

Кривов Г.А.<sup>1</sup>, Матвиенко В.А.<sup>1</sup>, Рудько А.Н.<sup>1</sup>, Василевский Е.Т.<sup>2</sup>, Романович Г.Н.<sup>2</sup>,  
Рудаков К.Н.<sup>3</sup>, Шукаев С.Н.<sup>3</sup>, Добронравов А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии». Украина, г. Киев

<sup>2</sup> Государственное предприятие «АНТОНОВ». Украина, г. Киев

<sup>3</sup> Национальный технический университет Украины «КПИ». Украина, г. Киев

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА

*Применяя современные программные комплексы класса PLM, рассмотрены приемы построения эффективных контактных 3D моделей, для проведения конечно-элементных расчетов, на примере высоконагруженных соединений конструкции планера самолета. При моделировании рекомендуется учитывать: циклическую симметрию (геометрическая симметрия образца), контактность 3D моделей, технологию «контактного склеивания» для послойного моделирования композиционных материалов, усилие затяжки болта. Показано, что в результате реализации на ПЭВМ эффективных моделей болтовых соединений удастся выявить ряд особенностей их напряженно-деформированного состояния, получая результаты отличные от «классического» результата (без учета вышеперечисленных подходов). Установлена возможность уменьшения количества расчетных экспериментов и замены сложных контактных трехмерных конечно-элементных расчетов на регрессионные модели без снижения точности полученных результатов. Все расчеты проводились в программном комплексе Siemens PLM Femap 10.2.0 с NX Nastran.*

Ключевые слова: метод конечных элементов; контакт; 3D модели; напряженно-деформированное состояние; болтовые соединения; полимерно-композиционные материалы.

### Введение

В настоящий момент, развитие электронно-вычислительной техники и программных комплексов достигло уровня, позволяющего проводить необходимые расчеты и создавать модели, учитывающие условия, максимально приближенные к реальности, для моделирования 3D моделей соединений и конструкций. Такими условиями являются: трехмерность, контактность взаимодействий, наличие трения в контактах, сложные свойства материалов, сложный характер нагружения, технологические параметры, наличие отклонений от номинальных размеров и отклонений, обусловленных особенностями материала или технологией изготовления [2 – 5].

При проведении расчетов авиационных конструкций на прочность и усталость используется методика [6], основанная на использовании глобально-локальных 3D конечно-элементных (КЭ) моделей. Глобальной (общей) моделью считается модель конструкции, либо агрегата в целом. Локальной моделью, в свою очередь, может быть как часть агрегата, так и отдельная сборочная единица. Методика [6] предполагает поэтапные расчеты, в которых локальные модели в качестве граничных условий используют часть

результатов, полученных на глобальных моделях. Каждый этап называется уровнем, причем верхним считается уровень агрегата в целом. Например, если принять за глобальную модель крыло самолета, тогда секция закрылка будет локальной моделью, а для следующего уровня глобальной будет секция закрылка, а локальной будет болтовое соединение элемента закрылка из полимерного композиционного материала (ПКМ). Таким образом, для расчетов части локальной модели, мы можем принимать ее глобальной. С другой стороны, одна глобальная модель порождает десятки локальных моделей, а те, в свою очередь, – сотни и тысячи еще более мелких локальных моделей.

Глобально-локальные 3D КЭ модели:

- максимально приближают расчетные модели к реальности;
- позволяют рассчитать номинальные напряжения для оценки усталостной долговечности и проектного ресурса авиационной конструкции с учетом нормированного показателя надежности;
- позволяют выявлять эффекты, полностью отсутствующие (игнорированные) в традиционных методиках расчетов и способные существенно повлиять на ресурс элементов авиационных конструкций;



• порождают многочисленные (массовые) конечно-элементные расчеты.

В связи с настоятельной необходимостью широкого внедрения в авиационные конструкции ПКМ, имеющих механические характеристики, существенно отличающиеся от характеристик металлов, разработана особая методология расчетов элементов из ПКМ [7], также использующая глобально-локальные 3D КЭ модели. Ситуация усложнена значительной номенклатурой, а также малым опытом проведения расчетов и эксплуатации силовых авиационных конструкций, содержащих элементы из ПКМ.

### Постановка задачи

Перед разработчиками авиационной техники стоит глобальная задача "... интегрированного применения информационных технологий (ИТ) на всех этапах жизненного цикла изделий (ЖЦИ) авиационной техники (CALS – Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции)" [1]. Эту задачу невозможно решить без применения в проведении расчетов эффективных приемов, направленных на обеспечение прочности, поскольку вариантов расчетов бесконечно много.

Целевой функцией в повышении эффективности проведения расчетов являются временные, финансовые и человеческие ресурсы. Для этого необходимы: формализация проблем; выявление значимых факторов; построение планов проведения 3D КЭ расчетов, их реализация, анализ и документирование результатов (в форме, позволяющей строить экспресс – оценки и проводить обмен данными в автоматизированных системах с технологией CALS); построение регрессионных моделей, заменяющих сложные контактные КЭ расчеты простыми формульными.

В статье рассмотрели приемы построения эффективных контактных моделей с применением современных программных комплексов класса PLM (Product Lifecycle Manufacturing), для проведения 3D КЭ расчетов высоконагруженных соединений конструкции планера самолета.

### Новые возможности численных исследований напряженно-деформированного состояния высоконагруженных соединений элементов конструкции планера самолета, содержащих элементы из ПКМ

Как было сказано ранее, КЭ модели самолета имеют верхний и нижний уровень, причем нижний уровень содержит все 3D электронные (геометрические) модели отдельных деталей и сборочных единиц. Эти конструктивные решения дополняются технологическими, а также расчетами, обеспечивающими прочность и проектный ресурс. Именно ниж-

ний уровень характерен массовостью, разнообразием и многовариантностью.

Для определенности далее рассматриваем разъемные, а именно болтовые соединения. Для них характерны:

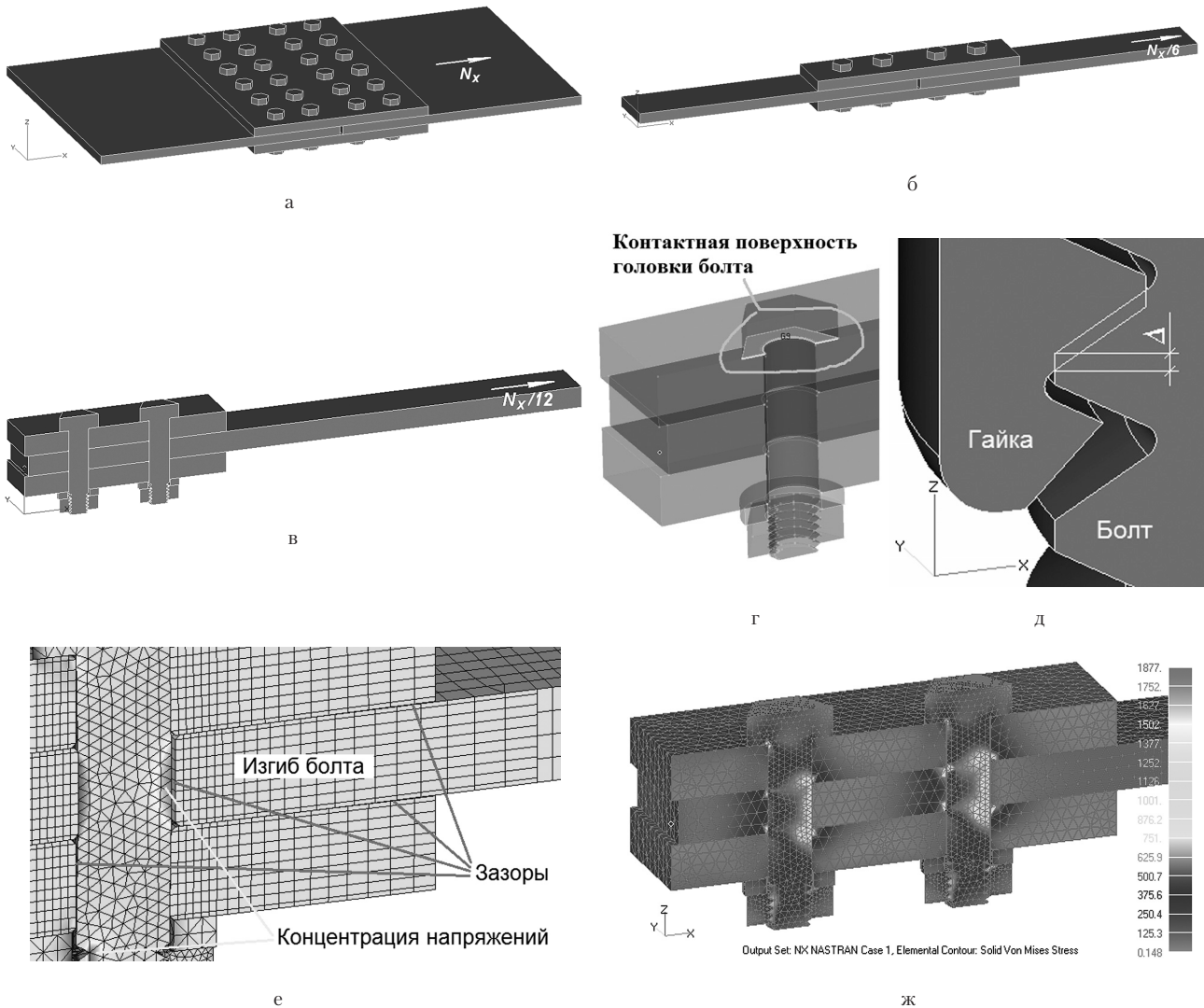
- циклическая повторяемость геометрии, т.е. так называемая циклическая симметрия;
- наличие нескольких элементов соединения: пластин, болтов, гаек, шайб из разных материалов, обычно из ПКМ, титанового и/или алюминиевого сплавов, иногда – стали;
- контактный, с трением, характер взаимодействия между отдельными элементами соединения;
- наличие усилий затяжки пакета (после применения нормированной величины момента на ключе, при монтаже);
- наличие отклонений от номинальных размеров, оговоренных в конструкторской документации (допуски, посадки), либо допускаемых, обусловленных особенностями материала или технологией изготовления (сколы, отслоения и расслоения в ПКМ, несоосность, овальность отверстий и др.).

Контактные 3D модели болтовых соединений, реализованные в программных комплексах класса PLM, в отличие от традиционных методик расчета болтовых соединений, позволяют значительно приблизить модели к реальности, но значительно повышают требования к мощности ЭВМ. Поэтому крайне важно использовать все возможности программных комплексов для повышения эффективности расчетов.

Рассмотрим основные приемы и возможности в построении эффективных 3D КЭ моделей болтовых соединений

**Циклическая симметрия.** Наличие геометрической симметрии (или многократного повторения элемента геометрии) и допущение про равномерность распределения нагрузки, позволяет существенно уменьшить размеры КЭ модели (количество ее узлов) без потери точности решения. Например, на рис. 1а показано рядное двухсрезное соединение, которое операцией смещения в горизонтальной плоскости XY можно получить из повторяемого элемента геометрии, изображенного на рис. 1б. В свою очередь, последний можно получить из элемента рис.1-в операциями отражения. Если пренебречь некоторой несимметрией, создаваемой витками резьбы, то элемент рис. 1в составляет симметричную 1/24 часть элемента рис. 1а. С целью значительного ускорения расчетов именно элемент рис. 1в необходимо использовать при создании КЭ модели этого соединения. Для моделирования отсеченных частей необходимо и достаточно:

- запретить всем узлам КЭ сетки, лежащим на поверхностях рассечения, а также на боковых поверхностях рассечения верхней и нижней пластины (рис. 1в, слева), перемещаться в нормальных к этим поверхностям направлениях;



**Рис. 1.** Контактная 3D модель двухсрезного болтового соединения.

а) – полная геометрическая модель; б) – основной геометрический элемент; в) – расчетная геометрическая модель; г) – контактная поверхность головки болта; д) – осевое смещение  $\Delta$  резьбы гайки для стяжки пакета; е) – зоны концентрации напряжений, деформирования, зазоров; ж) – эквивалентные (Мизес) напряжения, МПа

• связать все узлы тыльных (рис.1в) поверхностей рассечения условием равного перемещения в нормальном к этим поверхностям направлении. Для этого используются КЭ типа RIGID RBE2, которые еще могут моделировать температурные деформации с назначенным коэффициентом температурного удлинения, тем самым максимально точно учитывая термомеханическую сторону процесса деформирования.

Смысл этих действий: поверхности рассечения при циклической симметрии должны остаться плоскими и не менять свою ориентацию, причем расстояние между фронтальными и тыльными поверхностями может меняться, но одинаково для всех узлов на них.

**Контактная 3D модель.** Контактный, с трением, характер взаимодействия между отдельными элементами соединения, моделируется назначением

контактных поверхностей (рис. 1г), из которых формируются контактные пары: контакт типа “поверхность-поверхность”. Во многих программных комплексах класса PLM этот процесс почти полностью автоматизирован: дается команда на поиск контактных поверхностей и составление из них контактных пар (сугубо геометрический анализ); затем остается добавить потенциально возможные контактные пары (в местах наличия больших зазоров), переназначить характерные для пар материалов свойства, в частности, тип контакта (“склеивание” или контакт), коэффициенты (модели) трения в контактных парах, уточнить контактный алгоритм, предельное число контактных итераций, требуемую точность решения и другие параметры.

**Усилие стяжки пакета.** Усилие стяжки пакета (после применения нормированной величины момента на ключе, при монтаже) в рамках метода ко-

нечных элементов можно с большой точностью моделировать осевым смещением резьбы гайки на некоторую величину  $\Delta$  в направлении от головки болта (рис. 1д). Основание гайки перемещаться не должно. Величину  $\Delta$  можно подсчитать по методике [8], подробно изложенной в [4, 5]. В то же время можно встретить публикации, в которых резьба не моделировалась, а гайка соединялась с болтом при помощи операции "контактного склеивания" [9, 10] (речь о которой пойдет далее). Очевидно, что податливость такого "болта с двумя головками" ниже податливости реального болта с накрученной по резьбе гайкой, т.е. необходимо дополнительно оценивать этот эффект и вводить соответствующие поправки в модель.

**"Контактное склеивание"**. Известно, что каждый слой ПКМ моделируют как 3D-ортотропный материал. С целью уменьшения времени счета применяют "теорию эффективного модуля" для подсчета эффективных модулей упругости в плоскости пластины из многослойного композиционного материала с разно-ориентированными слоями [9–12]. Однако это невозможно при моделировании частичных повреждений деталей из ПКМ. Тогда приходится моделировать каждый из монослоев отдельно, "укладывая" их под известными углами. Чтобы значительно не увеличивать размерность КЭ модели, можно рекомендовать такой подход: актуальные

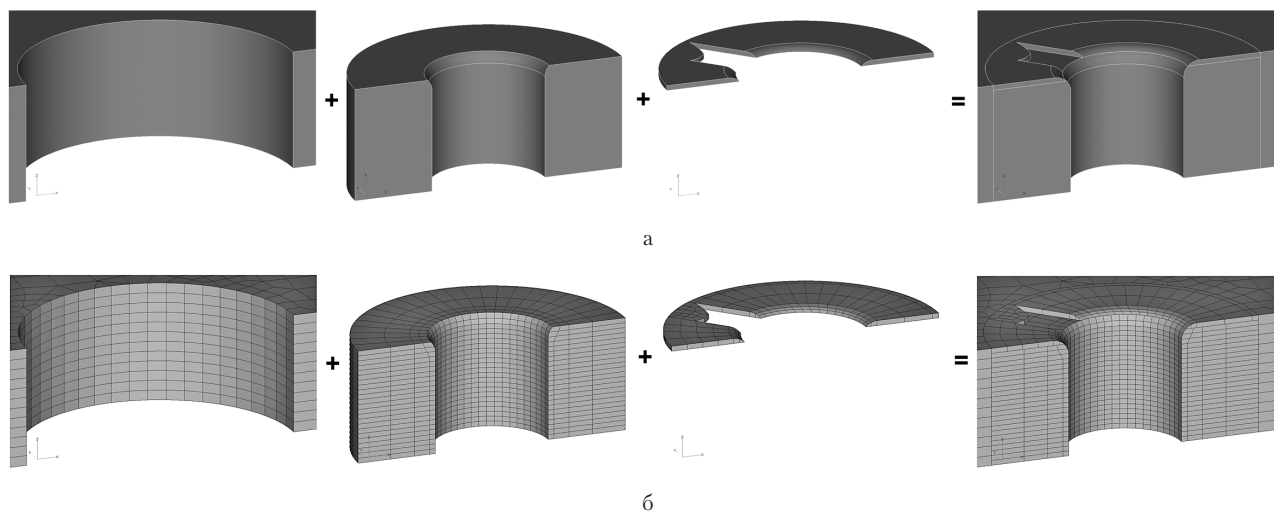
узнать более точный результат, не беспокоясь о согласовании КЭ сеток на стыках. Современные программы проводят "склеивание" с высокой точностью.

В итоге удается достаточно быстро создавать весьма близкие к реальности, качественные и не очень громоздкие трехмерные КЭ модели болтовых соединений, проводить расчеты и получать информацию, ранее недоступную по причине приближенных схем расчета соединений, отсутствия программных реализаций и мощной вычислительной техники.

Создание таких моделей требует от исполнителя глубокого понимания моделируемых процессов, хорошего знания программных комплексов, их возможностей и "инструментов".

На рис.1е и рис.1ж показаны некоторые результаты расчета контактной 3D модели двухсрезного болтового соединения, которые, несмотря на грубые КЭ сетки, весьма реалистичные по качественным и количественным параметрам. Для них моделировались: циклическая симметрия, контактный характер взаимодействия, трехмерность, усилие стяжки пакета. Расчеты проводили на 4-х ядерной ПЭВМ с 8 Гб оперативной памяти и HDD SATA III.

Какие же эффекты можно обнаружить, используя вышеописанные приемы и подходы, и проводя столь сложные расчеты? Приведем несколько примеров.



**Рис. 2.** Моделирование зоны уточненного расчета пластины из ПКМ с частичным сколом поверхностного монослоя при помощи технологии «контактного склеивания». а) – геометрическая модель; б) – конечно-элементная модель

зоны "вырезать" и моделировать послойно, а вдали от них моделировать ПКМ по "теории эффективного модуля", "склеивая" части детали из ПКМ по технологии "контактного склеивания". На рис. 2 это продемонстрировано при моделировании частично-скола одного монослоя ПКМ в зоне отверстия.

"Контактное склеивание" можно применять и к другим частям модели соединения, значительно сгущая или разрежая КЭ сетку в местах, где желательно

**Во-первых**, в срезных болтовых соединениях зазоры возникают даже при наличии предварительного (но незначительного) натяга или отсутствия зазора (рис. 3). Причина – изгиб и удлинение (с утонением) болта под действием на соединение силовых нагрузок (затягивания и эксплуатационной).

**Во-вторых**, в болтах на "классические" напряжения от затягивания болтов и от среза (посто-



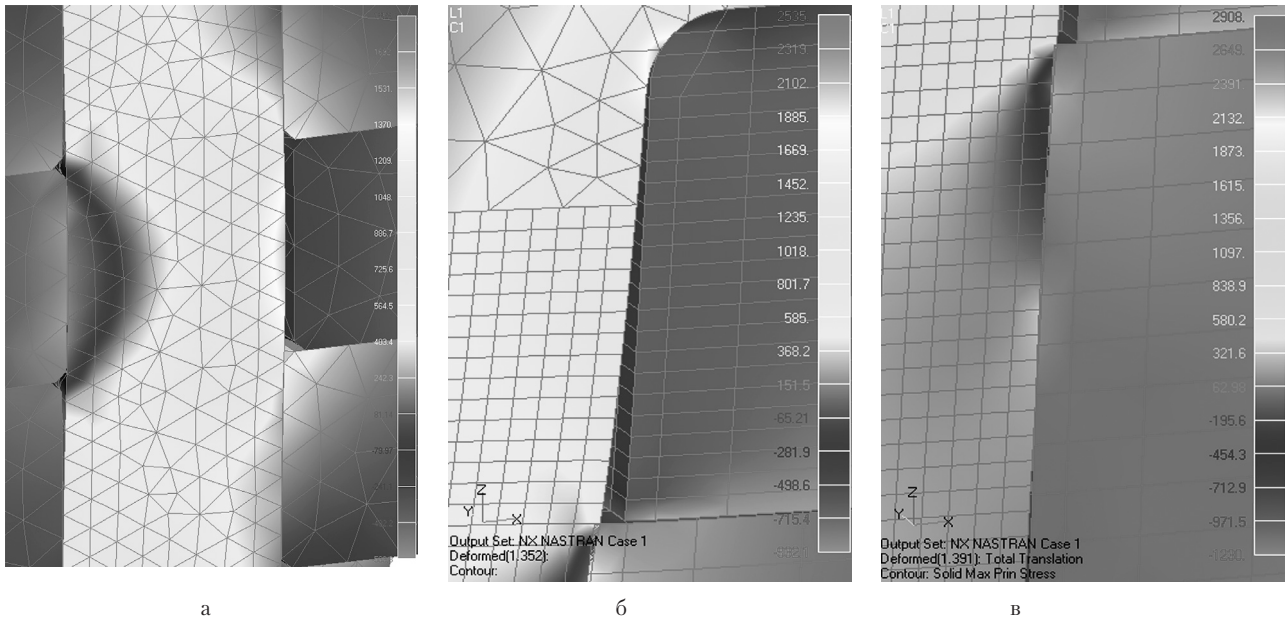


Рис. 3. Распределение напряжений, в сечении болтового соединения,  $\sigma$ , МПа,  
а – натяг 15 мкм (двухсрезовое соединение); б – без зазора, в – зазор 70 мкм (односрезовое соединение)

янные по величине значения), накладываются напряжения изгиба и контактные, возникающие в галтели (под головкой болта). Последние, могут значительно изменить "классические" представления о характере распределения напряжений в сечении болта (рис. 4 – рис. 6).

Так как контактные напряжения в зоне контакта всегда отрицательны (сжимающие) и могут быть весьма значительными, то в этих зонах (а это – приповерхностные зоны материала) эпюры напряжений резко уходят вниз (рис. 5а), провоцируя в касательных напряжениях локальные подповерхностные всплески (рис. 5б).

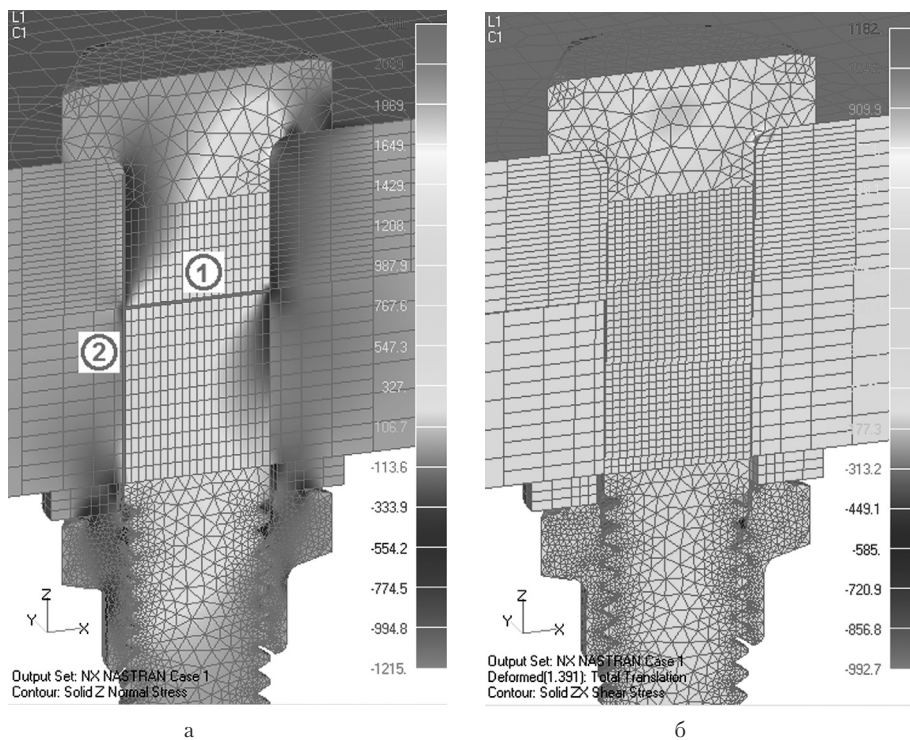


Рис. 4. Распределение напряжений в сечении односрезового однорядного болтового соединения с резьбой М5 (при нагрузке  $N_x=5$  кН, и моменте на ключе 5 кНм), МПа.  
а – осевое напряжение  $\sigma_z$  (модель без зазора); б) – касательное напряжение  $\tau_{zx}$  (модель с зазором 70 мкм)

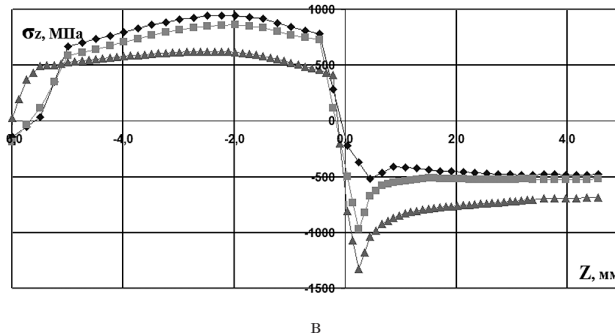
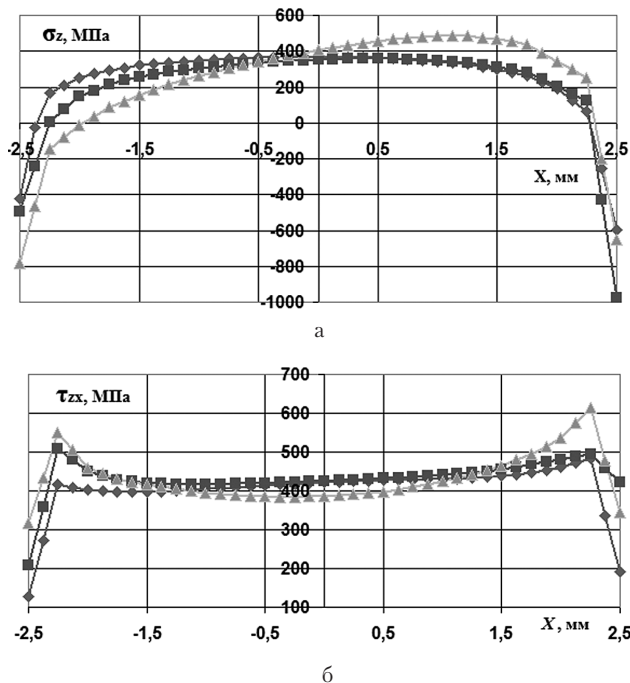


Рис. 5. Графики распределения напряжений в болте односрезового болтового соединения.

а – осевое напряжение  $\sigma_z$  вдоль линии 1 (рис. 4а);  
 б – касательные напряжения  $\tau_{xz}$  вдоль линии 1 (рис. 4а);  
 в – осевое напряжение  $\sigma_z$  вдоль линии 2 (рис. 4а)  
 ◆ – модель без зазора; ■ – модель с зазором 10мкм; ▲ – модель с зазором 70 мкм

В-третьих, переход от моделирования ПКМ с использованием “эффективных модулей упругости” к моделированию каждого монослоя позволяет выявить более реалистичную картину распределения напряжений в пластине из ПКМ в зоне отверстия (рис. 6, рис. 7, 3D-ортотропная 24-слойная структура [-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90/90/45/0/-45/90/45/0/-45/90/45/0/-45]).

Эти два монослоя не выдерживают рабочего усилия: значение  $\sigma_x$  в них падает практически полностью. Естественно, что рабочая нагрузка должна быть воспринята другими монослоями, в результате чего в них напряжения  $\sigma_x$  возрастают почти вдвое по сравнению с применением “эффективных” модулей упругости.

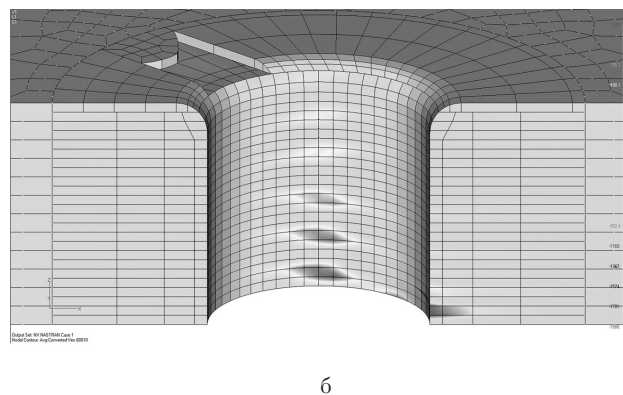
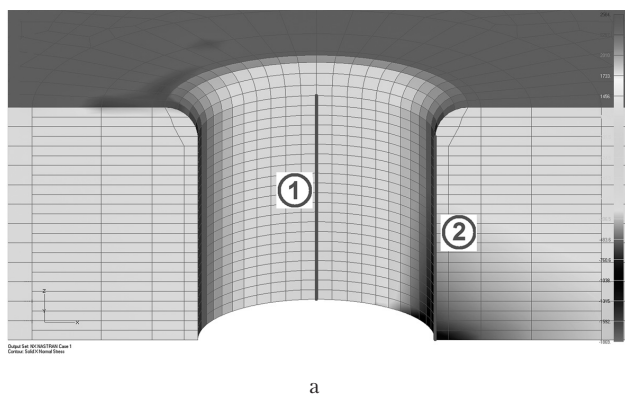
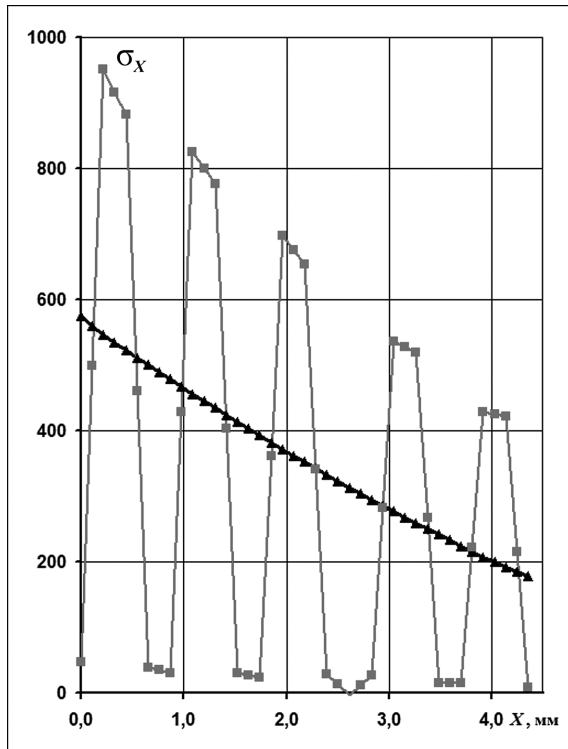


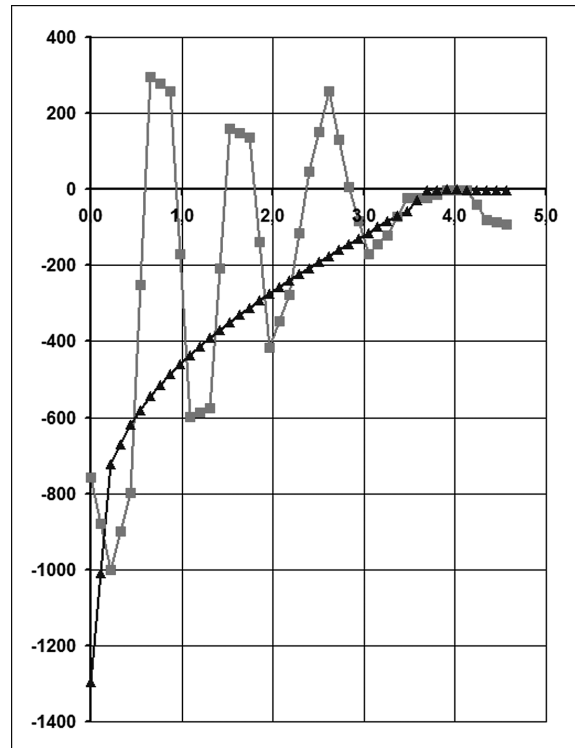
Рис. 6. Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  на поверхности отверстия в пластине из ПКМ для образца с односрезовым рядом болтовым соединением (зазор  $\delta = 10$  мкм), МПа  
 а – эффективные модули упругости, модель без скола; б – послойное моделирование, скол части 1-го монослоя

Моделирование каждого монослоя внесло более значительные изменения, чем учет наличия скола. Видно (рис. 7), что плавный характер распределения напряжения  $\sigma_x$  заменился на скачкообразный. Это связано с различным углом укладки монослоев ПКМ, который от слоя к слою менялся на 45 градусов по всей толщине пластины, кроме двух центральных монослоев, имею-

щих одинаковый угол укладки 90 градусов. График на рис. 7а показывает, что эти два монослоя не выдерживают рабочего усилия: значение  $\sigma_x$  в них падает практически полностью. Естественно, что рабочая нагрузка должна быть воспринята другими монослоями, в результате чего в них напряжения  $\sigma_x$  возрастают почти вдвое по сравнению с применением “эффективных” модулей упругости.



а



б

Рис. 7. Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  на поверхности отверстия образца с односрезным рядным болтовым соединением (зазор  $\delta = 10$  мкм,  $N_x = (N_x)_{max}$ ), МПа.

а – вдоль линии 1 (рис. 6а); б) – вдоль линии 2;  $\blacktriangle$  – эффективные модули упругости, модель без скола;  $\blacksquare$  – послойное моделирование, модель со сколом части первого монослоя.

Отметим, что при отдельном (неконтактном) моделировании НДС в пластине с отверстием обычно прикладывают нагрузку, в направлении оси отверстия, поэтому получают напряжения, не меняющиеся по толщине пластины, что в корне отличается от рассчитанных распределений напряжений, изображенных на рис.7, даже в случае применения "эффективных модулей упругости".

### Планирование расчетов. Регрессионные модели

С целью учета всех конструктивных, технических и эксплуатационных факторов необходимо провести большое количество трудоемких численных исследований НДС высоконагруженных соединений элементов конструкции планера самолета. Поэтому, недостаточно применять эффективные расчетные модели, необходимо проводить планирование расчетных экспериментов, снижая их количество, а также заменяя сложные контактные 3D КЭ расчеты на расчеты по простым формулам. Один из вариантов – регрессионные модели, связывающие, в частности, параметры напряженно-деформированного состояния элементов соединения с технологическими факторами.

В качестве примера приведем результаты моделирования в соответствии с полным факторным экс-

периментом  $3^2//9$  (два фактора на трех уровнях // девять экспериментов) с учетом влияния на НДС таких технологических факторов, как величина зазора/натяга и усилие стяжки пакета.

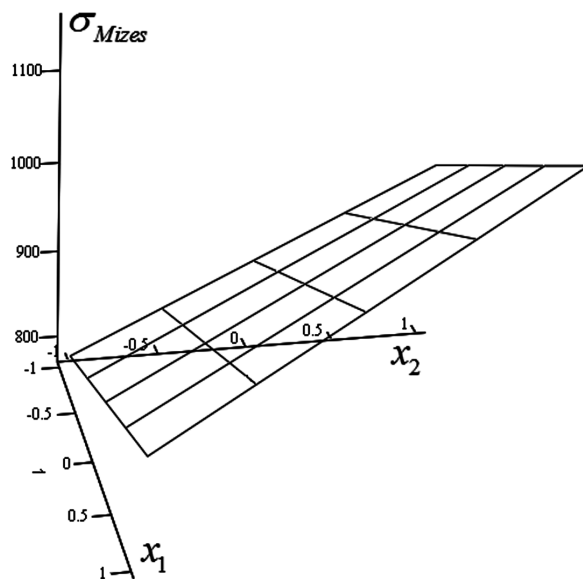


Рис. 8. График изменения максимального эквивалентного напряжения  $\sigma_{Mizes}$  от технологических факторов  $x_1, x_2$



По расчетным данным была построена регрессионная модель, которая позволила связать максимальное эквивалентное напряжение (Мизес) с величинами зазора/натяга и усилием стяжки пакета. В кодированных величинах после отбрасывания незначимых коэффициентов модель получила следующий вид:

$$(\sigma_{Mises})_{max} = 950,11 + 70,833x_1 + 113,667x_2 + 15,75x_1x_2,$$

где  $x_1$  – кодированное значение зазора/натяга,

$x_2$  – кодированное значение усилия стяжки пакета.

В соответствии с результатами расчета величина  $(\sigma_{Mises})_{max}$  изменялась в диапазоне от 782 МПа до 1146 МПа. На рис. 8 представлена поверхность значений  $(\sigma_{Mises})_{max}$  в зависимости от указанных выше технологических факторов.

Таким образом, продемонстрировано, что варьирование величин таких факторов, как зазор/натяг и усилие стяжки пакета, может изменять максимальное эквивалентное напряжение более чем на 30% при статическом нагружении. При циклическом нагружении этот эффект может быть еще существеннее.

### Выводы

Применение эффективных контактных 3D конечно-элементных моделей численных исследований НДС и планирование расчетов высоконагруженных болтовых соединений элементов конструкции планера самолета позволяют:

- максимально полно использовать возможности современных программных комплексов конечно-элементного моделирования класса PLM;
- проводить расчеты контактных 3D конечно-элементных моделей на современных персональных ЭВМ с достаточно высокой степенью точности;
- выявлять эффекты, полностью отсутствующие (игнорированные) в традиционных методиках расчетов и способные существенно повлиять на ресурс и несущую способность элементов авиационных конструкций;
- исследовать влияние технологических параметров и допустимых отклонений в исполнении;
- переходить от моделирования пластин из ПКМ с использованием "эффективных модулей упругости" к моделированию каждого монослоя;
- строить регрессионные модели, отсекающие второстепенные и учитывающие основные факторы, влияющие на НДС, прочность и долговечность элементов болтового соединения;
- значительно сокращать количество сложных контактных 3D конечно-элементных расчетов, заменяя их обоснованными регрессионными моделями.

### Символьные обозначения

$N$	Усилие, Н
$x_1$	Кодированное значение зазора в отверстии
$x_2$	Кодированное значение усилия стяжки пакета

### Греческие символы

$\Delta$	Осевое смещение резьбы гайки, мкм
$\delta$	Зазор, мкм
$\sigma$	Нормальные напряжения, Па
$\tau$	Касательные напряжения, Па

### Подстрочные и надстрочные индексы

$X, Y, Z$	Оси декартовой системы координат
1, 2	Порядковые номера
$Mizes$	Мизес – фамилия ученого
$max$	Указатель на максимальное значение

### Аббревиатуры

3D	Трехмерный
ЭМ	Электронный макет
КЭ	Конечный элемент
НДС	Напряженно-деформированное состояние
ПКМ	Полимерный композиционный материал
ЭВМ	Электронно-вычислительная машина
ПЭВМ	Персональная электронно-вычислительная машина
ИТ	Информационные технологии
ЖЦИ	Жизненный цикл изделия
CALS	Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции
PLM	Product Lifecycle Manufacturing – компьютерная технология управления жизненным циклом изделия, в частности, оценки качества спроектированной конструкции
RIGID RBE2	КЭ типа "жесткий стержень"
МПа	Мегапаскаль – единица измерения напряжений
Гбт	Гигабайт – единица измерения количества данных
HDD	Накопитель на магнитных жестких дисках
SATA	Интерфейс накопителя
кН	Килоньютон – единица измерения усилия
кНм	Килоньютон на метр – единица измерения момента



## Литература

- [1] Братухин А. Г. Основополагающие интегрированные информационные технологии конкурентоспособных изделий машиностроения / Братухин А.Г. // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ, 2012. – № 3(60). – С. 7–32.
- [2] Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций / А. Г. Гребенников. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2006. – 532 с.
- [3] Погосян М. А. Отечественные суперкомпьютерные технологии в авиационной промышленности / Погосян М.А., Савельевских Е.П., Стрелец Д.Ю., Корнев А.В. // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ, 2012. – № 3(60). – С. 33–43.
- [4] Кривов Г.А. Моделирование болтовых соединений, содержащих детали из ПКМ, в среде FEMAP/NAS-TRAN / Кривов Г.А., Матвиенко В.А., Рудько А.Н., Рудаков К.Н., Шукаев С.Н., Негода С.П. // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ, 2013. – №1(62). – С. 90–102.
- [5] Рудаков К.Н. Моделирование болтовых соединений из ПКМ в программном комплексе FEMAP/NX NAS-TRAN / Рудаков К.Н., Шукаев С.Н. // Вісник нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”, сер. Машинобудування №67, 2013. – С. 199–206.
- [6] Стрижиус В. Е. Руководство по расчетам на усталость элементов конструкции планера самолета (проект) / Стрижиус В. Е., Семернин А. В. // М.: Научный вестник МГТУ ГА, Серия: “Аэромеханика, прочность, поддержание летной годности ВС”, 2010. – 46 с.
- [7] Стрижиус В. Е. О некоторых гипотезах и допущениях при расчете усталостной долговечности элементов авиаконструкций из ПКМ // Научный вестник МГТУ ГА, 2011. – № 163(1). – С. 96-102.
- [8] Биргер И. А. Резьбовые и фланцевые соединения / Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. // М.: Машиностроение, 1990. – 365 с.
- [9] Johan Ekh, Joakim Schiцn, Gunnar Melin. Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints. – Composites. Part B: engineering, 2005. – 36. – s. 195–208.
- [10] Gordon Kelly. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. – Composite Structures, 2006. – 72. – s. 119–129.
- [11] Межслойные эффекты в композитных материалах // Под ред. Н. Пейгано / Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 346 с.
- [12] Milton Graeme W. The Theory of Composites. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 719 s.

**Krivov G.A.<sup>1</sup>, Matvienko V.A.<sup>1</sup>, Rudko A.N.<sup>1</sup>, Vasylevskiy E.T.<sup>2</sup>, Romanovich G.N.<sup>2</sup>, Rudakov K.N.<sup>3</sup>, Shukayev S.N.<sup>3</sup>, Dobronravov A.A.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ukrainian Research Institute of Aviation Technology, JSC. Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup> ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kyiv

<sup>3</sup> National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Ukraine, Kyiv

#### NUMERICAL STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF HIGH-LOADED JOINTS OF AIRFRAME STRUCTURAL COMPONENTS

*Using modern software class PLM, effective methods of constructing 3D contact models for finite-element analysis of the high-loaded joints of airframe structural components were discussed. The account of the cyclic symmetry, the obligatory creation of 3D contact models, application of the method “contact bonding”, which allows passage to the local fibre modelling composites, and thickening of the finite-element mesh are recommended. The mode of creation efforts of a coupler of a package is specified. It is shown that the implementation of effective models on a PC bolted shear connections can reveal some features of the stress-strain state of compounds that differ significantly from the “classic” view (without accounting methods, which are described above). It is recommended to carry out a design of numerical experiments for reducing their number and for replacing of complex three-dimensional contact finite element calculations on calculations by regression models. All calculations were performed in the software package Siemens PLM Femap 10.2.0 с NX Nastran.*

*Keywords:* a finite element method; contact; 3D models; stress-strain state; bolted joints; polymeric composite materials.

#### References

- [1] Bratuhin A. G. Osnovopolagajushhie integrirovannye informacionnye tehnologii konkurentosposobnyh izdelij mashinostroeniya. Tehnologicheskie sistemy [Technological Systems]. Kyiv: UkrNIAT, 2012, №3 (60), pp. 7–32. (In Russian)



- [2] Metodologija integrirovannogo proektirovanija i modelirovanija sbornyh samoletnyh konstrukcij. A. G. Grebennikov. Kharkov: Nac. ajerokosm. un-t "HAI", 2006. 532 p. (In Russian)
- [3] Pogosjan M. A., Savel'evskih E. P., Strelec D. Ju., Kornev A. V. Otechestvennye superkompjuternye tehnologii v aviacionnoj promyshlennosti. Tehnologicheskie sistemy [Technological Systems]. Kyiv: UkrNIAT, 2012, №3 (60), pp. 33–43. (In Russian)
- [4] Krivov G. A., Matvienko V. A., Rud'ko A. N., Rudakov K. N., Shukaev S. N., Negoda S. P. Modelirovanie boltovyh soedinenij, sodержashhih detali iz PKM, v srede FEMAP/NASTRAN. Tehnologicheskie sistemy [Technological Systems]. Kyiv: UkrNIAT, 2013, №1 (62), pp. 90–102. (In Russian)
- [5] Rudakov K. N., Shukaev S. N. Modelirovanie boltovyh soedinenij iz PKM v programmnom komplekse FEMAP/NX NASTRAN. Visnik nac. tehnič. un-tu Ukraїni "Kiїvs'kij politehničnij institut", ser. Mashinobuduvannja [Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"]. Kyiv. №67, 2013, pp. 199–206. (In Russian)
- [6] Strizhius V. E., Semernin A. V. Rukovodstvo po raschetam na ustalost' jelementov konstrukcii planera samoleta (proekt). Moscow: Nauchnyj vestnik MGTU GA, Serija: "Ajeromehanika, prochnost', podderzhanie letnoj godnosti VS", 2010. – 46 p. (In Russian)
- [7] Strizhius V. E. O nekotoryh gipotezah i dopushhenijah pri raschete ustalostnoj dolgovechnosti jelementov aviakonstrukcij iz PKM. Nauchnyj vestnik MGTU GA, 2011, № 163(1), pp. 96–102. (In Russian)
- [8] Birger I. A., Iosilevich G. B. Rez'bovyje i flancevyje soedinenija. Moscow: "Mashinostroenie", 1990. – 365 p. (In Russian)
- [9] Johan Ekh, Joakim Schiın, Gunnar Melin. Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints. Composites. Part B: engineering, 2005, no. 36, pp. 195–208.
- [10] Gordon Kelly. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. Composite Structures, 2006, no. 72, pp. 119–129.
- [11] Mezhslojnye jeffekty v kompozitnyh materialah [Interlaminar effects in composites]. Pod red. N. Pejgano. Moscow: "Mir", 1993. – 346 p. (In Russian)
- [12] Milton Graeme W. The Theory of Composites. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 719 p.