

Применение технологии цифровых двойников для решения задач модернизации перспективных летательных аппаратов

© К.С. Самсонов^{1,2}, П.А. Блинов¹, А.С. Несмелова³

¹АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»,
Московская обл., г. Королёв, 141080, Российская Федерация

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Российская Федерация

³ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева»,
Московская обл., г. Королёв, 141070, Российская Федерация

Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований по оценке возможности применения технологии цифровых двойников для решения задач модернизации конструкций перспективных летательных аппаратов. Расчеты на прочность конструкции цельнокомпозитной консоли крыла перспективного летательного аппарата выполнялись методом конечных элементов в специализированном программном комплексе ANSYS. Проведена валидация расчетов с использованием цифрового двойника и результатов лабораторных испытаний полноразмерной конструкции цельнокомпозитной консоли крыла. Результаты расчетов, выполненных в среде ANSYS, показали высокую сходимость с данными лабораторных испытаний, относительная погрешность составила 3 %. Показана эффективность применения технологии цифровых двойников для решения задач модернизации перспективных летательных аппаратов, а также высокая достоверность результатов.

Ключевые слова: летательный аппарат, цифровой двойник, конструкция, системный анализ, испытания, модернизация

Введение. Для улучшения тактико-технических характеристик современных летательных аппаратов требуется постоянная их модернизация [1–3], однако этот процесс осложняется взаимосвязью конструктивных параметров. Например, увеличение дальности полета за счет топлива ведет к изменению массогабаритных показателей и центра масс, из-за чего возникает необходимость корректировки системы управления.

Для оптимизации процесса модернизации предлагается применение технологии цифровых двойников — систем, интегрирующих цифровые модели изделий с двусторонними информационными связями (ГОСТ Р 57700.37–2021) [4–9]. Цифровые двойники позволяют:

- прогнозировать поведение конструкции на всех этапах жизненного цикла;
- сокращать объем дорогостоящих натурных испытаний;
- анализировать комплексное влияние изменений параметров.

Основной недостаток данной технологии — зависимость от квалификации специалистов, вычислительных мощностей и финансирования.

Однако ее внедрение в ракетно-космическую и авиационную отрасли остается перспективным направлением, для которого требуются дальнейшие исследования.

Цель данного исследования — оценка возможности применения технологии цифровых двойников для решения задач модернизации конструкций перспективных летательных аппаратов, включая валидацию расчетных данных с результатами лабораторных испытаний. Задачи исследования:

1) разработка цифрового двойника цельнокомпозитной консоли крыла летательного аппарата с учетом геометрических, массогабаритных, прочностных и модальных характеристик;

2) проведение расчетов методом конечных элементов в среде ANSYS для оценки жесткостных и прочностных свойств конструкции;

3) выполнение лабораторных испытаний на динамическую и статическую прочность для валидации результатов расчетных исследований;

4) сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных с определением степени их соответствия, оценка относительной погрешности;

5) оценка эффективности применения цифровых двойников для сокращения временных и финансовых затрат при модернизации летательных аппаратов.

Основная часть. Структурная блок-схема реализации технологии цифровых двойников для летательных аппаратов представлена на рис. 1. В цифровом двойнике объекта исследования учитываются конструктивные особенности, геометрические, массогабаритные, инерциальные, жесткостные, прочностные и модальные характеристики конструкции летательного аппарата.

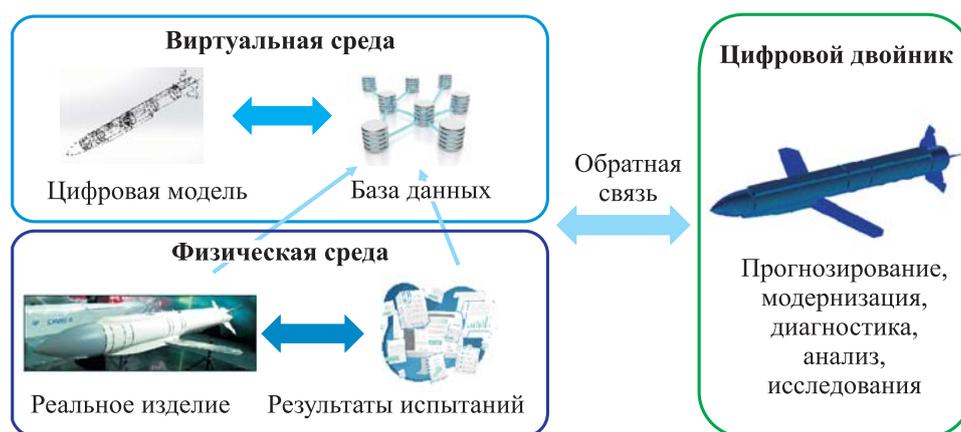


Рис. 1. Структурная блок-схема реализации технологии цифровых двойников для летательных аппаратов

Оценка возможности модернизации перспективного летательного аппарата с использованием технологии цифровых двойников проведена в рамках оперативных работ по созданию цельнокомпозитной консоли крыла изделия в АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение». Консоли разработаны на основе отечественного полимерного композиционного материала — препрега C200UD ACM-102. Цельнокомпозитная консоль крыла должна быть прочной (ГОСТ 28231–89) при воздействии:

- механического удара одиночного действия амплитудой 150g и длительностью 10 мс;
- виброудара амплитудой 50g и длительностью 30 мс;
- статической эксплуатационной аэродинамической нагрузки.

В качестве виртуальной среды для реализации цифрового двойника в виде компьютерной модели (ГОСТ Р 57412–2017) выбран специализированный программный комплекс ANSYS, позволяющий учесть все требуемые характеристики и выполнить расчет. При моделировании композита учитывались углы укладки и количество слоев. Для оценки жесткостных и прочностных свойств конструкции и проведения расчетов использован метод конечных элементов [10–19]. Проведен анализ сеточной сходимости. Разработанная конечно-элементная модель состоит из 101964 узлов и 504744 элементов. Статическая нагрузка на консоль приложена в виде распределенных сил в соответствии с реальными эксплуатационными внешними механическими воздействующими факторами.

Результаты расчетов. При проведении расчетов использовались высокопроизводительные вычислительные ресурсы. Подготовка расчетных конечно-элементных моделей выполнялась на расчетной станции. Типовые методики создания цифровых двойников конструкций летательных аппаратов описаны в работах [5, 6, 9, 14].

Расчеты конструкции с использованием цифрового двойника показали положительные результаты по жесткостным и прочностным характеристикам предлагаемых консолей из полимерных композиционных материалов на основе препрега C200UD ACM-102. Прочность при воздействии на них механического удара одиночного действия и виброудара обеспечивается.

Результаты расчета в среде ANSYS перемещений цельнокомпозитной консоли крыла под действием нагрузки представлены на рис. 2. Максимальное перемещение исследуемой консоли под действием статических эксплуатационных нагрузок составило 156,33 мм.

Остаточные перемещения цельнокомпозитной консоли, полученные в результате расчета в среде ANSYS, приведены на рис. 3. Максимальное значение остаточных перемещений рассматриваемой консоли (в ее концевой части) составило 9,24 мм.



Рис. 2. Максимальные перемещения цельнокомпозитной консоли под действием нагрузки, полученные при расчете в среде ANSYS



Рис. 3. Результаты расчета в среде ANSYS остаточных перемещений цельнокомпозитной консоли на цифровом двойнике модели консоли крыла

Трудозатраты на разработку цифрового двойника конструкции цельнокомпозитной консоли крыла [20] и выполнение расчетов с учетом геометрических, массогабаритных, прочностных и модальных характеристик, свойств материала, технологий и особенности укладки слоев составили 10 рабочих дней. Дополнительно затрачено 4 ч на уточнение характеристик материалов по результатам испытания образца-свидетеля и на повторный расчет. Трудоемкость работ инженерно-технических работников составила 80 чел./мес (инженер-конструктор 1-й категории), рабочих — 10 н.-ч. В данном расчете трудозатрат не учитывается возможная необходимость аренды высокопроизводительных вычислительных мощностей и материальные затраты на изготовление образца-свидетеля.

Результаты лабораторных испытаний. Для подтверждения и валидации результатов расчетных исследований были выполнены лабораторные испытания на динамическую и статическую прочность. Они проводились в центре наземных испытаний АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» на одном полноразмерном образце цельнокомпозитной консоли крыла летательного аппарата. Положительными критериями при лабораторных испытаниях являются:

- отсутствие механических дефектов и трещин после механического воздействия и сохранение жесткости конструкции консоли;
- перемещения цельнокомпозитной консоли крыла под действием статических эксплуатационных нагрузок, не превышающие 10 мм;
- отсутствие механических дефектов и трещин при снятии механической нагрузки;
- проведение испытаний только на одном и том же опытном образце.

Испытания на динамическую прочность консоли (механический удар одиночного действия и виброудар) соответствуют максимально возможной динамической нагрузке, возникающей при раскрытии и стопорении консоли крылевого модуля. Результаты испытаний на динамическую прочность консоли крыла перспективного летательного аппарата представлены на рис. 4.

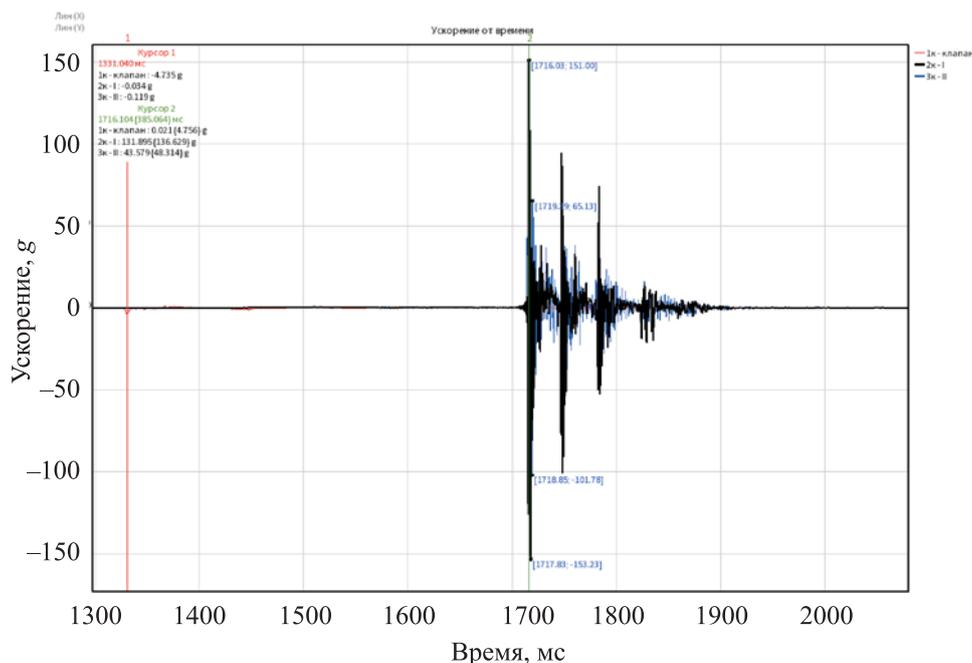


Рис. 4. Результаты испытаний на динамическую прочность цельнокомпозитной консоли крыла (механический удар одиночного действия и виброудар)

На записи осциллографа зафиксированы обобщенное воздействие механического удара одиночного действия и виброудара при раскрытии и стопорении консоли. Максимальная реализованная амплитуда механического удара длительностью 9,87 мс составила 153,23g, а максимальная амплитуда виброудара длительностью 31,2 мс — 65,13g. Сигнал содержит как положительные, так и отрицательные пики, что характерно для сложных колебательных процессов. После проведенных испытаний выполнен органолептический анализ цельнокомпозитной консоли, показавший, что механические дефекты и трещины отсутствуют. Динамическая прочность крыла летательного аппарата при воздействии механического удара одиночного действия и виброудара обеспечивается.

Испытания на статическую прочность цельнокомпозитной консоли, соответствующие действию максимальной эксплуатационной внешней аэродинамической нагрузке, проводились на полноразмерном образце консоли летательного аппарата, успешно прошедшем

испытания на динамическую прочность. Статическая нагрузка задавалась ступенями по 10 % нагрузки — от нулевой до максимальной. Аэродинамическая нагрузка реализована на объекте исследования в виде сосредоточенных сил, эквивалентных распределенной нагрузке по поверхности. Замеры перемещений проводились в четырех контрольных точках бортовой и концевой хорды на максимальном удалении от узла закрепления. Значения перемещений регистрировались сертифицированными лазерными дальномерами. Графики зависимости максимальных перемещений конструкции консоли и максимальных остаточных перемещений от времени представлены на рис. 5.

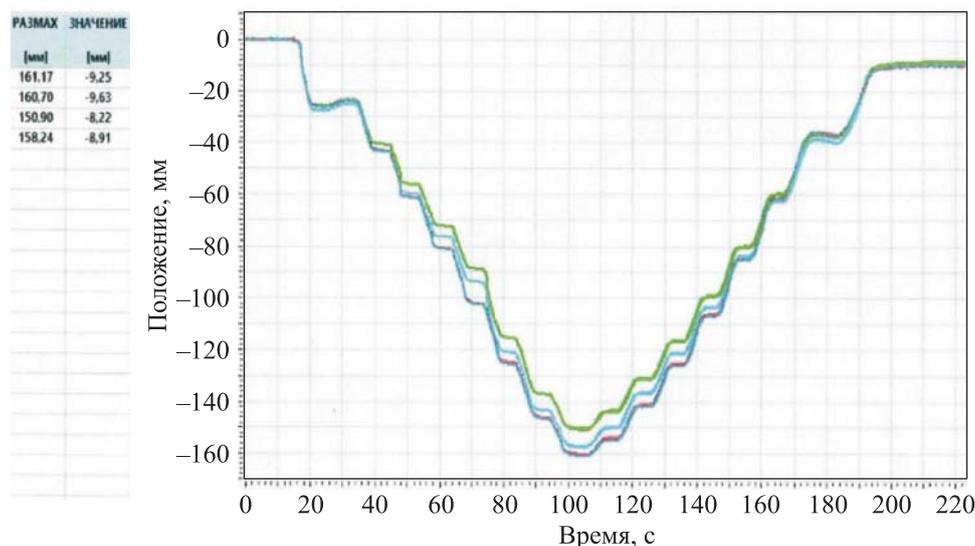


Рис. 5. Результаты испытаний консоли крыла на статическую прочность

Значения максимальных перемещений цельнокомпозитной консоли под действием нагрузки при статических испытаниях составили, мм: 161,17; 160,70; 150,90; 158,24. Результаты испытаний показывают высокую количественную и качественную сходимость с результатами расчета. Отмечается незначительная крутка крыла ввиду смещения аэродинамической нагрузки относительно бортовой хорды консоли (см. рис. 3).

По результатам статических испытаний максимальные остаточные перемещения цельнокомпозитной консоли составили, мм: 9,25; 9,63; 8,22 и 8,91. Органолептический анализ цельнокомпозитной консоли, выполненный после статических испытаний, показал, что механические дефекты, трещины и разрывы волокон отсутствуют.

Относительная погрешность результатов расчетов и лабораторных испытаний, составившая 3 %, связана с тем, что при статических испытаниях аэродинамическая нагрузка реализована в виде сосредоточенных сил, эквивалентных нагрузке, распределенной по поверхности;

лазерные дальнометры имеют свою погрешность измерений; в расчетных исследованиях использовались характеристики образца-свидетеля, которые не в полной мере могут соответствовать характеристикам цельного изделия.

Итоговые временные трудозатраты на изготовление матрицы цельнокомпозитной консоли крыла и самой консоли, отработку технологии, подготовку к проведению испытаний, формирование программ и методик проведения испытаний и проведение анализа результатов составили 4 мес. Трудоемкость работ инженерно-технических работников составила более 1540 чел./мес, рабочих — более 970 н.-ч. В данном расчете трудозатрат не учитываются материальные затраты на сырье, инструменты, комплектующие, амортизацию оборудования, на подготовку и освоение производства, а также общепроизводственные, общехозяйственные и прочие затраты.

Обсуждение и выводы. Результаты обобщения и анализа проведенных исследований позволили сделать вывод о том, что статическая и динамическая прочность цельнокомпозитной консоли крыла обеспечивается. Доказано, что применение технологии цифровых двойников дает возможность с высокой точностью прогнозировать поведение сложных цельнокомпозитных конструкций, таких как консоль крыла летательного аппарата. Результаты расчетов, выполненных в среде ANSYS, показали высокую сходимость с данными лабораторных испытаний, относительная погрешность составила 3 %.

Максимальные перемещения цельнокомпозитной консоли при статических испытаниях (161,17 мм) и остаточные деформации (9,63 мм) коррелируют с расчетными значениями (156,33 мм и 9,24 мм соответственно), что подтверждает адекватность модели. Технология цифровых двойников демонстрирует значительный потенциал для сокращения трудозатрат — более чем в 27 раз и сроков проведения исследований — в 8 раз.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило эффективность использования цифровых двойников для модернизации конструкций летательных аппаратов. Применение компьютерных расчетных моделей, разработанных с использованием метода конечных элементов и учитывающих геометрические, массогабаритные, прочностные и модальные характеристики, позволяет не только прогнозировать поведение конструкции перспективных летательных аппаратов, но и рационализировать финансовые и временные затраты при проектировании и проведении испытаний. Результаты работы применимы в ракетной, ракетно-космической и авиационной промышленности для ускорения процессов модернизации и повышения качества принимаемых инженерных решений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Обносов Б.В. Стратегия развития информационных технологий ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение». *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2007, № 7, с. 24–27.
- [2] Самсонов К.С., Севрюкова А.В., Кузнецова Т.И. Повышение эффективности системы контроля над созданием инновационных материалов. *Гуманитарный вестник*, 2016, № 10 (48). URL: <http://hmbul.ru/issues/48.html> (дата обращения: 15.06.2024).
- [3] Севрюкова А.В., Самсонов К.С., Богомолов К.О., Папшева Е.О. Анализ возможности расширения областей применения композиционных материалов в ракетно-космической технике. *Материалы XII Междунар. конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), Алушта, 24–31 мая 2018 г.* Москва, Изд-во МАИ, 2018, с. 708–709.
- [4] Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства. *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 105–115.
- [5] Смоленцев Н.А., Самсонов К.С., Блинов П.А., Медведь В.С. Разработка методики проведения цифровых прочностных испытаний конструкции летательного аппарата при многофакторном нагружении. *Тепловые процессы в технике*, 2023, т. 15, № 1, с. 31–38.
- [6] Мужичек С.М., Корзун М.А., Скрынников А.А., Савенко А.К. О специализированных цифровых двойниках типовых объектов воздействия. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2024, № 4, с. 45–50.
- [7] Межин В.С., Обухов В.В. Сравнительный анализ методов экспериментального подтверждения конечно-элементных динамических моделей конструкции космических аппаратов. *Космическая техника и технологии*, 2016, № 4 (15), с. 14–23.
- [8] Бахтина Т.Е., Григорьев Р.Н., Самойлов Д.В. Современные подходы к созданию и перспективы применения цифровых двойников авиационных комплексов. *Авиационные системы в XXI веке: Тезисы докладов юбилейной Всероссийской научно-технической конференции*. Москва, ГосНИАС, 2022, с. 37–38.
- [9] Прокушев Н.И., Олейников Е.П. Цифровые двойники в проектировании ракетно-космической техники. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах.* Ю.Ю. Логинов, ред. Красноярск, 2022, т. 1, с. 151–153.
- [10] Чернышев С.Л., Зиченков М.Ч., Ишмуратов Ф.З., Чедрик В.В. Тенденции развития вычислительной механики для прочностного проектирования конструкций ЛА. *Чебышевский сборник*, 2017, т. 18, № 3, с. 482–499. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2017-18-3-482-499>
- [11] Беляева И.А., Глушченков В.А. Последовательность компьютерного моделирования комбинированных (статико-динамических) технологий машиностроения. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2016, т. 18 № 4, с. 76–81.
- [12] Щесняк С.С., Хитров И.В., Сергиевский С.А., Романов А.В., Девятков С.В., Георгиев А.Ф. Проектирование и расчет крупногабаритных раскрывающихся конструкций с помощью программных комплексов MSC.Software. *CADmaster*, 2009, № 2–3, с. 28–36.

- [13] Чуйко Д.С., Самсонов К.С., Торопов Н.П. Разработка специализированного программного комплекса многокритериальной оптимизации конструкции летательных аппаратов на раннем этапе проектирования. *Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: Сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всерос. межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов*. Москва, Изд-во Перо, 2022, с. 169–170. EDN XPHCYR
- [14] Tsvetkov O.I., Reznik S.V., Samsonov K.S. Thermocontrol for a space tourism vehicle model. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2318, 44, art. no. 020013. DOI: 10.1063/5.50039585
- [15] Титов В.А. Особенности анализа нагружения ракетно-космических конструкций по результатам обработки телеметрической информации. *Труды МАИ*, 2017, № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80275>
- [16] Калашник В.С., Яшин Д.С., Затылкин А.В. Вибрационные воздействия как причина отказов изделий авиационной техники. *Труды Междунар. симп. «Надёжность и качество»*, в 2 т. Пенза, ПГУ, 2015, т. 1, с. 313–315.
- [17] Зиченков М.Ч., Дзюба А.С., Дубинский С.В., Лимонин М.В., Парышев С.Э., Панков А.В. Развитие методов анализа и исследования прочности авиационных конструкций. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2018, № 11, с. 87–105.
- [18] Меделяев И.А., Макаров Д.В., Трибунский А.И. Информационная модель объекта испытаний для оценки параметров технического состояния его силовой конструкции при динамическом нагружении. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2024, № 4, с. 152–155.
- [19] Блинов П.А., Самсонов К.С. Экономическая эффективность применения имитационного моделирования в практике испытаний летательных аппаратов. *Тезисы докладов XXIII Науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева»*. Королёв, РКК «Энергия», 2024, с. 618–620.
- [20] Гунчин В.К., Больших А.А., Устинов Б.Е. Разработка и апробация методики численного моделирования аэроупругого состояния крыла на основе методов конечных элементов и контрольных объемов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2291>

Статья поступила в редакцию 10.07.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Самсонов К.С., Блинов П.А., Несмелова А.С. Применение технологии цифровых двойников для решения задач модернизации перспективных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 11. EDN IRUNCZ

Самсонов Кирилл Сергеевич — канд. техн. наук, заместитель начальника расчетно-экспериментального отдела — начальник бригады динамических нагрузок и ресурса конструкции, АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»; аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sams1@bk.ru

Блинов Павел Анатольевич — начальник расчетно-экспериментального отдела, АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение». e-mail: ivers_rwb@mail.ru

Несмелова Анастасия Сергеевна — инженер 1-й категории, ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева».

Application of digital twin technology for solving modernization tasks of advanced aerospace vehicles

© K.S. Samsonov^{1,2}, P.A. Blinov¹, A.S. Nesmelova³

¹JSC “Tactical Missile Corporation”, Korolyov, 141080, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

³Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolyov, 141070, Russian Federation

The paper presents computational and experimental study results evaluating the implementation of digital twin technology for structural modernization of advanced aircraft. FEM-based strength analysis of an all-composite wing console for the next-generation aircraft was conducted using the ANSYS engineering simulation software. Validation was performed through digital twin correlation with full-scale laboratory testing data of the composite wing assembly. The numerical results obtained in ANSYS demonstrated strong agreement with experimental data, showing a marginal 3% deviation. The study confirms digital twin technology as a reliable and effective solution for structural upgrade projects in next-generation airframe development.

Keywords: advanced aircraft, digital twin, design, system analysis, tests, modernization

REFERENCES

- [1] Obnosov B.V. Strategiya razvitiya informatsionnykh tekhnologiy OAO «Korporatsiya «Takticheskoye raketnoye vooruzheniye» [Strategy for the development of information technologies in JSC “Corporation “Tactical Missiles Armament”]. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal «Polet» — All-Russian Scientific and Technical Journal “Polyot” (Flight)*, 2007, no. 7, pp. 24–27.
- [2] Samsonov K.S., Sevryukova A.V., Kuznetsova T.I. Povysheniye effektivnosti sistemy kontrolya za sozdaniyem innovatsionnykh materialov [Increasing the system efficiency of the control over the innovative material development]. *Gumanitarnyy vestnik — “Humanities Bulletin” of BMSTU*, 2016, iss. 10 (48). Available at: <http://hmbul.ru/issues/48.html> (accessed June 15, 2024).
- [3] Sevryukova A.V., Samsonov K.S., Bogomolov K.O., Papsheva E.O. Analiz vozmozhnosti rasshireniya oblastey primeneniya kompozitsionnykh materialov v raketno-kosmicheskoy tekhnike [Analysis of the possibility of expanding the application areas of composite materials in rocket and space technology]. In: *Materialy XII Mezhdunar. konf. po prikladnoy matematike i mekhanike v aerokosmicheskoy otrasli (NPNJ'2018), Alushta, 24–31 maya 2018* [Proceedings of XII International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (NPNJ'2018), Alushta, May 24–31, 2018]. Moscow, MAI Publ., 2018, pp. 708–709.
- [4] Kurganova N.V., Filin M.A., Cherniaev D.S., Shaklein A.G., Namiot D.E. Vnedreniye tsifrovyykh dvoynikov kak odno iz klyuchevyykh napravleniy tsifrovizatsii proizvodstva [Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 105–115.
- [5] Smolentsev N.A., Samsonov K.S., Blinov P.A., Medved V.S. Razrabotka metodiki provedeniya tsifrovyykh prochnostnykh ispytaniy konstruksii letatel'nogo apparata pri mnogofaktornom nagruzhenii [Digital strength tests conducting technique de-

- veloping for spacecraft at multifactor loading]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 31–38.
- [6] Muzhichek S.M., Korzun M.A., Skrynnikov A.A., Savenko A.K. O spetsializirovannykh tsifrovyykh dvoynikakh tipovykh obyektov vozdeystviya [On the specialized digital twins of typical impact objects]. *Izvestiya RARAN — Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2024, no. 4, pp. 45–50.
- [7] Mezhin V.S., Obukhov V.V. Sravnitel'nyy analiz metodov eksperimental'nogo podtverzhdeniya ko-nechno-elementnykh dinamicheskikh modeley konstruktssii kosmicheskikh apparatov [The comparative analysis of experimental methods of spacecraft structure dynamic finite element models verification]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2016, no. 4 (15), pp. 14–23.
- [8] Bakhtina T.E., Grigoriev R.N., Samoilov D.V. Sovremennyye podkhody k sozdaniyu i perspektivy primeneniya tsifro-vykh dvoynikov aviatsionnykh kompleksov [Modern approaches to the creation and prospects for the application of digital twins of aviation complexes]. In: *Aviatsionnyye sistemy v XXI veke: Tezisy dokladov yubileyroy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Aviation systems in the 21st century: Abstracts of the reports of the anniversary All-Russian scientific and technical conference]. Moscow, GosNIAS, 2022, pp. 37–38.
- [9] Prokushev N.I., Oleynikov E.P. Tsifrovyye dvoyniki v proyektirovani raketno-kosmicheskoy tekhniki [Digital twins in rocket and space technology design]. In: *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki: Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu kosmonavtiki* [Current Issues in Aviation and Cosmonautics: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference Dedicated to Cosmonautics Day]. In 3 vols. Yu.Yu. Loginov, ed. Krasnoyarsk, 2022, vol. 1, pp. 151–153.
- [10] Chernyshev S.L., Zichenkov M.Ch., Ishmuratov F.Z., Chedrik V.V. Tendencies in development of computational mechanics for strength design of aircraft structures. *Chebyshevskii Sbornik*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 482–499. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2017-18-3-482-499>
- [11] Belyaeva I.A., Glushchenkov V.A. Posledovatelnost kompyuternogo modelirovaniya kombinirovannykh (statiko-dinamicheskikh) tekhnologiy mashinostroeniya [The Sequence of computer simulation of combined (static-dynamic) technologies of mechanical engineering]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* ("Izvestia RAS SamSC"), 2016, vol. 18, no. 4, pp. 76–81.
- [12] Shchesnyak S.S., Khitrov I.V., Sergievskiy S.A., Romanov A.V., Devyatov S.V., Georgiev A.F. Proektirovanie i raschet krupnogabaritnykh raskryvaiushchikhsia konstruktssii s pomoshch'iu programmnykh kompleksov MSC.Software [Engineering and design of large-scale pull-down structures with software systems MSC.Software]. *CADmaster*, 2009, no. 2-3, pp. 28–36.
- [13] Chuyko D.S., Samsonov K.S., Toropov N.P. Razrabotka spetsializirovannogo programmnoy kompleksa mnogokriterialnoy optimizatsii konstruktssii letatelnykh apparatov na rannem etape proyektirovaniya [Development of a specialized software package for multicriteria optimization of aircraft structures at the early design stage]. In: *Molodozh i budushcheye aviatsii i kosmonavtiki: Sbornik annotatsiy konkursnykh rabot XIV Vseros. mezhtrastsevogo molodozhnogo konkursa nauchno-tekhnicheskikh rabot i projektov* [Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics: A Collection of Abstracts of Competition Works of the XIV All-Russian Intersectoral Youth Competition of Scientific and Technical Works and Projects]. Moscow, Pero Publ., 2022, pp. 169–170.
- [14] Tsvetkov O.I., Reznik S.V., Samsonov K.S. Thermocontrol for a space tourism vehicle model. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2318, art. no. 020013. DOI: 10.1063/5.50039585

- [15] Titov V.A. Osobennosti analiza nagruzheniya raketno-kosmicheskikh konstruksiy po rezultatam obrabotki telemetricheskoy informatsii [Features of load analysis of rocket and space structures based on telemetry data processing]. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80275>
- [16] Kalashnik V.S., Yashin D.S., Zatytkin A.V. Vibratsionnyye vozdeystviya kak prichina otkazov izdeliy aviatsionnoy tekhniki [Vibrational impacts as a cause of failures in aviation equipment]. *Trudy Mezhdunar. simp. "Nadezhnost i kachestvo"* [Proceedings of the International Symp. "Reliability and Quality"]. In 2 vol. Penza, Penza SU Publ., 2015, vol. 1, pp. 313–315.
- [17] Zichenkov M.Ch., Dzyuba A.S., Dubinskiy S.V., Limonin M.V., Paryshev S.E., Pankov A.V. Razvitiye metodov analiza i issledovaniya prochnosti aviatsionnykh konstruksiy [Development of Airframe Structural Strength Research Methods]. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal «Polet» — All-Russian Scientific and Technical Journal "Polyot" (Flight)*, 2018, no. 11, pp. 87–105.
- [18] Medelyaev I.A., Makarov D.V., Tribunskiy A.I. [Information model of a test object for assessing the parameters of the technical condition of its load-bearing structure under dynamic loading]. *Izvestiya RARAN — Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2024, no. 4, pp. 152–155.
- [19] Blinov P.A., Samsonov K.S. Ekonomicheskaya effektivnost primeneniya imitatsionnogo modelirovaniya v praktike ispytaniy letatelnykh apparatov [Economic efficiency of using simulation modeling in the practice of aircraft testing]. In: *Tezisy dokladov XXIII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Molodykh uchennykh i spetsialistov PAO "RKK "Energiya" imeni S.P. Koroleva"* [Abstracts of the XXIII Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of PJSC S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia]. Korolyov, RSC Energia, 2024, pp. 618–620.
- [20] Gunchin V.K., Bolshikh A.A., Ustinov B.E. Razrabotka i aprobatsiya metodiki chislennogo modelirovaniya aerouprugogo sostoyaniya kryla na osnove metodov konechnykh elementov i kontrolnykh obyemov [Design, development and approbation of the numerical technique in simulating the wing aeroelastic state based on the finite element and control volumes methods]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2291>

Samsonov K.S., Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Calculation and Experimental Department – Head of the Dynamic Loads and Structural Resource Team, JSC “Tactical Missile Corporation”; Postgraduate, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sams1@bk.ru

Blinov P.A., Head of the Calculation and Experimental Department, JSC “Tactical Missile Corporation”. e-mail: ivers_rwb@mail.ru

Nesmelova A.S., 1st category Engineer, Rocket and Space Corporation “Energiya”.