

УДК 629.7.02

Создание модели сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом конструктивно-технологической схемы

Меркулов И.Е.*, Ендогур А.И.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: ilia.merkulov@gmail.com*

***e-mail: endogur@yandex.ru*

Аннотация

В работе изложен подход к созданию моделей сварных отсеков с учетом конструктивно-технологических схем, основанный на учете комплекса факторов: остаточных напряжений, вызванных усадкой сварного шва, моделей материалов, характеристик сечений, толщин и т.п. Проанализировано современное состояние вопроса в части создания математических моделей сварных конструкций и их последующей оптимизации. Предложен способ синтеза системы, учитывающий порядок сборки-сварки конструкции отсека. Разработана конечно-элементная модель сварного отсека с учетом остаточных напряжений, основанная на модификации метода фиктивных сил «inherent strain method». Выявлено изменение распределения эксплуатационных прогибов по панелям отсека при учете предварительно вводимых остаточных напряжений. При использовании

разработанной модели получены зависимости напряженно-деформированного состояния сварных отсеков от конструктивных параметров.

Ключевые слова: сверхзвуковой самолет, отсек, сварные конструкции, технология сварки, остаточные напряжения, метод конечных элементов, конечно-элементная модель.

Введение

Математические модели конструкций, с учетом сварочных явлений рассмотрены в работах отечественных [1, стр. 367], [2, стр. 140], [3, стр. 162], [4, стр. 273], [5, стр. 95], [6, стр. 162], [8, стр. 110], [9, стр. 108], [10, стр. 172] и зарубежных авторов [12, стр. 172] [13, стр. 43] [14, стр. 54] [15, стр. 3535]. В них описаны и исследованы особенности, возникающие в процессе формирования сварного шва и после него. Однако, в подавляющем большинстве существующей научно-технической информации, предложенные математические (численные) модели сложны при вычислениях, т.е. требуют большого количества операционного времени и апробировались только для конкретных, реализованных проектов небольших узлов и сборок. Также на сегодняшний день отсутствуют математические модели сварных отсеков, созданные с учетом оптимизации конструктивно-технологических схем.

Целью является создание модели 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.

Иерархия систем сварных конструкций

В предлагаемой модели можно учитывать классификацию сварных отсеков по функциональному признаку и проводить декомпозицию системы на подсистемы.

Место сварных отсеков в системе самолета и их членение показано на рис. 1.

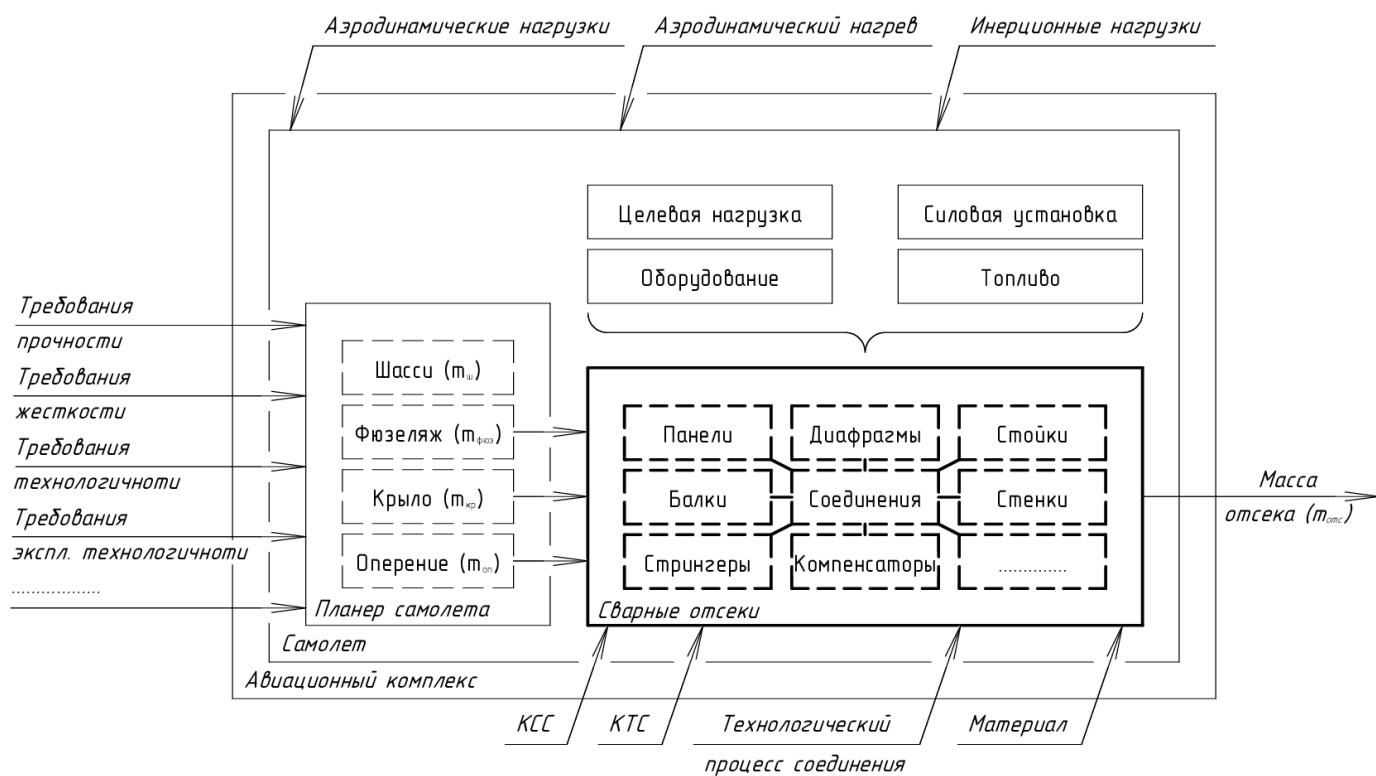


Рисунок 1 – Иерархия систем и место в них систем сварных отсеков (КСС – конструктивно-силовая схема; КТС – конструктивно-технологическая схема).

Из рис. 1 видно, что в сварных отсеках, работающих в условиях высоких температур, элементом, объединяющим все детали и узлы в единое целое, являются сварные соединения – шовные или точечные. 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 [11, стр. 271], но существуют также эмпирические методики для расчета размерности этих зон [1, стр. 146], [2, стр. 79].

Опишем исследуемую систему сварного отсека в формализованном виде:

$$w = |w_k|_K = |w_k(u_i, v)|_K$$

$$u_i \in U \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \boxed{F_i(u_i, v_i)} \rightarrow w_i(u_i, v_i) \\ \vdots \quad \dots \\ \boxed{F_k(u_k, v_k)} \rightarrow w_k(u_k, v_k) \end{array} \right\} W_i, \quad (1)$$

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

где:

k – номер показателя эффективности (критерия), K – сумма критериев;

w_i – критерий эффективности отдельного сварного отсека;

u_i – альтернатива сварного отсека, i – номер итерации;

v_k – внешняя среда;

F_i – оператор модели;

W_i – набор моделей (векторный показатель эффективности).

На рис. 2 изображена функциональная схема системы сварного отсека.

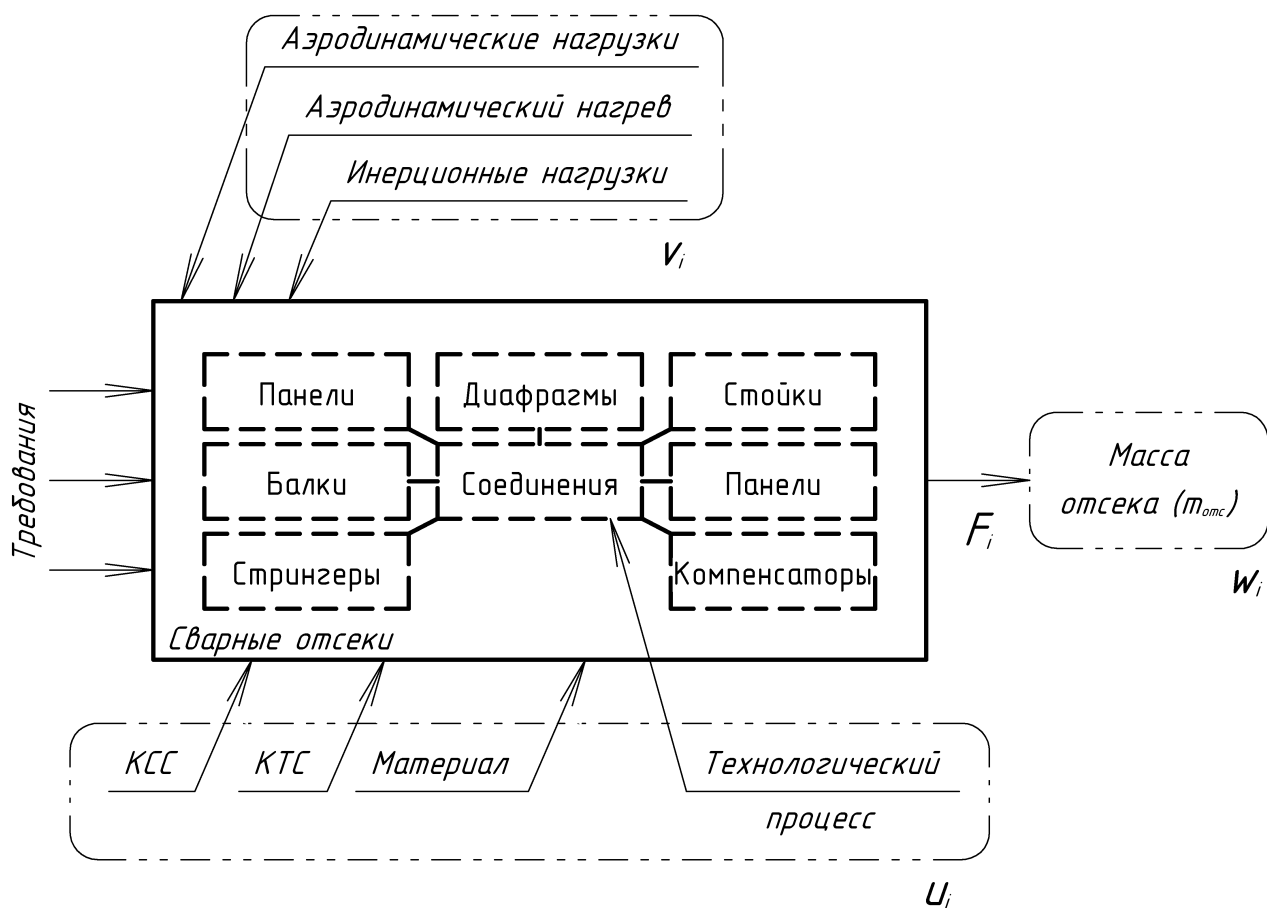


Рисунок 2 – Функциональная схема системы сварного отсека.

В рассматриваемом случае за критерий эффективности w_i 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.

Геометрические модели сварных отсеков для разных частей самолета и его агрегатов представляют собой дискретное множество u_i . Условно можно выделить среди сварных отсеков такие, которые по форме близки к параллелепипеду, к цилиндру или их комбинации (рис. 3).

Исходными (входными) данными для множества геометрических альтернатив сварных отсеков являются параметры сечений (F , J_i и т.д.) элементов, входящих

на сборку-сварку отсека и их жесткостные характеристики (EF , EJ_i , GF и т.п.), связанные с заданными моделями материалов.

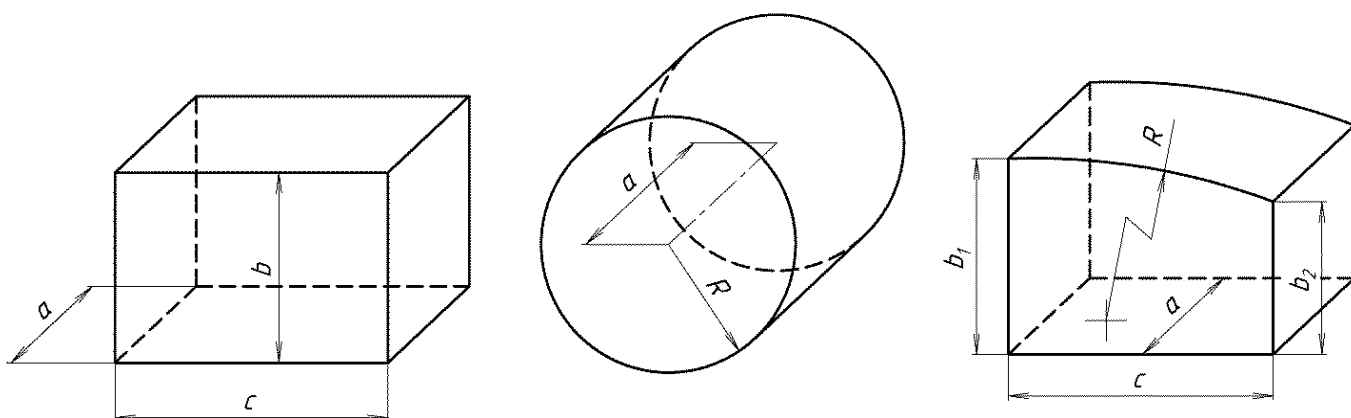


Рисунок 3 – Типовые отсеки.

Процесс сборки-сварки сварных отсеков происходит в стапелях, при этом узлы, свариваемые по отдельности, обладают конечной жесткостью. Их обводы при окончательной сборке-сварке отличаются от теоретических форм. В качестве упрощающей гипотезы выдвинем предположение о пренебрежимо малых значениях таких деформаций.

Другим предположением является то, что 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.

Созданная модель сварного отсека нагружается эксплуатационными или расчетными нагрузками и исследуется поведение конструкции отсека.

Применяемый метод

При моделировании силовых конструкций, в том числе сварных, часто применяют метод конечного элемента (МКЭ) [14, стр. 54], [15, стр. 3535], который позволяет в предложенной постановке решать связанные термомеханические задачи. Также, при анализе остаточных напряжений от сварки некоторыми авторами применяется метод врожденных деформаций («inherent strain theory») [13, стр. 43], являющийся дальнейшим качественным развитием отечественного метода фиктивных сил [2, стр. 83]. Оба эти метода с достаточной простотой реализуются в конечно-элементных моделях (КЭМ).

При решении связанных последовательных задач нагружения конструкций применяют программный комплекс SIMULIA ABAQUS [12, стр. 176], [15, стр. 3535], основанный на МКЭ. В нем можно посредством набора последовательных шагов («Step») симитировать сварочные и послесварочные процессы, а затем приложить силовое эксплуатационное воздействие.

Для выбранных термомеханических задач для панелей отсека были выбраны редуцированные оболочечные элементы и выполнено разбиение структурированной сеткой из 4-хугольных конечных элементов (S4R), а для элементов каркаса – балочные элементы (B31).

Создание математической модели сварного отсека

Геометрическая модель отсека получена путем трансляции ранее созданных геометрических объектов в универсальный формат (IGES, STEP) из CATIA с учетом чертежей реальных конструкций.

Общая блок-схема математической модели сварного отсека и его расчета показана на рис. 4.

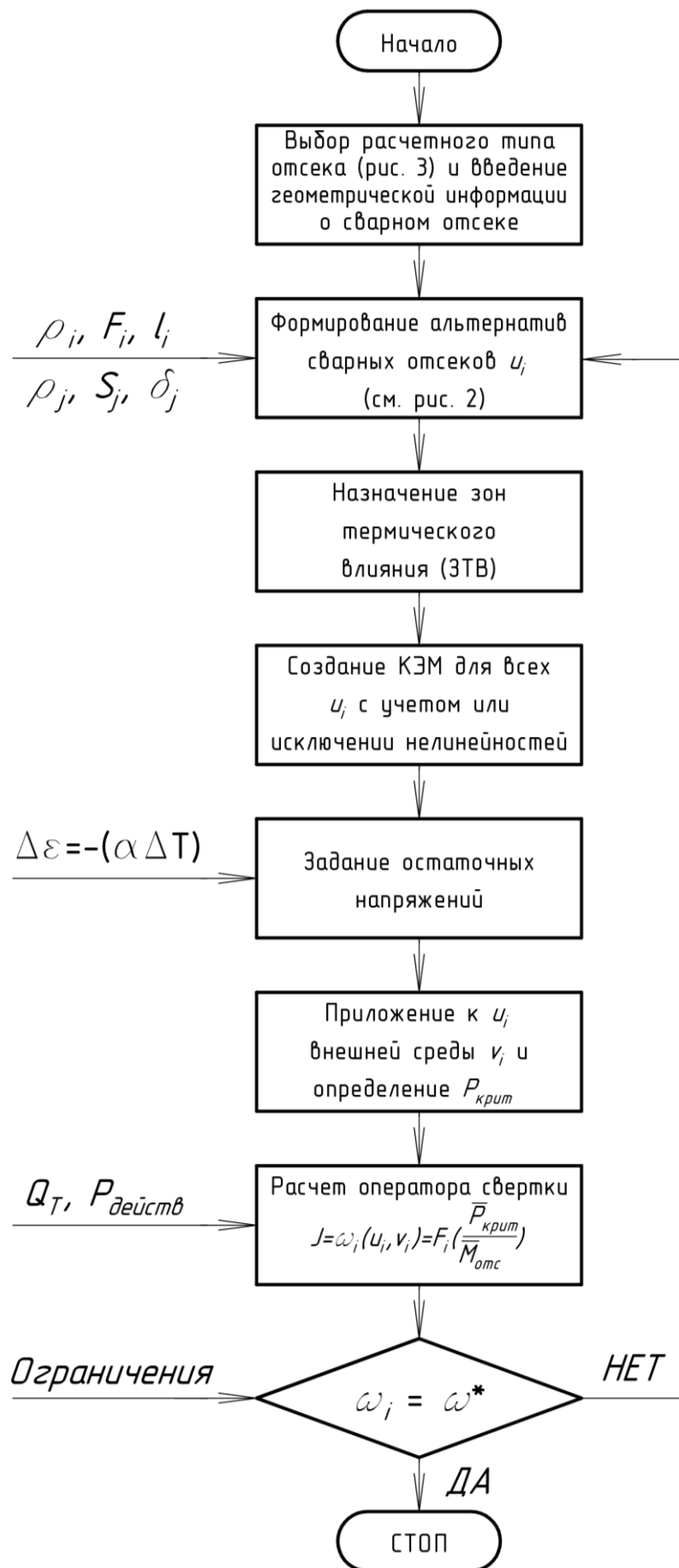


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма расчета моделей сварных отсеков с учетом нелинейностей и ЗТВ.

Сварной отсек показан на рис. 5. Заштрихованные области – зоны термического влияния, нагруженные усилиями от усадки сварного шва $\Delta\varepsilon = f(-\alpha \cdot \Delta T)$.

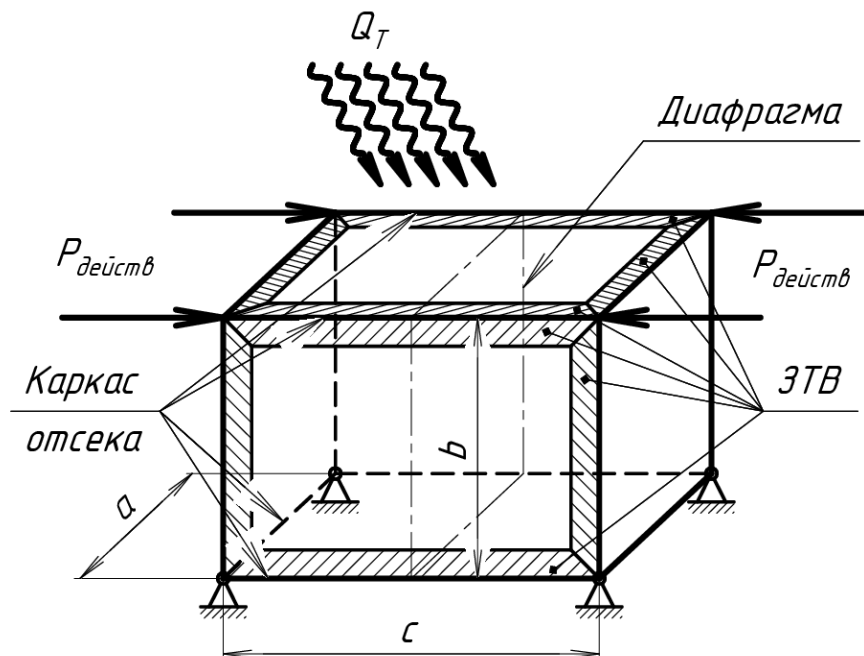


Рисунок 5 – Схема обобщенного сварного отсека, нагруженного действующими термомеханическими усилиями.

В целях упрощения интерпретации результатов в рассматриваемом сварном отсеке ЗТВ приняты только на швах торцевых панелей, имитируя заключительный этап сборки-сварки отсека. Также в основу имитации остаточных напряжений был положен принцип одновременности укладки сварных швов [2, стр. 80].

На рис. 6 приведен фрагмент чертежа реальной конструкции сварного отсека и разработанная КЭМ.

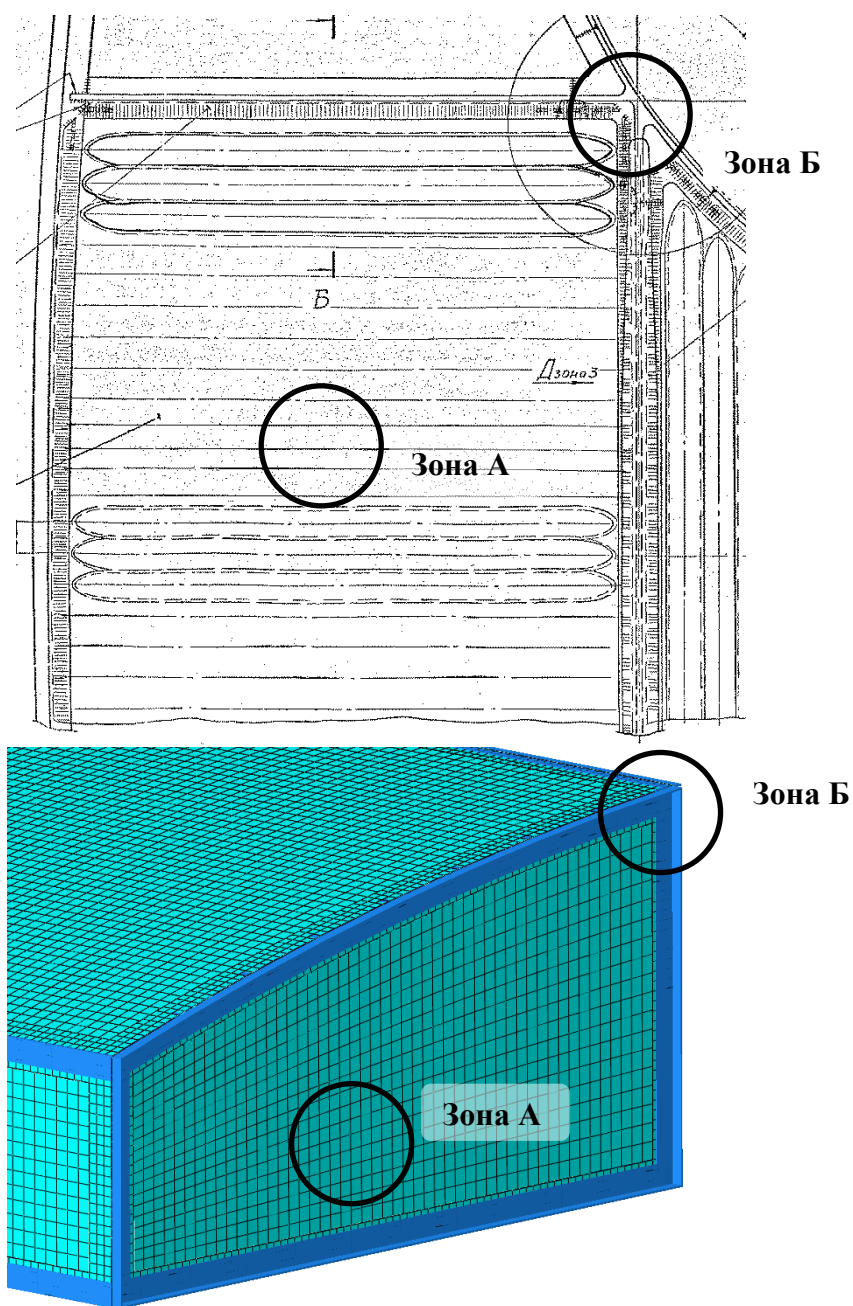


Рисунок 6 – Зоны конструкции сварного отсека и его конечно-элементной аппроксимации. А – регулярные зоны, Б – нерегулярные зоны.

Расчет и анализ

При расчете обобщенного сварного отсека определяется критическое НДС ($P_{крит}$). Следовательно, множеству подобранных альтернатив сварного отсека должно соответствовать множество $P_{крит}$. Таким образом, можно однозначно

установить, какая из предложенных альтернатив сварного отсека будет оптимальной по комплексному критерию $P_{крит}/m_{отс}$.

В данной статье за критическое значение было принято такое НДС модели сварного отсека, которое удовлетворяет следующим условиям работоспособности верхней панели:

- максимальный прогиб верхней панели – 6 мм;
- знак производной графика зависимости прогиба от приращения нагрузки – положительный.

За базовый вариант в данной работе принята альтернатива отсека с толщиной верхней панели 1 мм (рис. 7а).

Результаты и их обсуждение

Результаты использования модели для расчета отсека с учетом влияния остаточных напряжений приведены на графиках рис. 7а и 7б, где приведено распределение вертикальных прогибов U_2 верхней панели отсека.

Из графиков рис. 7 видно, что критическое состояние отсека достигается при разных $P_{крит}$, поскольку на начальной стадии нагружения отсека (рис. 7б) в НДС не учтены остаточные напряжения. Из полученного результата можно сделать вывод о том, что учет остаточных напряжений повлияет на конечное напряженно-деформированное состояние сварного отсека. На рис. 7а и 7б видно, что учет остаточных сварных напряжений выявляет разницу в распределении прогибов по поверхности панели и их величине.

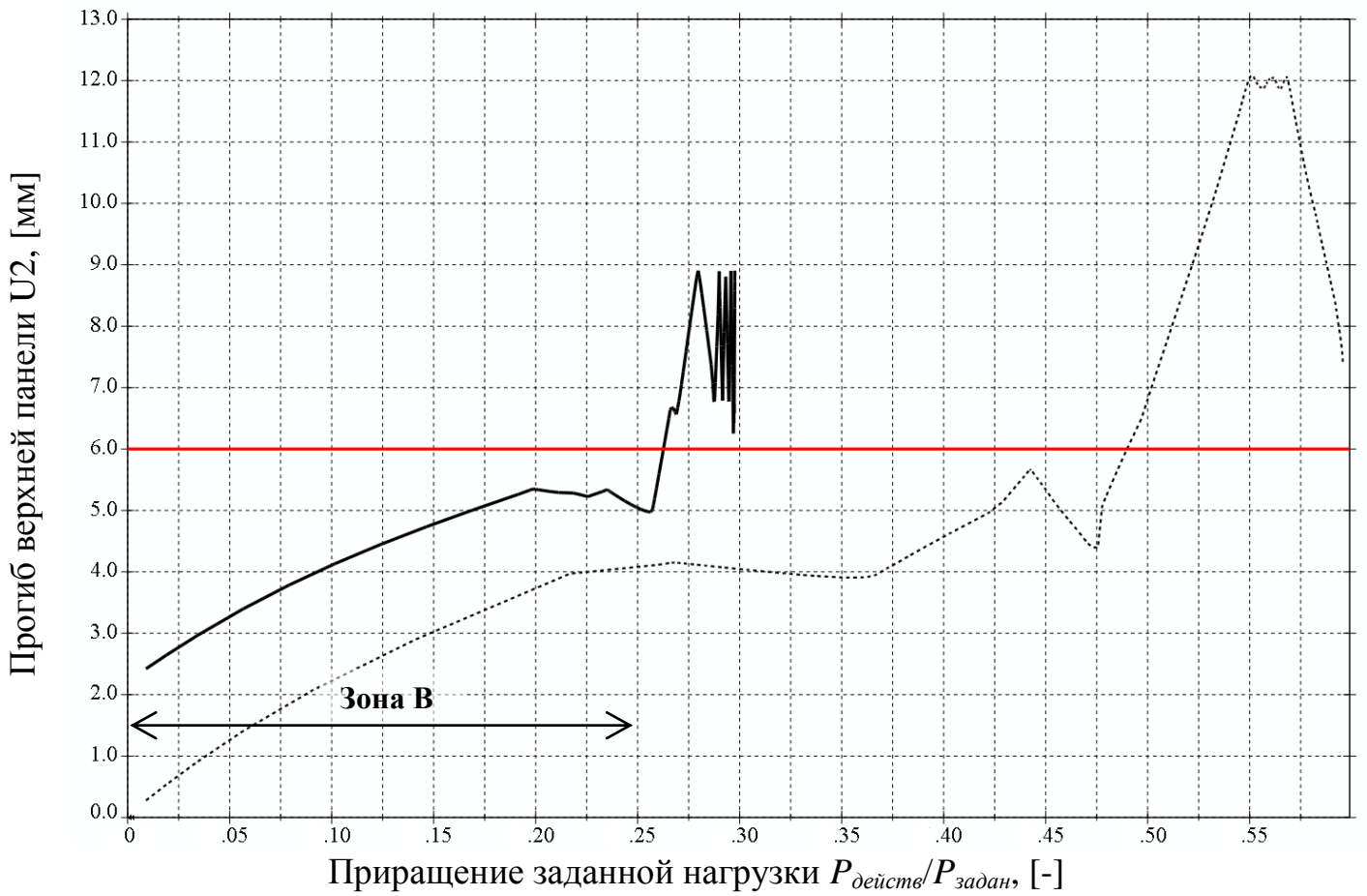
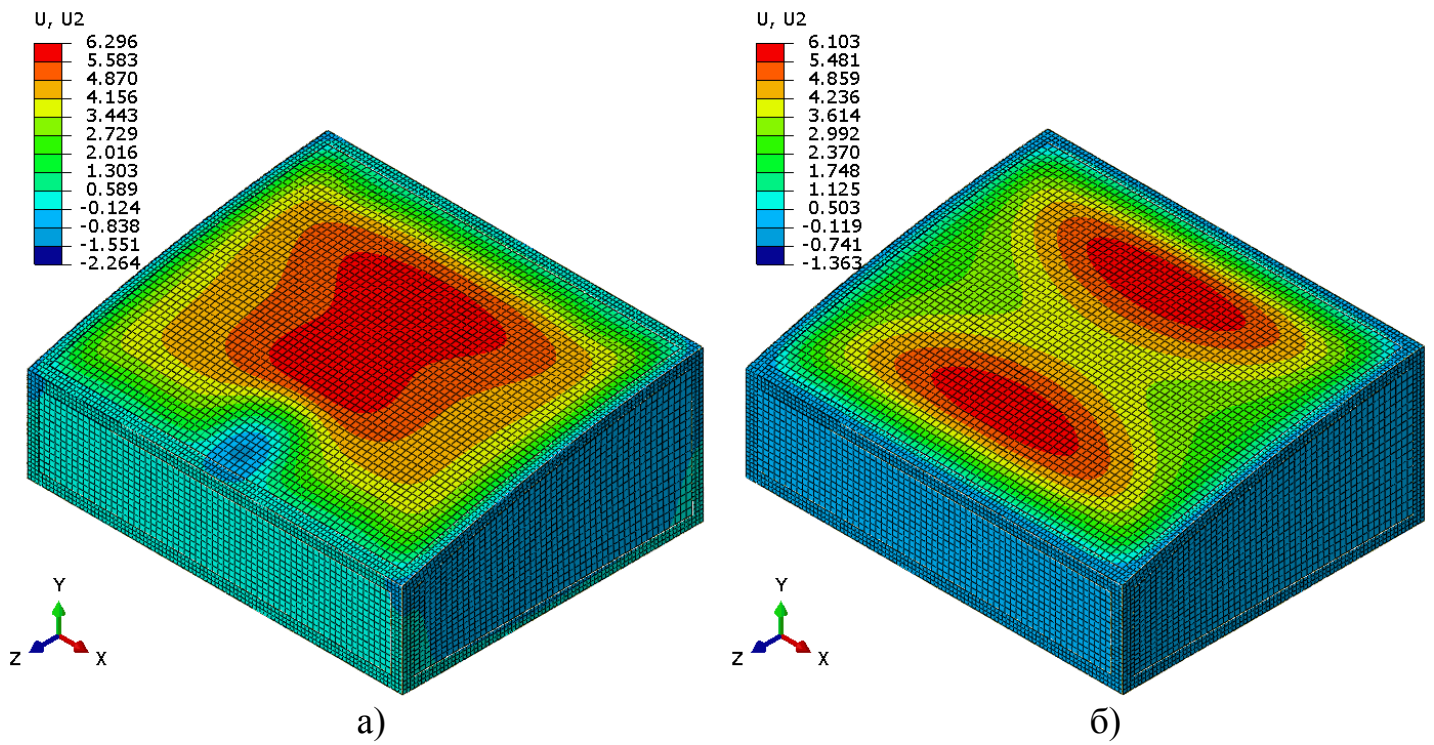


Рисунок 7 – а) — с учетом ЗТВ;
 б) — без учета ЗТВ.

На рис. 8 представлены результаты для альтернатив сварного отсека с толщинами верхней панели 0,8 мм, 1,0 мм и 2 мм.

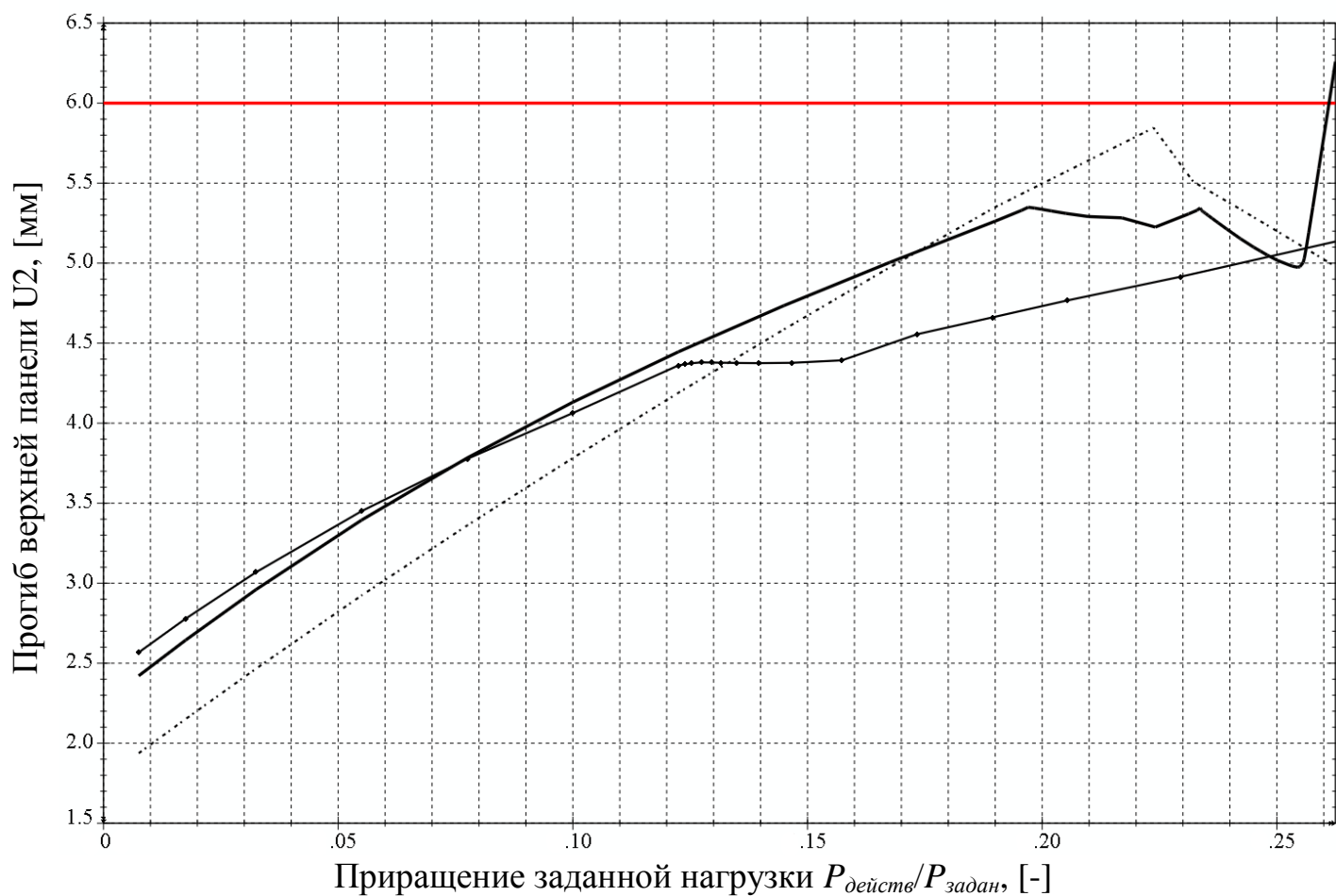
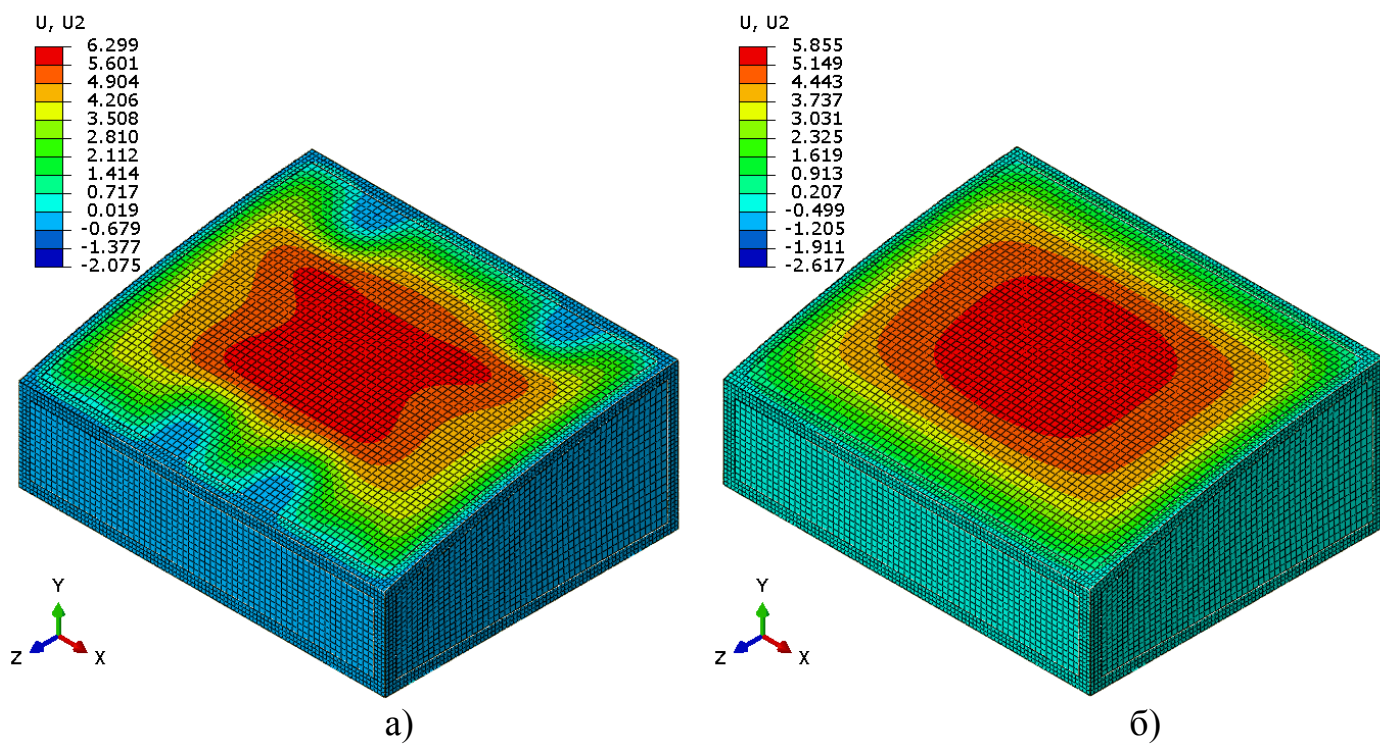


Рисунок 8 – Зависимость прогибов от толщин верхних панелей.

- $\delta_{пан} = 0,8$ мм (а);
- $\delta_{пан} = 1,0$ мм (см. рис. 7а);
- - - $\delta_{пан} = 2,0$ мм (б).

На рис. 8а и 8б видно влияние толщины обшивки на распределение прогибов по поверхности верхних панелей сварного отсека. На графиках рис. 8 дано сравнение НДС на участке до 25% $P_{действ}/P_{задан}$ (рис. 7, зона В).

Таким образом, обобщенное решение при многокритериальной неопределенности запишется следующим образом:

$$J = \max \left\{ \frac{\bar{P}_{крит}}{\bar{M}_{отс}} \right\}, \quad (3)$$

при заданных
функциональных
ограничениях

$$\begin{cases} 0,5 \leq \delta_6 \leq 2 \\ M_{отс} \leq M_0 \\ y \leq 6 \\ \partial y / \partial P \geq 0 \end{cases};$$

где:

$\bar{P}_{крит}$ – безразмерная величина $P_{крит}/P_0$;

$\bar{M}_{отс}$ – безразмерная величина $M_{отс}/M_0$.

Полученные результаты сведены в Таблицу 1.

Таблица 1

| Альтернатива отсека | №1 | №2 | №3 | №4* |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| δ_6 , мм | 0,8 | 1,0 | 2,0 | 1,0 |
| $P_{крит}$, Н | 6250 | 10000 | 11250 | 13000 |
| $\bar{P}_{крит}$, - | 0,125 | 0,2 | 0,225 | 0,26 |
| $M_{отс}$, кг | 27,36 | 28,47 | 34,04 | 28,47 |
| $\bar{M}_{отс}$, - | 0,961 | 1 | 1,196 | 1 |
| J | 0,13 | 0,2 | 0,188 | 0,26 |

* – альтернатива отсека без учета остаточных напряжений (рис. 7б).

Из таблицы следует, что при заданных ограничениях рациональный вариант сварного отсека по комплексному критерию J соответствует альтернативе №2.

Выводы

1. Разработанная модель сварного отсека сверхзвукового самолета позволяет оценить влияние конструктивных и технологических параметров на НДС отсека. С использованием модели можно решать задачи оптимизации с требованиями-ограничениями: по допустимым напряжениям, по величине прогибов, по формам потери устойчивости, по лимитной массе отсека и т.п. Решение таких многофакторных и многокритериальных задач оптимизации позволяет сократить сроки проектирования и объем экспериментально-исследовательских работ.
2. Учет остаточных напряжений уменьшает весовую эффективность панелей на 30% и качественно изменяет картину распределения деформаций (напряжений) по площади панелей, а также уровень «критического» НДС отсека.

Библиографический список

1. Окерблом Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. - М.: 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. - 304 с.
4. Винокуров В.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. - М.: Машиностроение, 1990. - 446 с.
5. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1974. - 248 с.

6. Талыпов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. - М.: Машиностроение, 1973. - 280 с.
7. Моисеев В.Н., Куликов Ф.Р., Кириллов Ю.Г. и др. Сварные соединения титановых сплавов. - М.: Металлургия, 1979. - 248 с.
8. Куркин С.А., Ховов В.М., Аксенов Ю.Н., Касаткин О.Г. и др. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 464 с.
9. Серенко А.Н., Крумбольдт М.Н., Багрянский К.В. Расчет сварных соединений и конструкций. - М.: Высшая школа, 1977. - 336 с.
10. Куркин С.А., Винокуров В.А., Вершинский С.В. Проектирование сварных конструкций в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1975. - 376 с.
11. Ендогур А.И. Конструкция самолетов. Конструирование деталей и узлов. - М.: Изд-во МАИ, 2013. - 556 с.
12. Рыбаулин А.Г., Сидоренко А.С. Исследование локального напряженного состояния и оценка долговечности конструкции авиационного изделия с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении // Труды МАИ. 2015. №79. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=55786>
13. Michaleris P., DeBiccari A. Prediction of Welding Distortion // Welding Journal. 1997. Vol. 76(4), pp. 172-181.
14. Murakawa H., Deng D., Ma N., Wang J. 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.

15. 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.
16. Voutchkov I., Keane A.J., Bhaskar A., Olsen T.M. Weld sequence optimization: The use of surrogate models for solving sequential combinatorial problems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2005. No.194, pp. 3535–3551.