

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СИНТЕЗ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

*The influence of composite structures constructive and technological parameters
on dimensional chains synthesis*

*Wpływ konstrukcyjno-technologicznych parametrów konstrukcji kompozytowych
na syntezę łańcuchów wymiarowych*

Виталий А. ПАСЕЧНИК, Алексей А. ХМУРЕНКО

Резюме: Подходы размерно-точностного анализа являются актуальными и универсальными для решения комплексных задач обеспечения точности и взаимозаменяемости конструкций при их сборке. Такие подходы, как правило, основываются на аппарате теории размерных цепей (РЦ), который в свою очередь является достаточно развитым, но не смотря на это, имеет ряд нерешенных задач, например, связанных с расчетом точности геометрических параметров сборных конструкций из полимерно-композитных материалов (ПКМ).

Сложности применения вышеупомянутой теории возникают, как на этапах формирования и синтеза РЦ конструкции, так и на последующих этапах их анализа и расчета. Также имеется ряд допущений, который упрощает анализ металлических конструкций, но для ПКМ вносит значительные погрешности расчетов.

В настоящей работе представлены результаты анализа актуального состояния процедур формирования и синтеза пространственных РЦ (ПРЦ) для сборных конструкций из неоднородных материалов (в т.ч. ПКМ), которые показали нецелесообразность применения «классической» методологии и необходимость ее уточнения, в вопросе учета специфики конструктивно-технологических параметров составных частей конструкции (СЧ) из ПКМ.

Рассмотрены различные подходы в представлении модели ПРЦ сборных конструкций, оптимальным среди которых был определен подход, при котором модель геометрии представляется в виде структур связанных систем координат ее СЧ. Такой подход позволяет учесть сложную структуру ПКМ, т.к. возможно представление отдельных структур их подсистем. Также учитываются специфические технологические факторы, которые возникают на этапах изготовления СЧ из ПКМ и сборки конструкции в целом.

Предложенный подход подразумевает использование декомпозиции общей структуры модели, что упрощает процедуры построения, а саму модель ПРЦ делает универсальной. Предложенная методика позволяет строить эффективные модели структур ПРЦ конструкций из ПКМ для выполнения процедур как формирования и синтеза, так и дальнейшего анализа ПРЦ.

Ключевые слова: Размерно-точностный анализ, пространственная размерная цепь, сборная композитная конструкция.

Summary: Approaches of size and accuracy analysis are relevant and universal for complex of ensure constructions at their assembly accuracy and interchangeability tasks decisions. Such approaches are usually based on dimensional chains (DC) theory apparatus, which is sufficiently developed, but, has a number of unsolved problems, such as polymer composites materials (PCM) geometrical parameters accuracy calculation.

Difficulty arises applying above theory, both on DC formation and synthesis stage and on analysis and calculation subsequent stage. There is also a number of assumptions, which simplifies analysis of metallic constructions, but makes significant errors for PCM settlement.

This paper presents an analysis of formation and synthesis procedures for spatial DC (SDC) and all kinds of heterogeneous materials (including PCM), which showed unreasonableness of using "classical" methods and needs to clarify, on issue of taking into account PCM parts constructive-technological specifics parameters.

Different approaches in composite constructions SDC model representation, among which the best approach has been defined, in which geometry of model is a structure of related coordinate systems of constructions parts. This approach allows to take into account the complex PCM structure as possible representation of their subsystems individual structures. Also take into account specific technological factors on PCM production stages and construction assembly stages.

Proposed approach involves the use of general structure model decomposition, which simplifies construction, and makes SDC model universal. Proposed method allows to build effective PCM structures models, designs to perform SDC formation and synthesis procedures, as well as further SDC analysis.

Keywords: Size and Accuracy Analysis, Spatial Dimensional Chain, PCM Construction.

Streszczenie: Zastosowanie wymiarowo-dokładnościowej analizy jest aktualne i uniwersalne dla rozwiązywania kompleksowych zadań zapewnienia dokładności i zamienności konstrukcji w trakcie montażu. Podejście takie, w zasadzie, wykorzystuje aparat teorii łańcuchów wymiarowych (ŁW), która z kolei jest wystarczająco opracowana, lecz posiada szereg nierozwiązanych zadań, np. związanych z obliczaniem dokładności parametrów geometrycznych konstrukcji montowanych z polimerowo-kompozytowych materiałów (PKM). Złożoność wykorzystania powyższej teorii powodowana jest zarówno na etapie kształtowania i syntezy ŁW konstrukcji jak i na dalszych etapach analizy i obliczeń. Istnieje również szereg uproszczeń analizy konstrukcji metalowych, lecz dla PKM wnoszą one znaczne błędy obliczeń. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy aktualnego stanu procedur kształtowania i syntezy przestrzennych ŁW (PŁW), które wykazały niecelowość stosowania „klasycznej”

методологии и необходимость ее усовершенствования в zakresie uwzględnienia specyfiki konstrukcyjno-technologicznych parametrów składowych części (SC) z PKM. Rozpatrzone różne podejścia w przedstawianiu modeli PŁW montowanych konstrukcji, zaś optymalnym podejściem okazało się podejście przy którym model geometrii przedstawiono w postaci struktur związanych systemem współrzędnych z jej S.C. Takie podejście pozwala uwzględnić złożoną strukturę PKM tzn. można przedstawić oddzielne struktury podsystemów. Uwzględnia się również specyficzne czynniki technologiczne, które pojawiają się na etapach wykorzystania S.C. z PKM i montażu całej konstrukcji. Zaproponowane podejście przewiduje wykorzystanie dekompozycji ogólnej struktury modelu, co upraszcza procedury budowy, a sam model PŁW staje się uniwersalnym. Przytoczona metodyka pozwala formować efektywne modele PŁW konstrukcji a PKM zarówno dla spełnienia procedur jak również dla formowania i syntezy oraz dalszej analizy PŁW.

Słowa kluczowe: wymiarowo-dokładnościowa analiza, przestrzenny łańcuch wymiarowy, montażowa konstrukcja kompozytowa

Введение

На сегодняшний день актуальным инструментом для определения параметров точности собираемых конструкций является размерно-точностный анализ, который основывается на аппарате теории размерных цепей (РЦ). Данная теория, в общем ее представлении, достаточно универсальная и упрощенная.

Значительное количество допущений в отдельных положениях теории РЦ, как правило, касаются представления составных частей (СЧ) объектов сборки и непосредственно связей между ними, в виде звеньев РЦ. Для конструкций, например, из металлических материалов, это позволяет упростить процедуры анализа и расчета точности собираемой конструкций. Если рассматривать более сложные конструкции, с широким применением полимерно-композитных материалов (ПКМ), вышеуказанные допущения вносят достаточно высокую погрешность на этапе формирования и синтеза РЦ.

Факторы, влияющие на методику формирования и синтеза размерных цепей для сборных конструкций из полимерно-композитных материалов.

При формировании и синтезе РЦ рассматриваются основные условия, которым должны удовлетворять значения допусков составляющих звеньев РЦ (входных геометрических параметров конструкции). Синтез позволяет решить так называемую прямую задачу [1]. При этом, составляющее звено РЦ соответствует одной СЧ конструкции и представляется в виде одного геометрического параметра (размер или форма), а замыкающее – характеризует искомый, контролируемый параметр собираемой конструкции в целом.

Основные требования к методике синтеза РЦ формируются с учетом требований к точности собираемой конструкции и взаимозаменяемости ее СЧ при сборке. Основными инструментами обеспечения точности и взаимозаменяемости являются система допусков и посадок на входящие СЧ, и увязка геометрических параметров СЧ при сборке. Исходя из этого, РЦ должна формироваться таким образом, чтобы в процессе ее оценки учитывались параметры фактически сопрягаемых поверхностей СЧ в конструкции.

Согласно одному из упрощенных методов формирования РЦ допускается ее представление в одномерной системе координат (СК). Такой метод описывает только линейные отклонения, а уравнения РЦ в этом случае получаются в результате преобразования пространственной РЦ (ПРЦ) в одномерные. Применяемый математический аппарат при получении уравнений ПРЦ таким методом основывается на некоторой идеализации реальных размерных связей поверхностей СЧ, а связь между линейными и угловыми величинами разрывается, что приводит к накоплению дополнительных погрешностей [2].

Также для решения задач синтеза ПРЦ возможно применение метода Монте-Карло – стохастического моделирования, при условии определения коэффициентов множественной линейной регрессии, выполняющих в этом методе функцию коэффициентов влияния. Преимуществом этого метода является точность, а к недостатком следует отнести достаточно большое количество реализаций, кроме того, моделирование случайных значений составляющих величин происходит по законам распределения, выбор которых достаточно условен [3]. При расчетах ПРЦ метод стохастического моделирования удобен только при решении задачи анализа, его использование для решения задачи синтеза мало эффективно из-за неизвестности значений коэффициентов влияния.

Существенное влияние на точность объектов сборки имеет монтажные усилия, возникающие в отдельных СЧ конструкции при выполнении сборочных операций. Общая задача учета монтажных усилий сводится к линеаризации уравнений, в зависимости от потенциальных отклонений, которые являются относительно малыми по сравнению с номинальными значениями геометрических параметров. В работах [4-6] проиллюстрировано линеаризованный метод сборки нежестких металлических конструкций, основанный на использовании коэффициентов влияния для получения матриц жесткости, позволяющие оценить собираемую конструкцию. Также предложено использование конечно-элементного моделирования (КЭМ) в разработке модели изменения деформирования листовых или сложной формы СЧ конструкции. Такой подход обеспечивает уточненный анализ, путем

синтеза модели конструкции и статистического анализа прогнозирования отклонений сборки. Классический метод Монте-Карло требует достаточно много времени для анализа каждого элемента в КЭМ, а предлагаемый альтернативный метод, основанный на анализе коэффициентов влияния позволит повысить эффективность вычисления.

Также на сегодняшний день существует концепция решения задач синтеза при расчетах ПРЦ через последовательное решение задач их анализа теоретико-вероятностным методом [7]. При линеаризации уравнения РЦ используется функция взаимосвязи составляющих и замыкающего звеньев, которая получается на основании применения аналитического подхода, использующего векторно-проектный или векторно-матричный способ.

ПРЦ, формируемую векторно-матричным способом, в системах автоматизированного проектирования (САПР) принято определять детерминированной моделью геометрии объекта производства, а функцию взаимосвязи составляющих и замыкающего звена – моделью (системой уравнений) ПРЦ [8].

Так, во многих современных CAD/CAM/CAE системах активно используется аппарат трехмерного анализа отклонений (англ. Three-Dimensional Variation Analysis – 3DVA), в качестве отдельного математического модуля. [9]

В работе [10] предложен подход анализа сборной конструкции, в котором используются сжатые матрицы жесткости, так называемые «супер элементы». Для прогнозирования отклонений объектов сборки необходимо рассчитывать значения допустимых значений геометрических параметров, или учитывать выбранную технологию сборки. Предложено объединить параметры гибкости отдельных СЧ конструкции, полученные от КЭМ, с анализом отклонений на жесткие СЧ сборки. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования статистических изменений остаточных напряжений и частей смещения.

Для оценки влияния отклонения СЧ на отклонение конструкции в целом предложено учета эффекта геометрической ковариации [11]. Такой метод совмещает в себе анализ головных СЧ конструкции и КЭМ, с целью оценки влияния изменения СЧ на сборку в целом. Анализ методом КЭМ используется для определения влияния каждой деформации при изменении сборки. Предложенная методика сможет значительно снизить расчетную трудоемкость по вариации анализа сборных конструкций.

В работах [12-14] рассмотрен метод «точно ограниченного» проектирования для сложных криволинейных конструкций, с использованием прогрессивных крепежных систем, а также внесены уточнения в общую теорию РЦ, по части синтеза и анализа. Больше количество современных САПР является объектно-ориентированными и не отражают логику сборки на ее абстрактном уровне. Решение этой проблемы

возможно переориентацией САПР в направлении сборочно-ориентированные, то есть уточнением фундаментальной структуры в процессах проектирования, в том числе, в разработке технологии сборки для ограничения кинематических частей и их точного размещения.

Распределение отклонений во многокомпонентных системах сборки моделировалось многими специалистами, используя модели состояния в пространстве [15-17]. Представленные алгоритмы для распределения и изменения механической сборки с использованием переходного состояния модельного подхода. Для моделирования распределения вариаций и контроля в процессе сборки используются среды моделирования и отдельные аппараты теории управления. Процесс сборки моделируется как многоэтапная линейная динамическая система. В этих работах не учитывается изменение отклонений и комплект средств технологического оснащения (СТО).

Так, привязка составляющих и замыкающего звена ПРЦ сборной конструкции должна происходить с помощью связанных СК. Для дальнейшего описания методики синтеза РЦ для конструкций из ПКМ рассмотрим задачу формирования и описания связанных СК СЧ и конструкции в целом.

Методика формирования связанных систем координат составных частей и конструкции из полимерно-композитных материалов в целом.

В задаче синтеза ПРЦ, под связанными СК понимается структура отдельно определенных СК каждой СЧ сборной конструкции, например, планера летательного аппарата (ЛА) – рис. 1, иерархическая система связей между которыми, для кессонной конструкции (КК), показана на рис. 2.

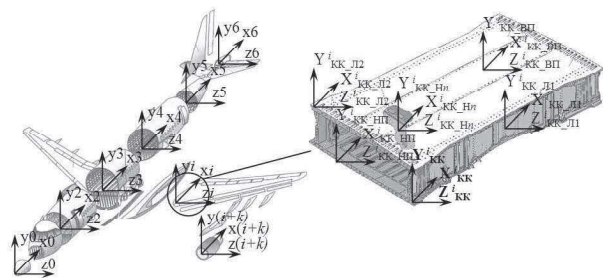


Рис. 1. Системы координат планера летательного аппарата
Fig. 1. Airframe coordinate systems

- Используются следующие обозначения СК: $СК_{КК}^i$ – кессонной конструкции в целом:
- $СК_{КК_ВП}^i$ – верхняя панель, которая состоит из: $СК_{КК_ВП_1}^i$ – обшивки и стрингеров: $СК_{КК_ВП_2}^i$ – №1 ÷ $СК_{КК_ВП_k}^i$ – №k;
 - $СК_{КК_ЛП/2}^i$ – лонжероны №1 и 2, которые состоят из: $СК_{КК_ЛП_1}^i$ – стенки, $СК_{КК_ЛП_2}^i$ – пояса

верхнего, $СК_{КК_Л1_3}^i$ – пояса нижнего, $СК_{КК_Л1_4}^i$ – стоек и $СК_{КК_Л1_5}^i$ – фитингов.

- $СК_{КК_Н1/n}^i$ – нервюры №1 ÷ n, которые состоят из: $СК_{КК_Н1_1}^i$ – стенки, $СК_{КК_Н1_2}^i$ – пояса верхнего, $СК_{КК_Н1_3}^i$ – пояса нижнего, $СК_{КК_Н1_4}^i$ – стоек, $СК_{КК_Н1_5}^i$ – компенсаторов и $СК_{КК_Н1_6}^i$ – книц.
- $СК_{КК_НП}^i$ – нижняя панель, которая делится на: $СК_{КК_НП_1}^i$ – секция 1, $СК_{КК_НП_2}^i$ – секция 2, $СК_{КК_НП_3}^i$ – секция 3, каждая из которых состоит из СК в соответствии с $СК_{КК_ВП}^i$.

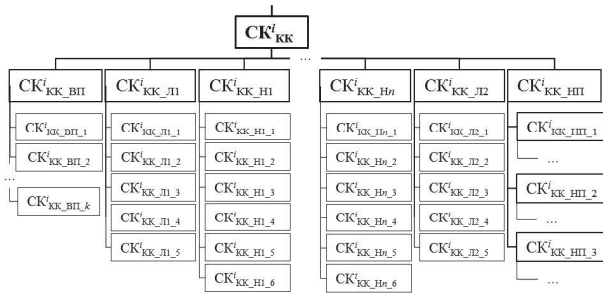


Рис. 2. Пример фрагмента иерархической структуры связанных систем координат типовой кессонной конструкции планера летательного аппарата

Fig. 2. Example of typical wing box construction related coordinate systemshierarchical structure fragment

Такая структура должна формироваться с учетом требования строгого соответствия указанных связей в модели фактическим физическим связям в реальной конструкции. Не соблюдение этого требования приведет к ошибке и существенно усложнит синтез корректной РЦ.

Анализ структуры связанных СК следует проводить с учетом и технологических факторов. Особое влияние на структуру связанных СК для сборных конструкций из ПКМ будут оказывать специфика технологии изготовления СЧ и сборки конструкции в целом. Такая специфика вызвана невозможностью применения типовых «классических» технологических решений, которые применялись ранее для металлических конструкций [18].

Для этапа изготовления СЧ из ПКМ наиболее значимым является:

- назначение базовой СК (рис. 3), которая будет определять главную сборочную базу для установки СЧ при окончательной сборке конструкции и зависеть от типа технологии формования/формообразования;
- формирование подсистем связанных СК, в которых каждый монослой имеет отдельную СК, в зависимости от структуры ПКМ (рис. 3). Связями в таких подсистемах будут выступать функции, переменные в которых зависят от свойств связующих материалов и режимов технологии формования/ формообразования.

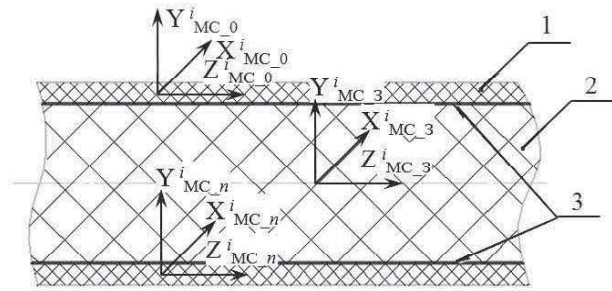


Рис. 3. Подсистема связанных систем координат для составных частей из полимерно-композитных материалов: 1 – монослои материала ($XYZ_{MC_0}^i$ – базовая СК, $XYZ_{MC_n}^i$ – СК n-ного монослоя); 2 – наполнитель материала с СК $XYZ_{MC_3}^i$; 3 – связующий материал

Fig. 3. Subsystem of related coordinate systems for composite parts: 1 – monolayers material ($XYZ_{MC_0}^i$ – basic CS, $XYZ_{MC_n}^i$ – CS of “n” monolayer); 2 – filling material with $XYZ_{MC_3}^i$ CS; 3 – connecting material

Для этапа сборки конструкции из ПКМ наиболее значительным является:

- учет соединений между СЧ конструкции и компенсирующих элементов (книц, компенсаторов, жидких наполнителей и пр.);
- формирование СК сборочного приспособления (СП), в составе общей структуры связанных СК (рис. 4).

Для сборки конструкций из ПКМ целесообразно применять СП модульной конструкции, состоящие из нежестких базовых элементов (вакуумные системы базирования), каркасных и фундаментных. Последние образуют «нулевую» базовую СК в общей связанной структуре.

Для СП водятся следующие обозначения СК: $СК_{СП_0}^i$ – СП для сборки КК, которое состоит из каркасных ($СК_{КК_К}^i$) и базовых элементов ($СК_{КК_БЭ}^i$). Иерархическая система связей в уточненной структуре показана на рис. 5.

Вышеприведенная структура СК является более сложной, по сравнению с указанной на рис. 2, за счет дополнительных элементов СП, но отображает реальную структуру конструкции на производстве и визуализирует технологические зазоры между верхней панелью и СЧ каркаса КК.

Предложенный подход позволит учитывать монтажные напряжения при сборке конструкции в дальнейшем конструктивно-технологическом моделировании рассматриваемой конструкции. Это возможно реализовать за счет описания и анализа элементов СП, а также способов базирования СЧ с учетом реальных технологических решений на производстве.

При этом, актуальной остается основная задача обеспечения точности геометрических параметров, для решения которой необходимо разработать методику формирования модели РЦ для конструкций из ПКМ.

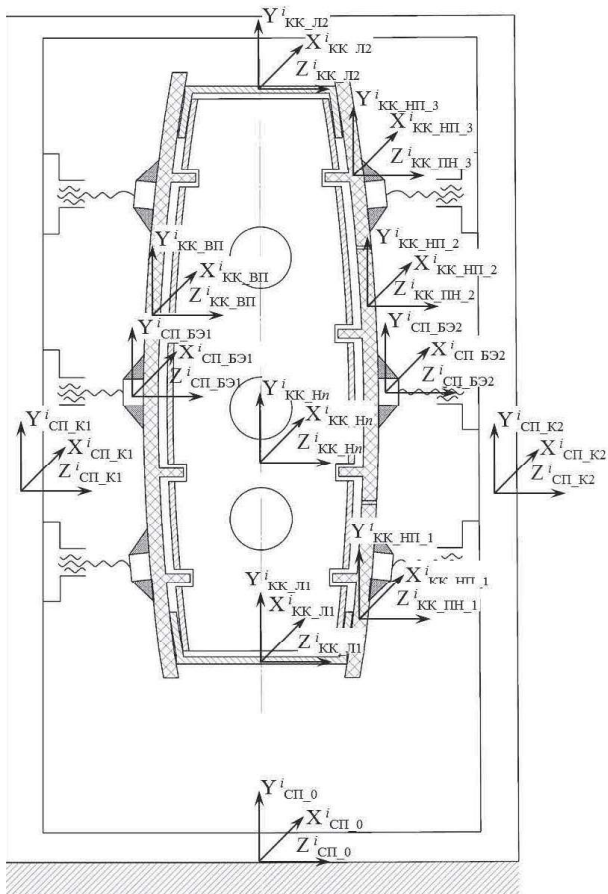


Рис. 4. Структура связанных систем координат для конструкции из полимерно-композитных материалов в сборочном приспособлении
 Fig. 4. The structure of the related coordinate systems for the composite constructions in the assembly jig

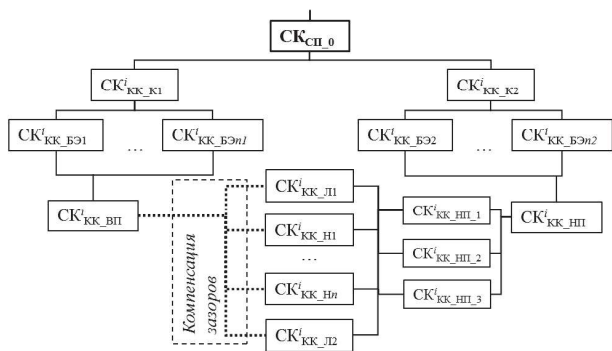


Рис. 5. Иерархическая структура связанных систем координат для конструкции из полимерно-композитных материалов в сборочном приспособлении
 Fig. 5. The hierarchical structure of the related coordinate systems for the composite constructions in the assembly jig

Методика формирования модели размерной цепи для конструкций из полимерно-композитных материалов.

Построение ПРЦ сборной конструкции связано с представлением ее модели геометрии в виде СК ее СЧ. При этом, чем больше количество СЧ и чем сложнее их структура и геометрия, тем сложнее будет структура ПРЦ в целом.

Для решения этой проблемы рассмотрим подход декомпозиции общей структуры ПРЦ. На низшем уровне необходимо анализировать детали конструкции и соответственно учитывать технологические особенности на этапе их изготовления. Для конструкции, рассмотренной выше наиболее сложной структурой обладают СЧ из ПКМ (верхняя и нижние панели). Типовая модель структуры РЦ СЧ из ПКМ показана на рис. 6.

После синтеза ПРЦ для СЧ из ПКМ в дальнейшем целесообразно представлять ее в сокращенном виде (рис. 7).

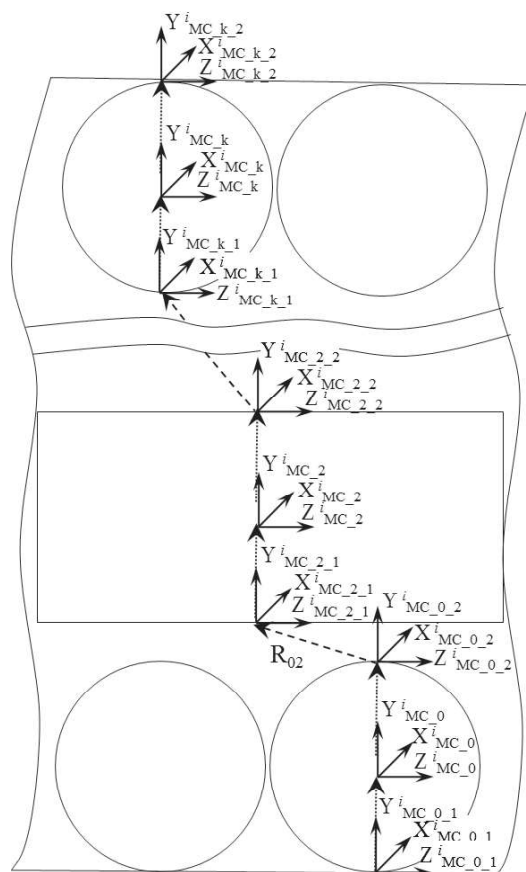


Рис. 6. Типовая модель структуры размерной цепи составной части из полимерно-композитных материалов: XYZ_{MC_0} – базовая СК СЧ; $R_{02} = f(a, b, \dots, m)$ – составляющее звено РЦ как функция от m технологических параметров СЧ; k – количество монослоев материала
 Fig. 6. Typical dimensional chain structure model of the composite part: XYZ_{MC_0} – basic CS; $R_{02} = f(a, b, \dots, m)$ – constitutional unit of DC as a function of the “ m ” technological part parameters; k – the number of the material monolayers

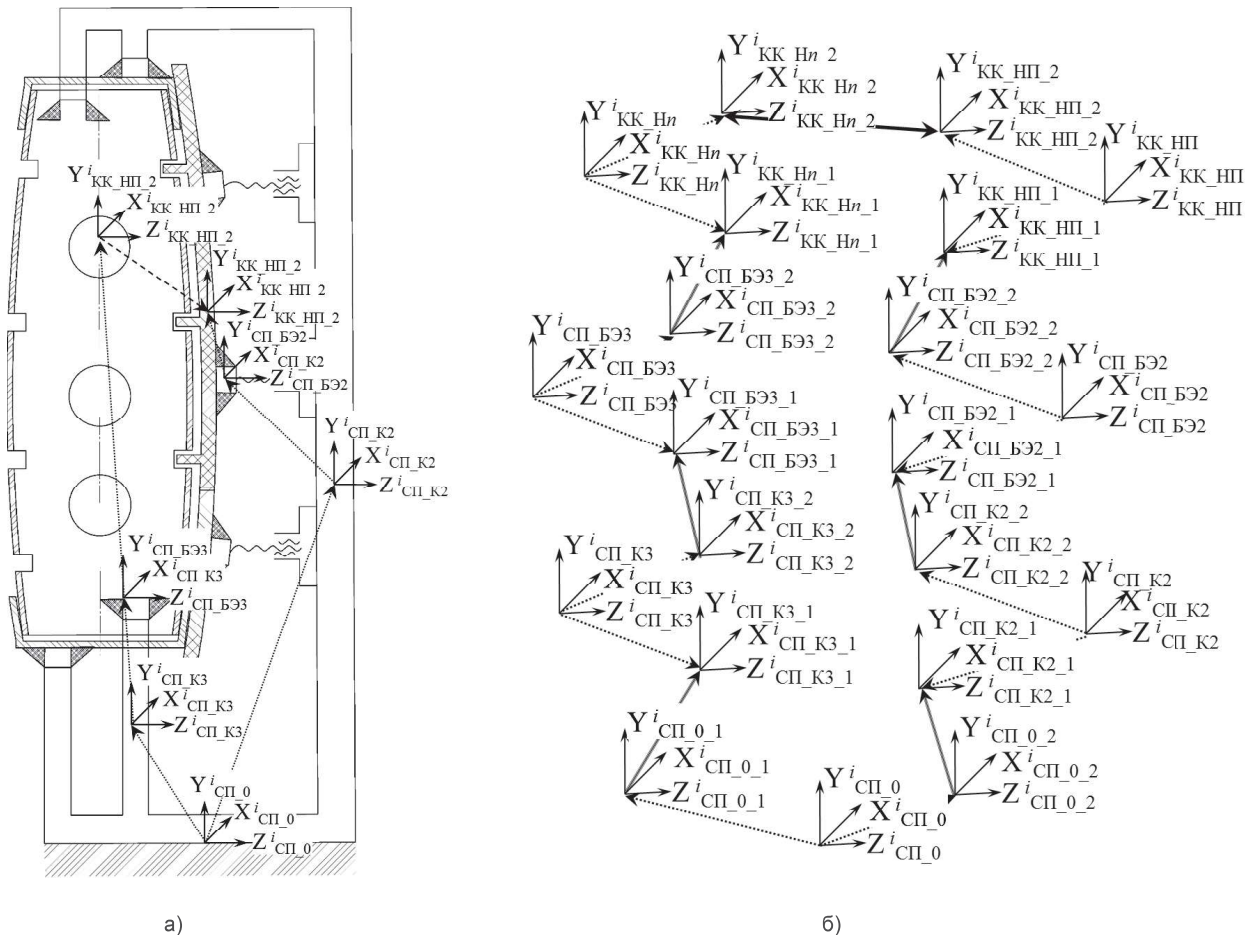


Рис. 7. Модель структуры размерной цепи под сборки «А» кессонной конструкции из полимерно-композитных материалов в сборочном приспособлении: а) укрупненная; б) детализированная
 Fig. 7. Dimensional chain structure model of composite wing box subassembly "A" in the assembly jig: a) enlarged; b) detailed

На высшем уровне декомпозиции структуры необходимо анализировать непосредственно сборную конструкцию. Упростить такой анализ можно используя схему конструктивно-технологического членения конструкции. Так для КК из ПКМ можно выделить этап «А» – подсборка каркаса и нижних панелей (рис. 7), после чего выполняется установка верхней панели и окончательная сборка КК, (рис. 8).

Предложенная модель ПРЦ (рис. 8) также является универсальной, что обеспечивается возможностью корректировки на разных уровнях ее декомпозиции без деструктуризации модели в целом. Целесообразно использовать такую модель в соответствующих автоматизированных системах, не только для формирования и синтеза ПРЦ, а и для дальнейшего ее анализа.

Выводы

Анализ актуального состояния процедур формирования и синтеза ПРЦ для сборных конструкций из неоднородных материалов (в т.ч. ПКМ) показал

нецелесообразность применения «классической» методологии и необходимость ее уточнения в вопросе учета специфики конструктивно-технологических параметров СЧ из ПКМ.

Рассмотрены различные подходы в представлении модели ПРЦ сборных конструкций, оптимальным среди которых был определен подход, при котором модель геометрии представляется в виде структур связанных систем координат ее СЧ. Такой подход позволяет учесть сложную структуру ПКМ, т.к. возможно представление отдельных структур их подсистем. Также учитываются специфические технологические факторы, которые возникают на этапах изготовления СЧ из ПКМ и сборки конструкции в целом.

Предложенный подход подразумевает использование декомпозиции общей структуры модели, что упрощает процедуры построения, а саму модель ПРЦ делает универсальной.

Предложенная методика позволяет строить эффективные модели структур ПРЦ конструкций из ПКМ для выполнения процедур как формирования и синтеза, так и дальнейшего анализа ПРЦ.

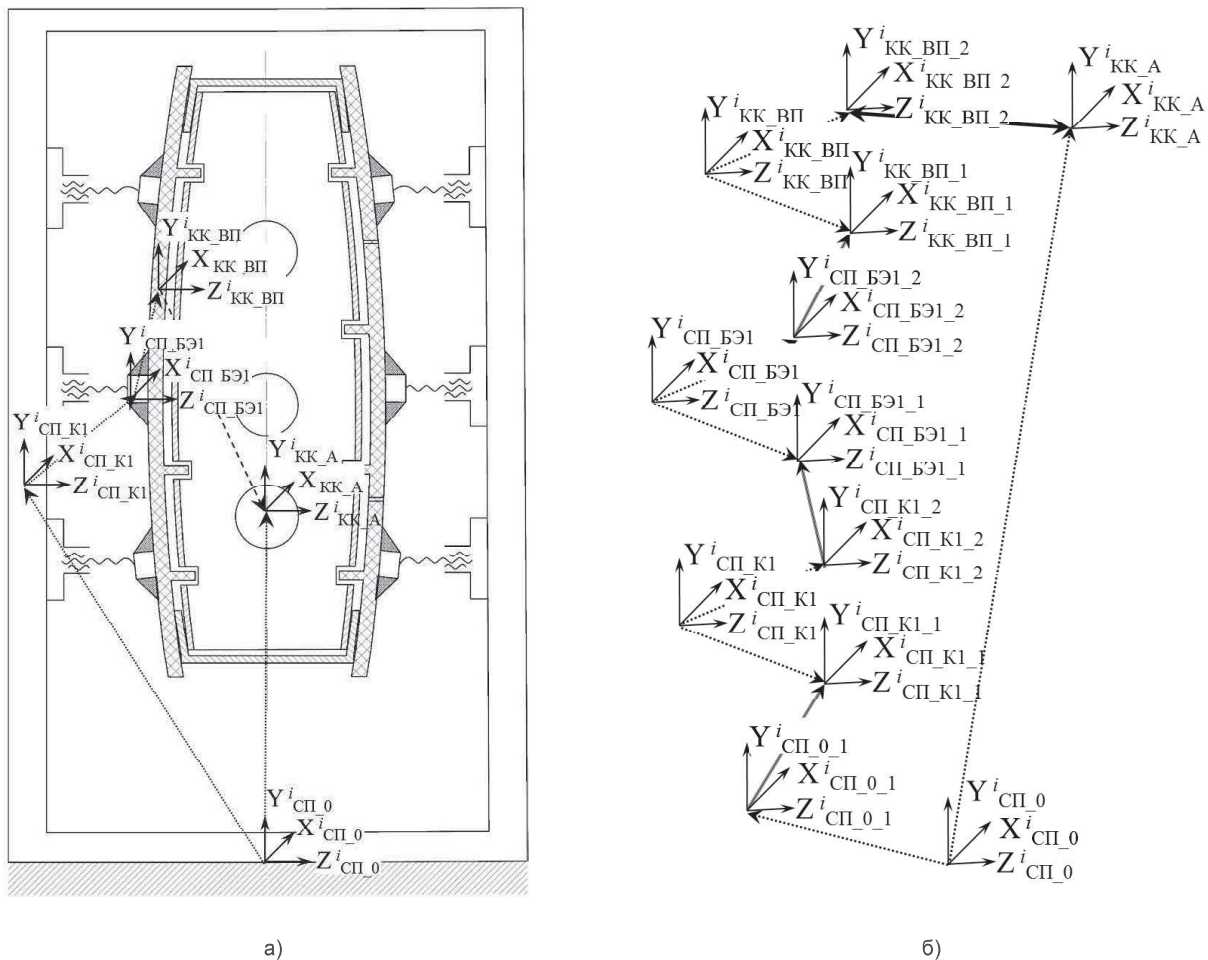


Рис. 8. Модель структуры размерной цепи кессонной конструкции из полимерно-композитных материалов в сборочном приспособлении: а) укрупненная; б) детализированная
 Fig. 8. Dimensional chain structure model of composite wing box in the assembly jig: a) enlarged; b) detailed

Использованная литература

- [1] Рудь В.Д., Герасимчук О.О., Маркова Т.П. Розмірно-точнісний аналіз конструкцій та технологій: Уч. посібник – Луцк: РІО ЛГТУ, 2008. – 344 с.
- [2] Исаев С.В. Модели геометрии машин в анализе точности // Компьютерная хроника. – 2000. – № 8. – с. 5–18.
- [3] Карепин П.А., Ерохин М.Н. Оценка уровня качества детали и сборочных единиц сельскохозяйственной техники в процессе производства и ремонта. – М: МГАУ, 2002. – 103 с.
- [4] S. C. Liu, S. J. Hu, and T. C. Woo Tolerance analysis for sheet metal assemblies // ASME Journal of Mechanical Design. – 1996. – №. 118. – с. 62–67.
- [5] S. C. Liu and S. J. Hu Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1997. – №. 119. – с. 368–374.
- [6] Y. J. Long and S. J. Hu A unified model for variation simulation of sheet metal assemblies // in Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications, H. A. ElMaraghy, Ed. Chapman & Hall. – 1998. – с. 208–219.
- [7] Карепин П.А. Обеспечение качества сельскохозяйственной техники при изготовлении и ремонте моделированием размерных связей в сборочных узлах: Автореферат дис. д.т.н. – М., 2002. – 491 с.
- [8] Исаев С.В. Формирование геометрической модели для моделирования погрешностей расположения поверхностей объекта производства // Компьютерная хроника. – 2000. – № 8. – С 19–34.
- [9] Byungwoo Lee, Mohammed M. Shalaby, Ronald J. Collins Variation Analysis of Three Dimensional non-rigid Assemblies // Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing Ann Arbor, Michigan, USA, July 22–25, 2007.
- [10] K. G. Merkely, K. W. Chase, and E. Perry An introduction to tolerance analysis of flexible assemblies // Proceedings of the 1996 MSC World Users Conferences.
- [11] J. A. Camelio, S. J. Hu, and S. P. Marin, "Compliant assembly variation analysis using component geometric covariance // ASME Journal of Mechanical Design. – 2004. – №. 126/2. – с. 355–360.
- [12] R. Mantripragada and D. E. Whitney The datum flow chain // Research in Engineering Design. – 1998. – №. 10. – с. 150–165.

- [13] D. E. Whitney, R. Mantripragada, J. D. Adams, and S. J. Rhee Designing assemblies // *Research in Engineering Design*. – 1999. – №. 11. – с. 229–253.
- [14] D. E. Whitney, *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*, New York, Oxford University Press, 2004.
- [15] R. Mantripragada and D. E. Whitney Modeling and controlling variation propagation in mechanical assemblies using state transition models // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1999. – №. 15/1. – с. 124–140.
- [16] J. Jin and J. Shi State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 1999. – №. 121/4. – с. 756–762.
- [17] Y. Ding, D. Ceglarek, and J. Shi Modeling and diagnosis of multistage manufacturing processes: part I: state space model // in *Proceedings of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation*, Ann Arbor, MI, 2000.
- [18] Абибов А.Л. *Технология самолетостроения*. (Изд. 2е). – М: Машиностроение, 1982. – 551 с.

Виталий А. Пасечник – Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Кафедра интегрированных технологий машиностроения, Механико-машиностроительный институт, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
E-mail: pasichnyk@ukr.net

Контактный тел.: (044) 406-82-55
Номер ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4422-6277>

Хмуренко Алексей Александрович – Аспирант, Кафедра интегрированных технологий машиностроения, Механико-машиностроительный институт, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

E-mail: hmu_jr@ukr.net
Контактный тел.: (067) 710-11-74; (050) 709-19-77
Номер ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3631-9166>

Pasechnyk Vitaliy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Department of Integrated Manufacturing Engineering, Institute of Mechanical Engineering, National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

E-mail: pasichnyk@ukr.net
Contact tel.: (044) 406-82-55
Number ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4422-6277>

Khurenko Aleksey – PhD student, Integrated Manufacturing Engineering Department, Institute of Mechanical Engineering, National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

E-mail: hmu_jr@ukr.net
Contact tel.: (067) 710-11-74; (050) 709-19-77
Number ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3631-9166>

Адрес для переписки:
Хмуренко Алексей Александрович
Украина, г. Киев 04214 ул. Северная 2в кв. 106