

И.Е. Меркулов^{1, 2}, А.И. Ендогур¹

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

² АО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ»», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СВАРНЫХ ОТСЕКОВ СВЕРХЗВУКОВЫХ САМОЛЕТОВ С УЧЕТОМ ИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Изложен подход к созданию методики проектирования рациональных конструкций сварных отсеков с учетом конструктивно-технологических факторов, основанный на учете комплекса параметров: остаточных напряжений, вызванных усадкой сварного шва, характеристик сечений, толщин, моделей материалов и т.п. Проанализированы работы отечественных, зарубежных авторов. По результатам В.Н. Моисеевым с коллективом авторов написана статья, задачей которой была разработка математической модели сварного отсека, а также предложен алгоритм решения задачи рационального проектирования в части параметрической оптимизации верхней панели отсека по критерию массы конструкции. Предложен способ синтеза системы сварной конструкции, учитывающий порядок сборки-сварки отсека по положению замыкающего шва. Применена ранее разработанная конечно-элементная модель сварного отсека с учетом остаточных напряжений посредством модификации метода фиктивных сил, предложенного отечественными авторами в 1950-х гг. и базирующегося на результатах изысканий отечественных ученых в области сварки. Используемый метод врожденных деформаций (inherent strain method) учитывает усадку шва в заданном диапазоне значений температуры. Выявлено влияние конструктивно-технологических особенностей на несущую способность сжатой верхней панели сварного отсека, находящейся в условиях комбинированного нагружения. В результате предложенная методика позволила провести структурно-параметрическую оптимизацию выборки конструктивно-технологических схем сварной конструкции фюзеляжного отсека сверхзвукового самолета, что дало возможность снизить массу регулярной части конструкции. Определены рациональные комбинации конструктивных переменных КТС для заданного комбинированного нагружения сварного отсека с учетом положения замыкающего шва сборки-сварки.

Ключевые слова: сверхзвуковой самолет, авиационная конструкция, сварные отсеки, технология сварки, остаточные напряжения, метод конечных элементов, конечно-элементная модель.

I.E. Merkulov, A.I. Endogur

Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Moscow, Russian Federation
Russian Aircraft Corporation "MiG", Moscow, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE OF DESIGN OF WELDED COMPARTMENTS OF SUPERSONIC AIRCRAFT TAKING INTO ACCOUNT THEIR STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL SCHEMES

The purpose of work was the optimization of a welded compartment of the supersonic aircraft taking into account structural and technological schemes allowing designing rationally a welded structure of a compartment taking into account factors: thermomechanical forces, models of materials, structural and technological schemes.

Current works of national and foreign authors have been analyzed [1-16]. Article has been written [17] by results in which approach to the solution of a problem of rational design, regarding parametrical optimization of the top panel of a compartment by criterion of mass of all compartment has been offered.

During the further research of the proposed model, dependences between the strain-stress state of a compartment and its frame are revealed. It is established that on the strain-stress state of the loaded welded compartment considerable influence is rendered by the chosen structural and technological scheme both on deflections, and on their distribution. Influence of the sequence of welding on critical state of a welded compartment is revealed.

As a result, the offered approach has allowed performing structural and parametrical optimization of the chosen welded design for a compartment of the supersonic aircraft that has allowed reducing the mass. Rational options of structural and technological scheme for the welded compartment set like loading taking into account the sequence of welding have been defined.

Keywords: supersonic aircraft, airframe, welded compartments, welding, residual stresses, the finite element method (FEM), finite-element model, heat-affected zone (HAZ).

Введение

Проблемы конструктивно-технологического проектирования рациональных сварных конструкций рассматривались во многих источниках [1–6]. Однако при общей проработанности вопроса в машиностроении и судостроении [7–12] явно ощущается недостаток методологической базы для проектирования сварных конструкций для сверхзвуковых самолетов. Также отсутствуют рабочие математической модели сварных агрегатов, обеспечивающих учет конструктивно-технологических факторов на стадии проектирования таких конструкций. Авторы поставили перед собой задачу попытаться разработать рабочую методику проектирования конструкций сварных отсеков с учетом конструктивно-технологических факторов. Процесс создания математической модели сварного отсека сверхзвукового самолета подробно описан авторами в работе [9].

Целью данной статьи являлось создание методики для проектирования рационального сварного отсека сверхзвукового самолета с возможностью учета в ней тепловых потоков, вариантов материалов, технологических процессов и конструктивно-технологического членения сварного отсека, обеспечивающего возможность сборки-сварки (синтез системы) с учетом последовательности выполнения соединений. Методика реализовывалась на примере оптимизации конструкции верхней панели сварного фюзеляжного отсека по критерию массы.

По конструктивно-технологическим признакам различают два типа отсеков (секций): компенсационные и некомпенсационные. Пример компенсационного отсека приведен на рис. 1. Для компенсационных отсеков-секций стапелем является конструкция ранее собранного агрегата или их группы. Согласно своему названию такой отсек является компенсатором, т.е. выбирает неточности установки готовых агрегатов в общем стапеле более крупного цельносварного агрегата (изделия). Невозможность или чрезвычайная сложность устранения послесварочных деформаций и поводок для таких габаритных сварных изделий приводит к поиску оптимального порядка наложения завершающих монтажных швов в компенсационных отсеках. Это является частью предмета исследования – методика проектирования оптимальных КТС.

Очевидно, что в сварных отсеках, работающих в условиях высоких значений температуры, элементом, объединяющим все детали и узлы в единое целое, являются сварные соединения. Следовательно, при моделировании важно обозначить соответствующие зоны термического влияния (ЗТВ) таким образом, чтобы они включали в себя шов и околошовную зону. Размеры ЗТВ в общем случае определяются экспериментально [13, с. 271], но существуют также эмпирические методики для расчета размерности этих зон [1, с. 146; 2, с. 79].

На рис. 2 изображена функциональная схема системы сварного отсека.

Из рис. 2 видно, что отдельные переменные сгруппированы по множествам конструктивно-технологических факторов u и внешней среды v . Введено множество ω , связывающее массу конструкции со сварным отсеком посредством оператора модели F . Множество ω будет выступать критерием в исследовании.

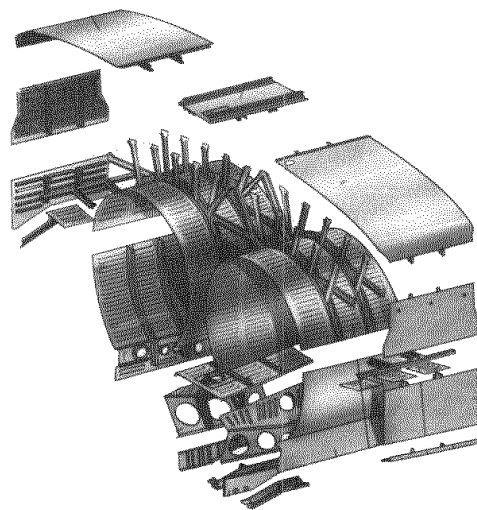


Рис. 1. Компенсационный сварной отсек

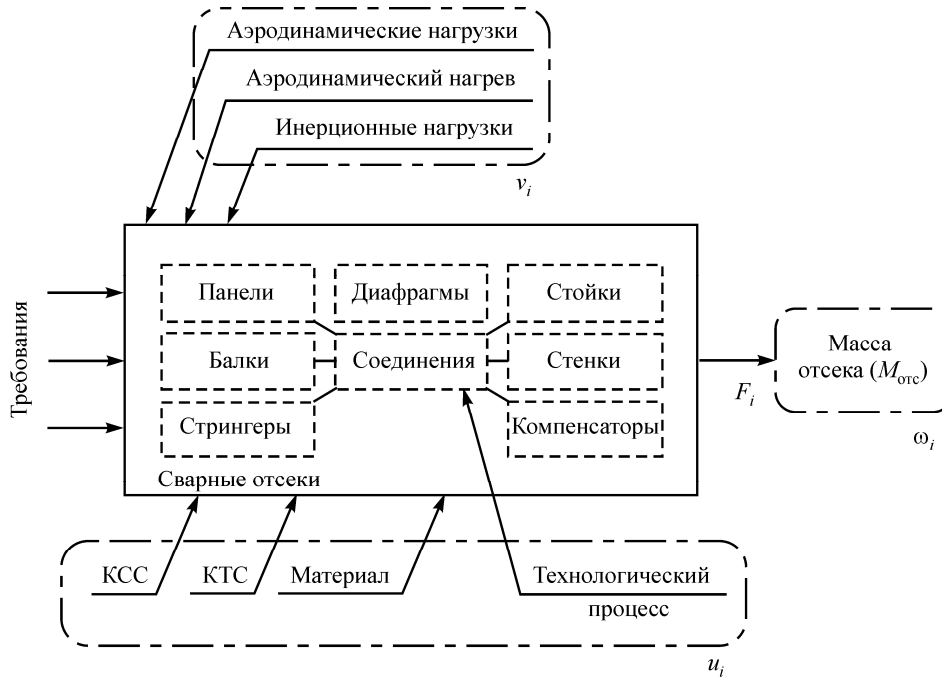


Рис. 2. Функциональная схема системы сварного отсека

Опишем исследуемую систему сварного отсека в формализованном виде:

$$\omega = |\omega_k|_K = |\omega_k(u_i, v)|_K;$$

$$u_i \in U \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \boxed{F_i(u_i, v_i)} \rightarrow \omega_i(u_i, v_i) \\ \vdots \\ \boxed{F_k(u_k, v_k)} \rightarrow \omega_k(u_k, v_k) \end{array} \right\} \Omega_k, \quad (1)$$

$$k = \overline{1, K},$$

где k – номер показателя эффективности (критерия); K – сумма критериев; ω_i – критерий эффективности отдельного сварного отсека; u_i – альтернатива сварного отсека (вариант КТС), i – номер итерации; v_k – внешняя среда (внешние воздействия); F_i – оператор модели (метод расчета); Ω_k – множество математических моделей (векторный показатель эффективности).

В рассматриваемом случае за критерий эффективности ω i -й КТС выбранного сварного отсека принята минимизация его массы m_i . При этом масса отсека будет функцией суммы масс, входящих в сварной отсек элементов при обеспечении требований прочности, жесткости и т.д.

Таким образом, формула массы отсека запишется в виде частного критерия оптимальности:

$$M_{\text{отс}}(u_i)|_{u \in U} = M_{\text{каркаса}} + M_{\text{панелей}} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \rho_i F_i l_i + \sum_{j=1}^n \beta_j \rho_j S_j \delta_j, \quad (2)$$

где $M_{\text{каркаса}}$ – масса длинномерных, профилированных элементов каркаса сварного отсека (стоек, поясов балок и т.п.); $M_{\text{панелей}}$ – масса оболочечных тонкостенных элементов конструкции сварного отсека (панели, стенки, обшивки и т.п.); α, β – весовые коэффициенты; ρ – плотность материала элемента конструкции; F, l – площадь поперечного сечения элемента каркаса и его длина соответственно; S, δ – площадь поверхностного, панелированного элемента конструкции и его приведенная толщина соответственно.

Рассматриваемые конструкции сверхзвуковых самолетов относятся к тонкостенным конструкциям, имеющим несущую (силовую) обшивку, подкрепленную продольным и поперечным силовыми наборами. Среди сварных конструкций сверхзвуковых самолетов можно выде-

лить такие, которые по своей форме и геометрии близки телам параллелепипеда, цилиндра или их комбинации. Возможные формы сварных отсеков представлены на рис. 3.

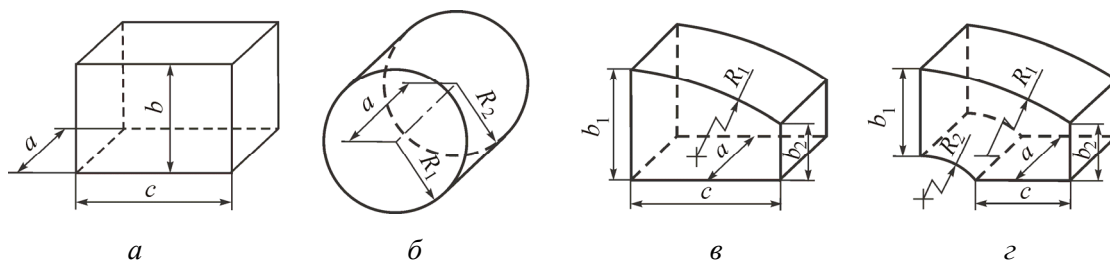


Рис. 3. Формообразование типовых отсеков: *a* – параллелепипед (частный случай призмы); *б* – цилиндр (частный случай конуса); *в*, *г* – комбинации «параллелепипед + цилиндр»

Отсеки свариваются по следующей технологии:

1. Вначале сваривается каркас будущего отсека, состоящий из протяженных силовых балочных деталей, преимущественно из профилей с тавровым, уголковым и крестообразным сечениями. Усадкой и деформациями при сварке пренебрегаем, а полученная жесткость каркаса и входящих сборочных элементов учитывается в математической модели.

2. На общую сборку подаются листы (гофрированные или плоские стенки, штампованные или фрезерованные панели), панели с присоединенными к ним стрингерами, которые привариваются к каркасу сварного отсека в порядке, предусмотренным технологией.

Модель сварного отсека нагружается эксплуатационными или расчетными нагрузками, и исследуется поведение конструкции отсека.

Применяемый метод

В статье используется метод конечных элементов (МКЭ) на ранней стадии создания сварного отсека сверхзвукового самолета. Данный метод применяется для исследования сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных отсеков и позволяет рассчитать изделие с достаточной точностью при умеренной степени идеализации его конструкции [12, с. 54; 14, с. 3535]. На базе этого метода также реализуется учет сварочных явлений. При анализе влияния остаточных напряжений от сварки применялся метод врожденных деформаций (inherent strain theory) [15, с. 43], являющийся дальнейшим качественным развитием отечественного метода фиктивных сил [2, с. 83]. Оба эти метода с достаточной простотой реализуются в конечно-элементных моделях (КЭМ). При решении связанных последовательных задач нагружения конструкций использован программный комплекс SIMULIA ABAQUS [14, с. 3535; 16, с. 176], основанный на МКЭ. Для данных термомеханических задач для панелей отсека были выбраны редуцированные оболочечные элементы и выполнено разбиение структурированной сеткой из четырехугольных конечных элементов (S4R), а для элементов каркаса – балочные элементы (B31).

Описание объекта исследования

В качестве расчетного объекта исследования выбран сварной отсек фюзеляжа сверхзвукового самолета (рис. 4). Рассматриваемый сварной отсек расположен между соседними силовыми шпангоутами (по длине агрегата).

Выбор такой расчетной зоны обусловлен следующими причинами:

- выбранные зоны сварных отсеков могут выполнять разные функции (топливный бак, приборный отсек и т.п.) и, соответственно, отвечают разным требованиям;
- выбранная геометрическая конфигурация параметризована в целях поиска оптимальной КТС;
- выбранный отсек может располагаться в разных зонах нагружения (рис. 5).

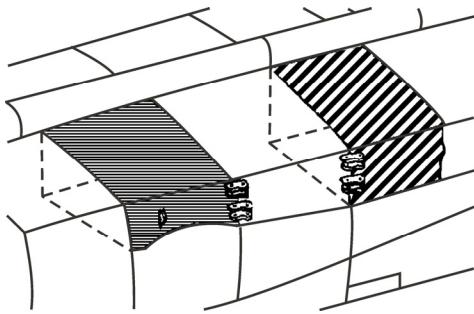


Рис. 4. Зоны сварных отсеков фюзеляжа сверхзвукового самолета (выделенные штриховкой), рассматриваемые в качестве объекта исследования

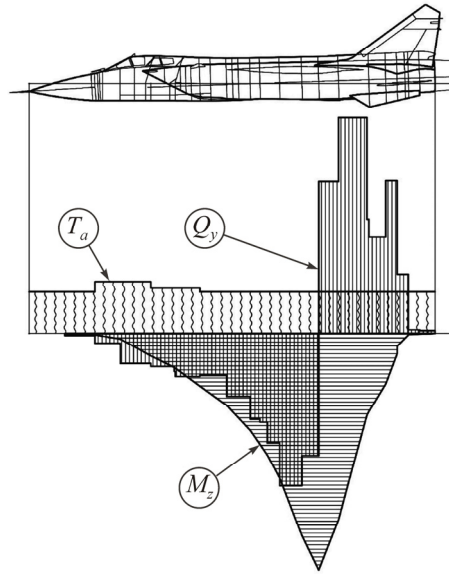


Рис. 5. Эпюры перерезывающей силы Q_y , изгибающего момента M_z и температуры T_a на внешней поверхности от аэродинамического нагрева

Общая блок-схема последовательности проектирования новой или оптимизации существующей конструкции сварного отсека представлена на рис. 6. Такая последовательность имеет новые элементы, учитывающие технологические переменные (блоки 2 и 4). Таким образом, предложенный алгоритм позволяет оценивать влияние комплекса конструктивно-технологических факторов при проектировании сварных конструкций отсеков в условиях комбинированных нагрузок.

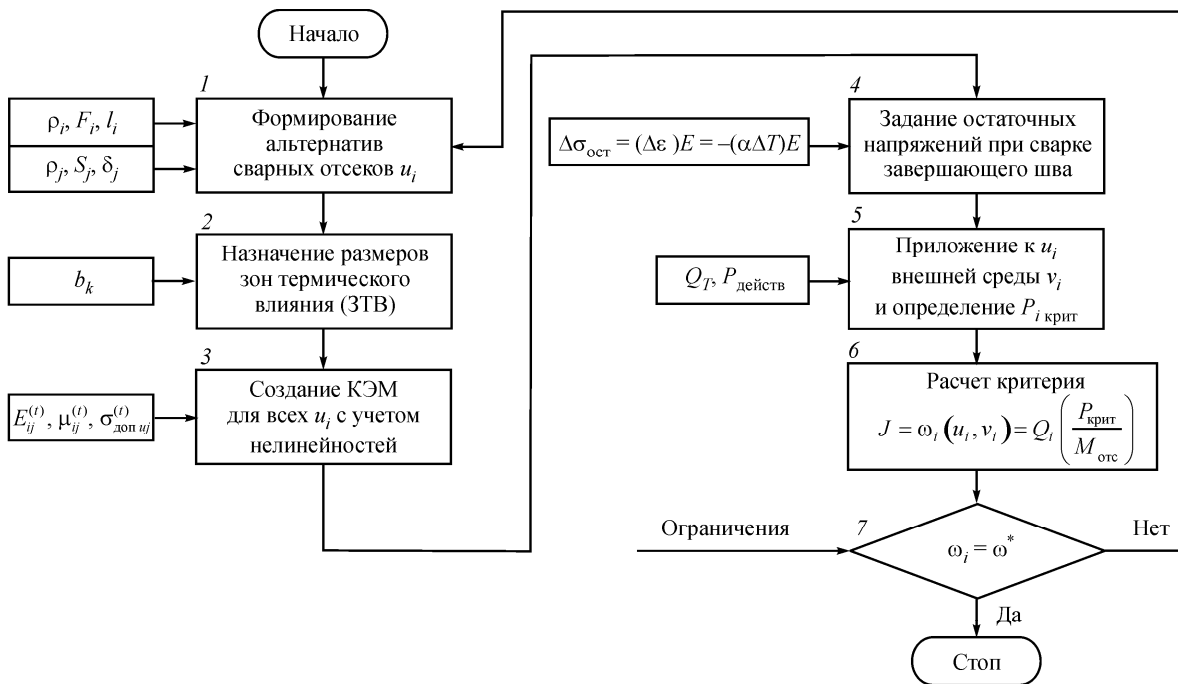


Рис. 6. Блок-схема алгоритма проектирования или оптимизации сварных отсеков с учетом нелинейностей и ЗТВ

Схема обобщенного сварного отсека и действующие на верхнюю панель внутренние силовые факторы показаны на рис. 7. Заштрихованные области – зоны термического влияния, нагруженные усилиями от усадки сварного шва $\Delta\varepsilon = -\alpha\Delta TE$. Для рассматриваемой задачи сварного отсека величина остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ задавалась усадкой ЗТВ в диапазоне $\Delta T = 150 \dots 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

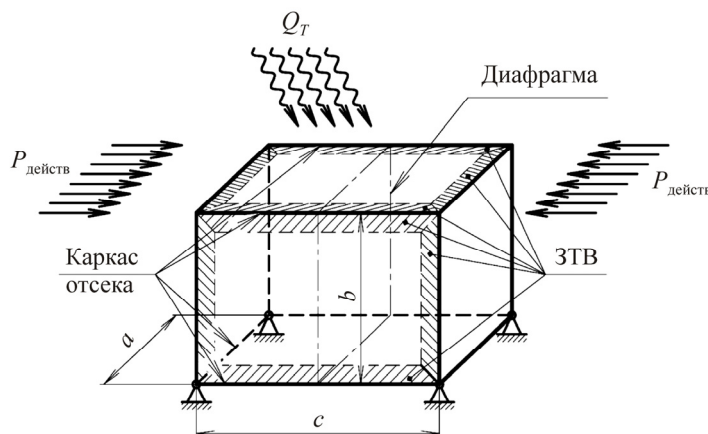


Рис. 7. Схема обобщенного сварного отсека, нагруженного действующими термомеханическими усилиями

В целях упрощения интерпретации результатов в рассматриваемом сварном отсеке имитируется только один замкнутый шов отсека. Также в основу имитации остаточных напряжений был положен принцип одновременности укладки сварных швов [2, с. 80]. На рис. 8 приведена разработанная конечно-элементная модель (КЭМ) сварного отсека.

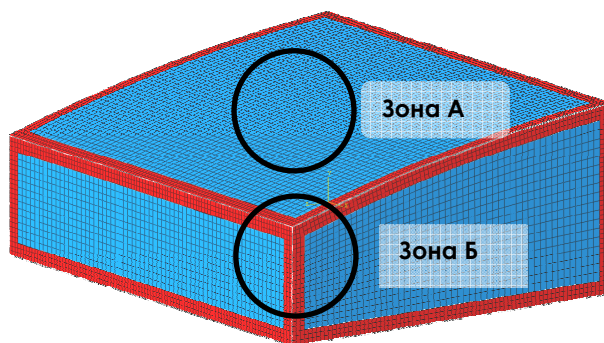


Рис. 8. Зоны конструкции сварного отсека в его конечно-элементной дискретизации:
 А – регулярная зона, Б – нерегулярная зона (место сочленения элементов каркаса).
 Красным цветом отмечены ЗТВ, элементы каркаса условно не визуализированы

Для заданного сварного отсека рассматривается несколько альтернатив, которые проанализированы в дальнейшем. На рис. 9 изображены возможные варианты КТС для выбранного сварного отсека.

На рис. 9 в строках таблицы находятся КТС, имеющие отличия по КСС (наличие/отсутствие стойки или диафрагмы), а в столбцах – КТС, отличающиеся по технологии. На диагоналях этой таблицы находятся схемы сварных отсеков, наиболее удаленные по указанным конструктивно-технологическим признакам. Количество строк и столбцов принимается в зависимости от технического задания, сроков выполнения работы, опыта конструктора и т.д. Следует отметить, что такой подход к организации проектирования сварного отсека сверхзвукового

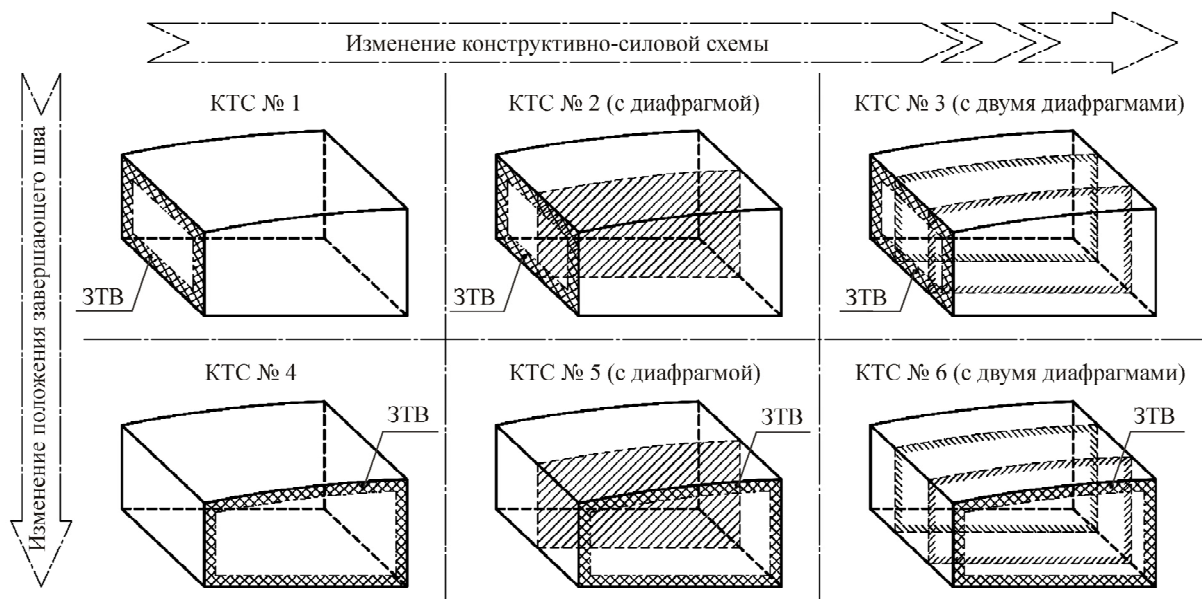


Рис. 9. Набор вариантов КТС сварного отсека

самолета с учетом КТС нигде ранее представлен не был. Подобное структурирование конструктивно-технологических признаков позволяет сформировать пространство дискретных переменных сварного отсека. Ясно, что по третьей оси (нормально к плоскости «изменение технологии – изменение КСС») откладываются значения критерия оптимальности. Все вместе формирует трехмерное пространство дискретной целевой функции.

Расчет и анализ

При расчете обобщенного сварного отсека рассчитывается критическое НДС ($P_{\text{крит}}$), определяющее прочность и массу варианта. Перебором вариантов можно выяснить, какая КТС оптимальна по критерию массы сварного отсека.

В качестве примера рассматривалась верхняя панель сварного отсека, нагруженная попеременно растяжением и сжатием от общего изгиба фюзеляжа в условиях повышенной температуры. В случае растяжения расчет конструкции панели, действующие напряжения $\sigma_{\text{действ}}$ в верхней панели не зависят от совокупности конструктивно-технологических факторов, а зависят только от физико-механических свойств материала и приведенной толщины панели. Но в случае сжатия данной панели решающее значение критического НДС находится в значительной зависимости от толщины, вида КТС и т.п. При определении НДС растянутой верхней панели сварного отсека расчет выполнялся по методу Ньютона – Рафсона, а при определении критического НДС сжатой панели сварного отсека использовался модифицированный метод Рикса [17]. В данной статье за критическое значение было принято НДС модели сварного отсека, удовлетворяющее условиям работоспособности верхней панели без потери устойчивости.

За базовый вариант в данной работе принята КТС № 1 (см. рис. 9) с толщиной верхней панели $\delta_2 = 1$ мм, $M_{\text{отс}} = 28,47$ кг ($\bar{M}_{\text{каркаса}} = 0,23$; $\bar{M}_{\text{панелей}} = 0,77$).

Результаты

На рис. 10 показаны зависимости действующей силы в сварном отсеке (КТС № 1) на сжатую верхнюю панель от разных значений остаточного напряжения.

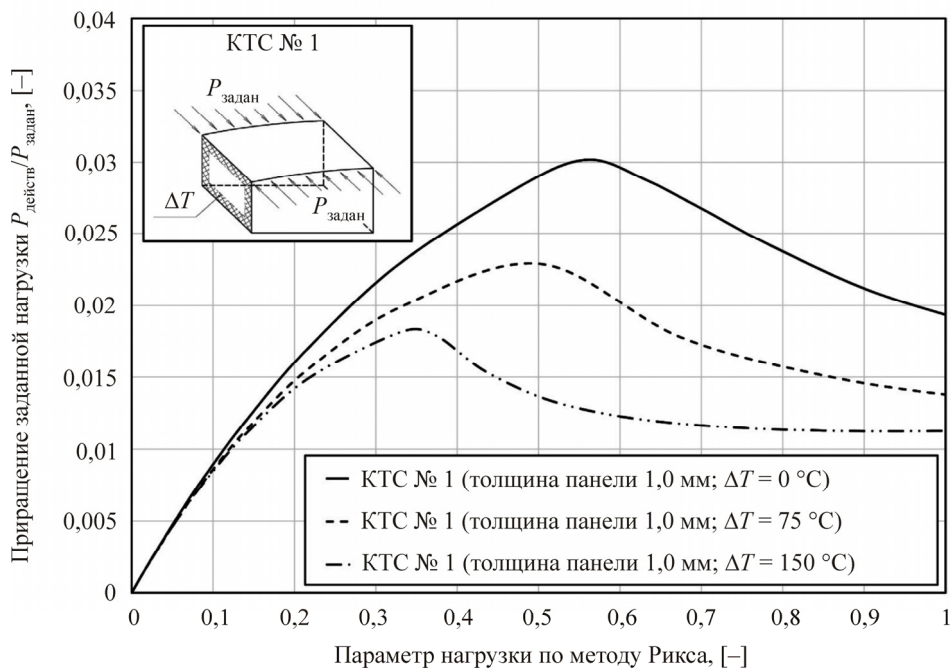


Рис. 10. Влияние остаточных сварных напряжений на изменение критического состояния НДС сварного отсека с приведенной толщиной верхней панели $\delta_2 = 1$ мм

Изменение знака производной каждой кривой означает изменение несущей способности силовой конструкции отсека, что, в свою очередь, сигнализирует о местной потере устойчивости верхней панели. Общей потери устойчивости всей конструкции отсека не происходит, поскольку действующие силы не обнуляются (и так как графики не уходит в отрицательные значения), сохраняя несущую способность силовой схемы. Значение нагрузки в точке экстремума на графиках есть $P_{\text{крит}}$. Из данных графиков следует, что учет преднапряженного состояния конструкции отсека (т.е. влияние величины остаточных напряжений) снижает на 40 % несущую способность сжатой верхней панели ($P_{\text{крит}} = 1,8 \% P_{\text{задан}}$). Обратим внимание, что в данной постановке задачи $\bar{M}_{\text{отс}} = 1$, иными словами, масса силовой части конструкции осталась неизменной в условиях оптимизации технологии сварки. Аналогичная картина наблюдается и в КТС № 4. Влияние остаточных напряжений на распределение напряжений и деформаций в верхней панели было показано в работе [18]. Чтобы снизить массу сварного отсека, следует уменьшать значения толщины и сечения силового набора, а для этого необходимо уменьшить влияние остаточных напряжений. Критерием достигнутого оптимума массы будет сохранение несущей способности сжатой панели на уровне $P_{\text{крит}} = 1,8 \dots 2,0 \% P_{\text{задан}}$. При этом масса КТС № 1 и КТС № 4 сварного отсека снижается до $M_{\text{отс}} = 27,19$ кг ($\bar{M}_{\text{отс}} \approx 0,955$). Сравнительные графики показаны на рис. 11.

Теперь рассмотрим совместное влияние количественных и качественных конструктивно-технологических переменных в схемах сварных отсеков на массу. Результаты структурно-параметрической оптимизации сварного отсека показаны на рис. 12–14.

Из рис. 12 видно, что переход от КТС № 1 (см. рис. 11) к КТС № 2, 5 с подкреплением верхней панели в виде диафрагмы (см. рис. 9) может привести к увеличению массы отсека за счет дополнительного силового элемента. Отмечается, что изменение толщины диафрагмы при снижении массы верхней панели (уменьшении ее толщины) никоим образом не увеличивает и не сохраняет несущую способность. Существенное влияние на несущую способность верхней панели сварного отсека, как и ранее, оказывает ее толщина, что и показал верхний график на рис. 12. При размещении двух диафрагм в КТС № 3, 6 имеют место и другие решения

(см. рис. 13). Они реализуются за счет большего утонения толщины верхней панели при установке двух тонких подкрепляющих диафрагм.

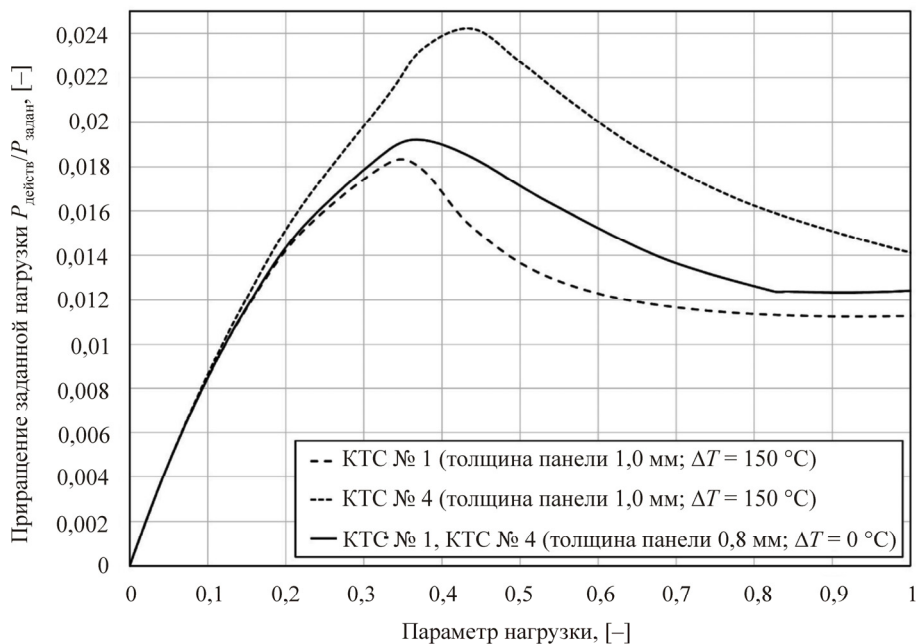


Рис. 11. Влияние параметрической оптимизации толщины верхней сжатой панели и технологии на изменение несущей способности отсека

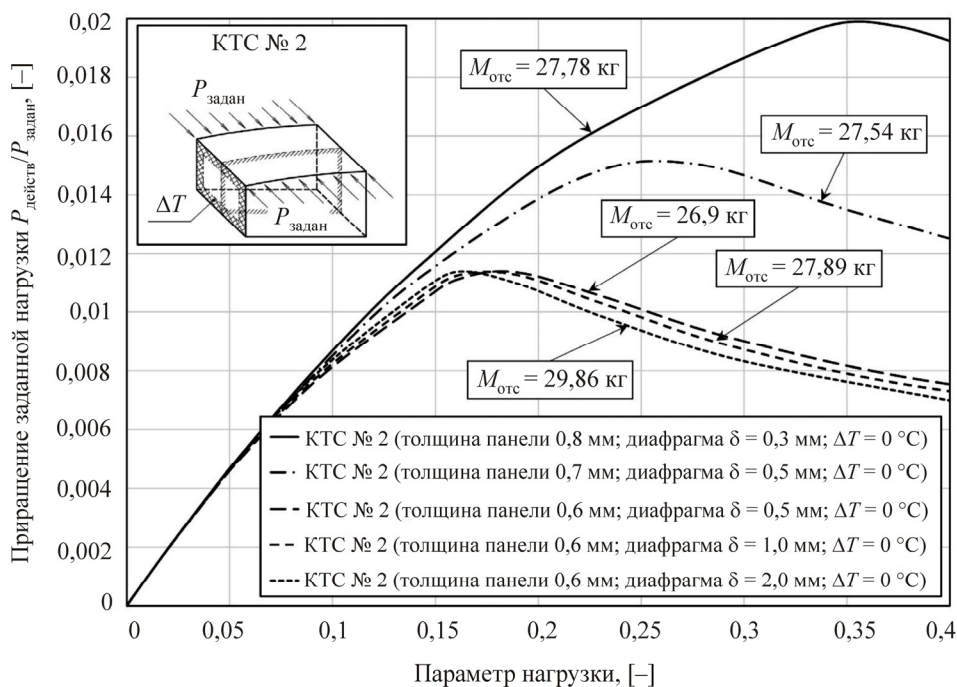


Рис. 12. Влияние структурно-параметрической оптимизации КТС № 2 сварного отсека на изменение его несущей способности и массу конструкции отсека

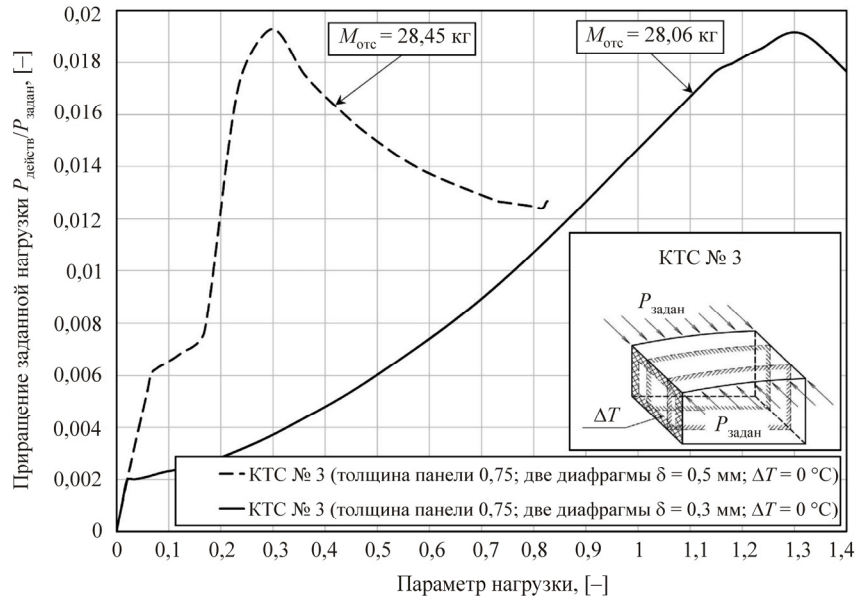


Рис. 13. Влияние структурно-параметрической оптимизации сварного отсека на изменение его массы

На рис. 14 показаны качественные и количественные отличия в распределении действующих напряжений и вертикальных прогибов для разных КТС сварного отсека, а также показано достигнутое уменьшение массы отсека. Заметим, что достигнутые величины действующих напряжений $\sigma_{действ} = \sigma_{крит}$ еще далеки от величин временного сопротивления σ_b для сплавов свариваемой стали.

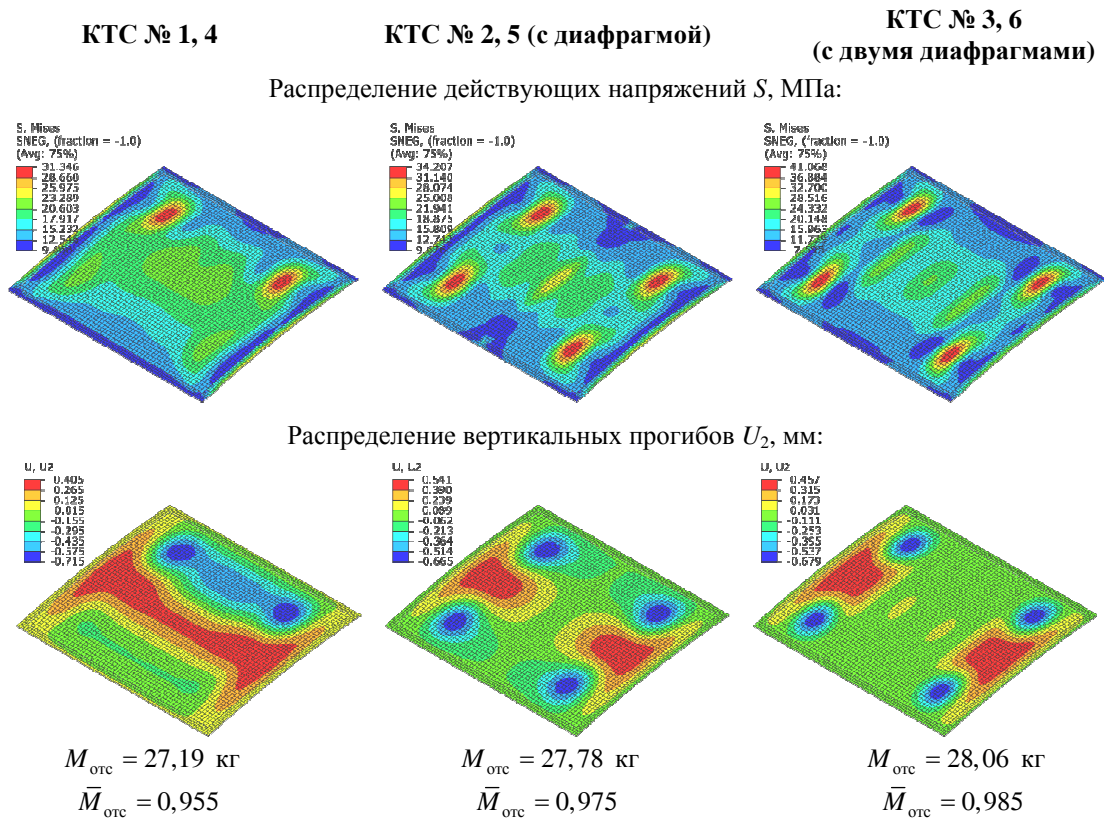


Рис. 14. НДС верхней панели отсека в момент потери устойчивости

Представленные результаты достоверны в рамках описанных ограничений и допущений.

Выводы

Разработанная методика:

- учитывает влияние величины остаточных сварных напряжений на несущую способность панелей отсека, нагруженных термомеханическими усилиями;
- позволила определить рациональные конструктивные параметры панелей сварного отсека по критерию минимума массы для нескольких КТС, достигнутые значения величин снижения массы сварного отсека по отношению к базовой варьируются от 1,5 % для КТС № 3 до 4,5 % при использовании КТС № 1, 4;
- дает возможность устанавливать допустимые пределы остаточных напряжений для получения минимальной массы конструкции сварного отсека при заданных условиях комплексного нагружения и выбирать рациональные КТС.

Библиографический список

1. Окерблом Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. – Л.: Машиностроение, 1964. – 420 с.
2. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
3. Майзель В.С., Навроцкий Д.И. Сварные конструкции. – М.: Машиностроение, 1973. – 300 с.
4. Винокуров В.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.
5. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / под ред. С.А. Куркина, В.А. Винокурова, С.В. Вершинского [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 378 с.
6. Денисов Б.С., Мейлах А.И. Сварка в самолетостроении. Сварные конструкции МИГов. – М.: Русавиа, 2007. – 360 с.
7. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.
8. Тальпов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. – Л.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
9. Сварные соединения титановых сплавов / В.Н. Моисеев, Ф.Р. Куликов, Ю.Г. Кириллов [и др.]. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.
10. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / С.А. Куркин, В.М. Ховов, Ю.Н. Аксенов, О.Г. Касаткин [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 464 с.
11. Серенко А.Н., Крумбольдт М.Н., Багрянский К.В. Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи. – Киев: Вища школа, 1977. – 336 с.
12. Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures / M. Islam, A. Buijk, M. Rais-Rohani, K. Motoyama // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2014. – No. 84. – P. 54–64.
13. Ендогур А.И. Конструкция самолетов. Конструирование деталей и узлов. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 556 с.
14. Weld sequence optimization: The use of surrogate models for solving sequential combinatorial problems / I. Voutchkov, A.J. Keane, A. Bhaskar, T.M. Olsen // *Computational Methods Appl. Mech. Eng.* – 2005. – No. 194. – P. 3535–3551.
15. Applications of inherent strain and interface element to simulation of welding deformation in thin plate structures / H. Murakawa, D. Deng, N. Ma, J. Wang // *Computational Materials Sci.* – 2011. – No. 51. – P. 43–52.
16. Michaleris P., DeBicari A. Prediction of welding distortion // *Welding J.* – 1997. – No. 04. – P. 172–181.
17. Riks E. An incremental approach to the solution to the solution of buckling ansnapping problems // *Int. J. Solids Struct.* – 1979. – No. 15. – P. 524–551.
18. Меркулов И.Е., Ендогур А.И. Создание модели сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом конструктивно-технологической схемы [Электронный ресурс] // *Труды МАИ.* – 2017. – № 94. – С. 18. – URL: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/973/merkulov_enogur_rus.pdf (дата обращения 28.05.2019).

References

1. Okerblom N.O. Konstruktivno-tekhnologicheskoye proyektirovaniye svarnykh konstruksiy [Structural and technological design of welded structures]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1964.
2. Vinokurov V.A. Svarochnyye deformatsii i napryazheniya. Metody ikh ustraneniya [Welding deformations and stresses. Methods to eliminate them]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1968.
3. Mayzel V.S., Navrotskiy D.I. Svarnyye konstruksii [Welded constructions]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973.
4. Vinokurov V.A., Nikolayev G.A. Svarnyye konstruksii. Raschet i proyektirovaniye [Welded constructions. Calculation and design]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990.
5. Kurkina S.A., Vinokurov V.A., Vershinskiy S.V. et al. Proyektirovaniye svarnykh konstruksiy v mashinostroyenii [Design of welded structures in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975.
6. Denisov B.S., Meylakh A.I. Svarka v samoletostroyenii. Svarnyye konstruksii MIGov [Welding in aircraft. Welded designs MIGs]. Moscow: Rusavia, 2007.
7. Sagalevich V.M. Metody ustraneniya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy [Methods for eliminating welding deformations and stresses]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1974.
8. Talypov G.B. Svarochnyye deformatsii i napryazheniya [Welding deformations and stresses]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973.
9. Moiseyev V.N., Kulikov F.R., Kirillov Yu.G. et al. Svarnyye soyedineniya titanovykh splavov [Welded joints of titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1979.
10. Kurkin S.A., Khovov V.M., Aksenov Yu.N., Kasatkin O.G. et al. Kompyuternoye proyektirovaniye i podgotovka proizvodstva svarnykh konstruksiy [Computer design and preparation of the production of welded structures]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2002.
11. Serenko A.N., Krumboldt M.N., Bagryanskiy K.V. Raschet svarnykh soyedineniy i konstruksiy [Calculation of welded joints and structures]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1977.
12. Islam M., Buijk A., Rais-Rohani M., Motoyama K. Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, No. 84, pp. 54-64.
13. Endogur A.I. Konstruksiya samoletov. Konstruirovaniye detaley i uzlov [The design of the aircraft. Construction of parts and components]. Moscow: Publishing House of MAI, 2013.
14. I. Voutchkov, A.J. Keane, A. Bhaskar, T.M. Olsen. Weld sequence optimization: The use of surrogate models for solving sequential combinatorial problems. *Computational Methods Appl. Mech. Eng.*, 2005, No. 194 (2005), pp. 3535-3551.
15. H. Murakawa, D. Deng, N. Ma, J. Wang. Applications of inherent strain and interface element to simulation of welding deformation in thin plate structures. *Computational Materials Science*, 2011, No. 51, pp. 43-52.
16. Michaleris P., DeBicari A. Prediction of Welding Distortion. *Welding Journal*, 1997, No. 04, pp. 172-181.
17. Riks E. An incremental approach to the solution to the solution of buckling ansnapping problems. *Int. J. Solids Struct.*, 1979, No. 15, pp. 524-551.
18. Merkulov I.E., Endogur A.I. Sozdaniye modeli svarnogo otseka sverkhzvukovogo samoleta s uchetom konstruktivno-tekhnologicheskoy skhemy [Creating a model of a welded compartment of a supersonic aircraft, taking into account the design and technological scheme]. *Trudy MAI*, 2017, no. 94, 18 p. URL: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/973/merkulov_enogur_rus.pdf (date of the application: 28.05.2019).

Об авторах

Меркулов Илья Евгеньевич (Москва, Россия) – аспирант кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4); инженер АО «Российская самолетостроительная корпорация “МиГ”» (125284, г. Москва, 1-й Боткинский проезд, д. 7, e-mail: ilia.merkulov@gmail.com).

Эндогур Аскольд Иванович (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: endogur@yandex.ru).

About the authors

Ilia E. Merkulov (Moscow, Russian Federation) – PhD Student of Aircraft Design Department 101, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe av., Moscow, 125993, Russian Federation), engineer, Russian Aircraft Corporation “MiG” (7, 1-st Botkinsky drive, Moscow, 125284, Russian Federation, e-mail: ilia.merkulov@gmail.com).

Askold I. Endogur (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Aircraft Design Department 101, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe av., Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: endogur@yandex.ru).

Получено 03.04.2019