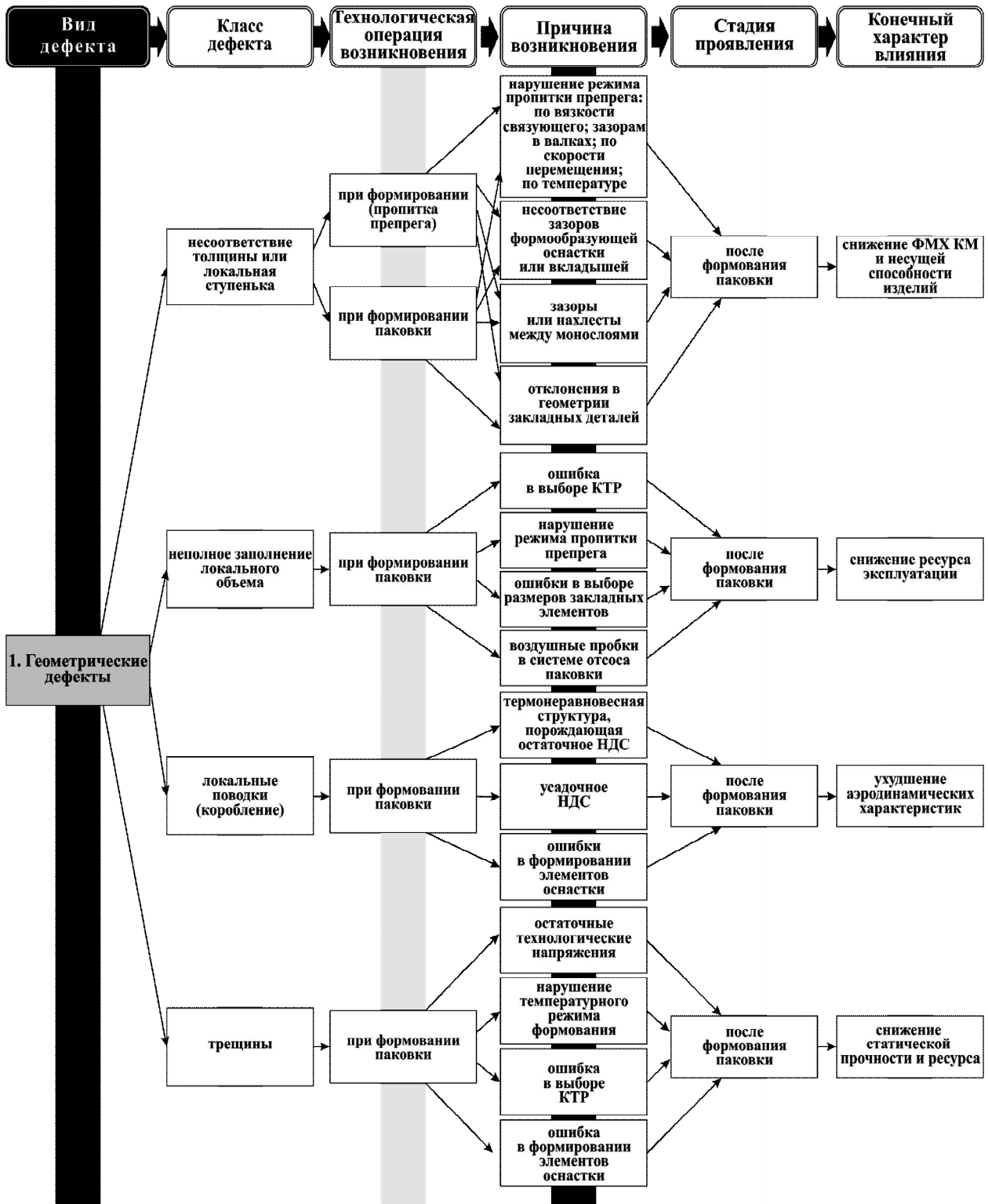


Рис. 4. Классификатор дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций АКТ из полимерных КМ

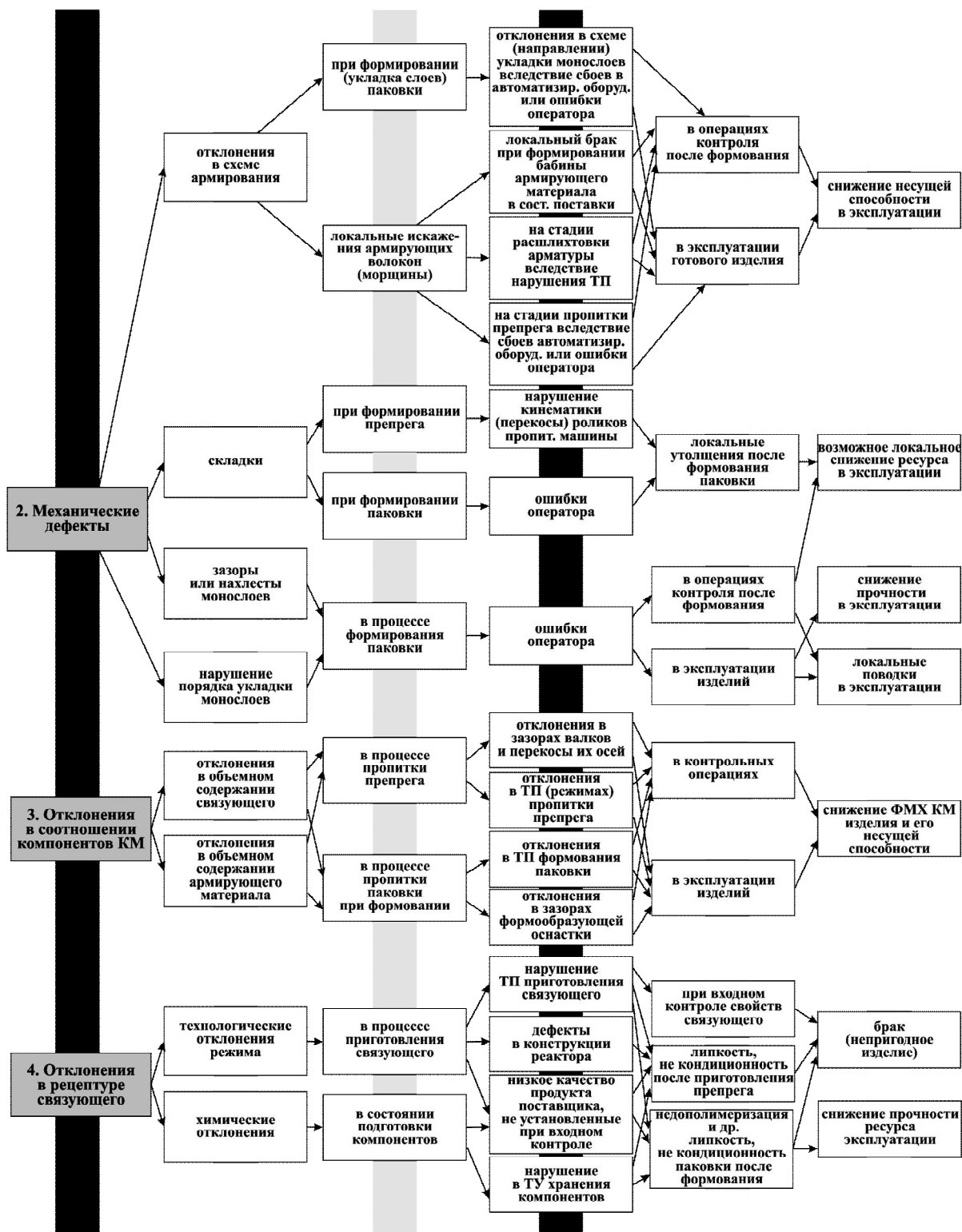


Рис. 4. Классификатор дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций АКТ из полимерных КМ (продолжение)



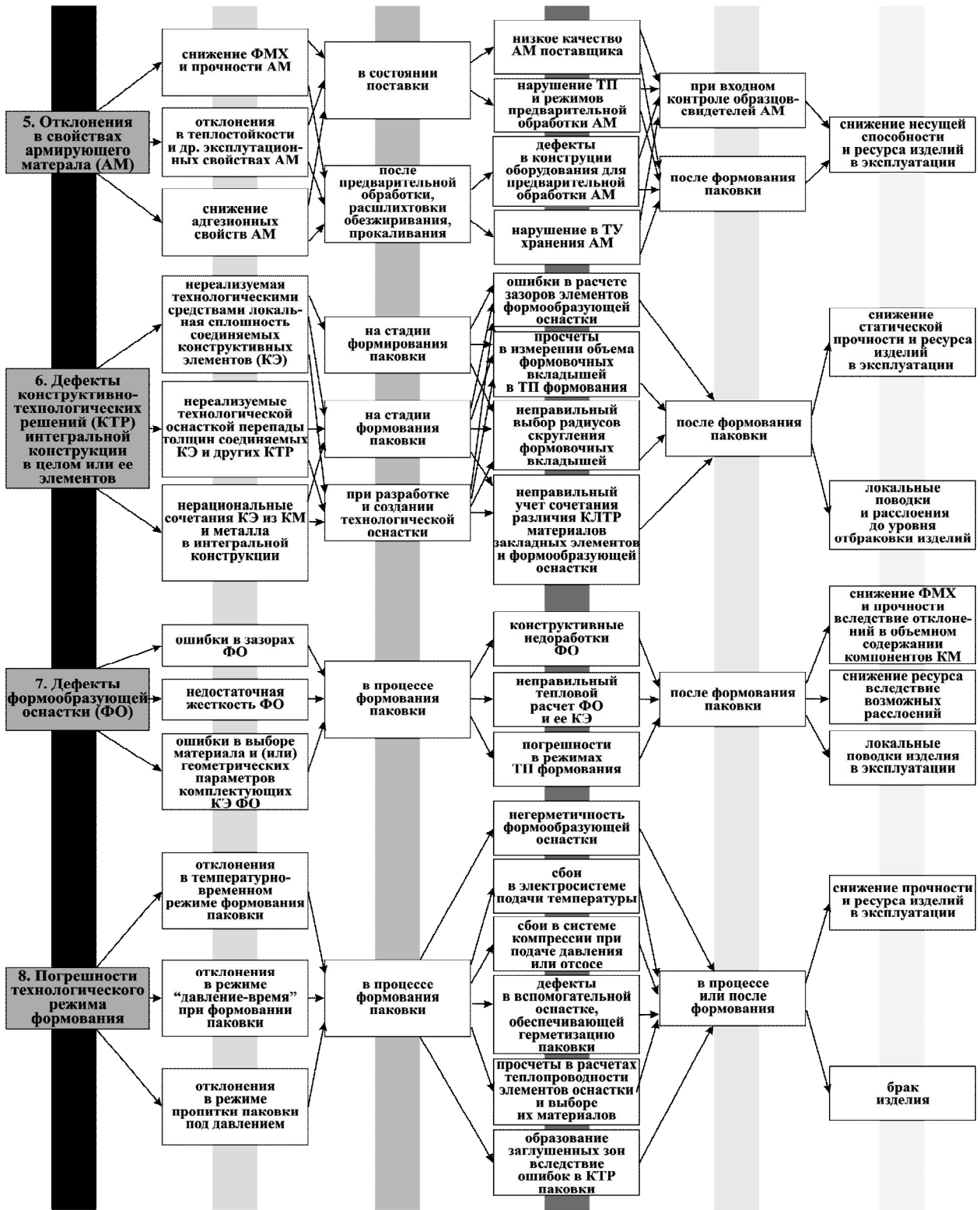


Рис. 4. Классификатор дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций АКТ из полимерных КМ (окончание)

3. Гайдачук В.Е. Технология производства летательных аппаратов из композиционных материалов: уч. пособие для вузов / В.Е. Гайдачук, В.Д. Гречка, В.Н. Кобрин, Г.А. Молодцов. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1989. – 339 с.

4. Бичков С.А. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: підручник / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук, В.Д. Гречка, В.Н. Кобрин. – К., ІСДО, 1995. – 376 с.

5. Щербаков В.Т. Технологические особенности создания типовых элементов силовых конструкций интегрального типа из полимерных композиционных материалов / В.Т. Щербаков, А.Н. Гончаров, Н.Б. Волобуева, Р.Г. Нафиков, В.С. Веднева // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1985. – С. 40-48.

6. Забашта В.Ф. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения: Спра-

вочник / В.Ф. Забашта, Г.А. Кривов, В.Г. Бондарь. – К., Техніка, 1993. – 160с.

7. Кондаков Н.И. Логический словарь-справочник / Н.И. Кондаков – М.: Наука, 1975. – 720 с.

8. Математический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 847 с.

9. Гайдачук А.В. Технологические дефекты сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов / А.В. Гайдачук, М.В.Сливинский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4(20). – С. 5-8.

10. Мельников С.М. Многоуровневая классификация дефектов сотовых заполнителей из металлической фольги и вытекающие из нее задачи определения их полей допусков / С.М. Мельников // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»: - Х.: НАКУ. 2005. – Вып.4(2). – С. 96-108.

Поступила в редакцию 2.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационного материаловедения Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДЕФЕКТИ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ У СЕРІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ АВІАКОНСТРУКЦІЙ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*О.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, К.В. Омельченко*

Розроблено багаторівневу класифікацію технологічних дефектів, що виникають у процесі виробництва конструкцій авіаційно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів. В основу класифікації покладено фундаментальні принципи і правила теорії класифікації. Наведено класифікатор, що містить 8 видів типових дефектів, що включає 24 класи. Класифікатор призначений для синтезу обґрунтованих полів допусків на технологічні відхилення параметрів виробу від закладених у проектній документації та прогнозування можливостей зниження дефектів в серійному виробництві по мірі освоєння виробу.

**Ключові слова:** полімерні композиційні матеріали, класифікація, технологічний дефект, поле допусків, серійне виробництво.

### THE ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL DEFECTS ARISING IN A SERIES PRODUCTION OF INTEGRATED AIRFRAMES MADE FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

*A.V. Gaidatchouk, A.V. Kondratiev, E.V. Omelchenko*

The multilevel classification of the technological defects arising in aerospace vehicles' structures manufacture from polymeric composite materials is developed. Fundamental principles and rules of the classification theory are put in the classification basis. A classifier containing 8 types of standard defects, including 24 classes is given. The classifier is intended for synthesis of the proved tolerance ranges of product parameters' technological deviations from nominal and potential forecast of defects decreasing in a series production as manufacture of product is being mastering.

**Key words:** polymeric composition materials, classification, technological defect, field of admittances, mass production.

**Гайдачук Александр Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, проректор по НИР ХАИ, заведующий кафедрой проектирования ракетно-космических аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**Кондратьев Андрей Валерьевич** – канд. техн. наук, ассистент кафедры проектирования ракетно-космических аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», e-mail: kondratyev\_a\_v@mail.ru.

**Омельченко Екатерина Владимировна** – инженер, Харьковское государственное авиационное производственное предприятие.