

УДК 621.791: 629.76

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЛИСТОВ МЕТАЛЛООБЛИЦОВКИ НУЛЕВОЙ ОТМЕТКИ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА «АНГАРА»

Гула Д.Н.

*ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург,
e-mail: vka@mil.ru*

Настоящая статья посвящена вопросу анализа возможных схемных решений закрепления листов металлооблицовки на нулевой отметке стартового сооружения универсального стартового комплекса «АНГАРА». Был проведен анализ способов закрепления листов металлооблицовки на стартовом сооружении, что позволило описать возможные схемные решения закрепления листов металлооблицовки. Выбор возможной конструктивной схемы закрепления листов определялся зависимостью физико-механических параметров материалов конструкции от динамических параметров, задаваемых эксплуатационными нагрузками. Разработка схемных решений закрепления листов металлооблицовки на универсальном стартовом комплексе, допускающих деформацию листа при воздействии высокотемпературной газовой струи ракетного двигателя, благоприятно сказывается на ресурсе работы металлооблицовки стартового сооружения. Предложенные варианты закрепления позволяют увеличить промежутки времени между проведением очередных ремонтно-восстановительных работ, а значит, повысить готовность стартового комплекса к запуску ракет космического назначения.

Ключевые слова: анализ, закрепление, конструкционные материалы, стартовое сооружение, металлооблицовка

ANALYSIS OF POSSIBLE SCHEMATICS ATTACH SHEETS METALLOOBLITSOVKI ZERO MARK THE LAUNCH CONSTRUCTION UNIVERSAL LAUNCH COMPLEX «ANGARA»

Gula D.N.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru

This article is devoted to analysis of possible circuitry fixing sheets metallooblitsovki at zero launch construction of the universal launch complex «Angara». Analysis methods of fixing was carried out on the starting sheets metallooblitsovki building that allowed us to describe the possible schematics fixing sheets metallooblitsovki. Selection of possible constructive scheme fixing sheets determined by the dependence of physical and mechanical properties of the materials of construction of the dynamic parameters set by operational loads. Development of circuit design metallooblitsovki fixing sheets on the universal launch complex, allowing the deformation of the sheet when exposed to high temperature gas jet rocket engine favorably affects the service life of metallooblitsovki launch facility. Proposed options for fixing can increase the intervals between ordinary repair work and, therefore, increase the readiness of the launch complex for the launch of space rockets.

Keywords: analysis, consolidation, construction materials, starting the construction, metalcladding

Долговечность элементов конструкций при малоцикловом нагружении [2] существенно зависит от свойств материала и условий нагружения, определяющих амплитуды упругопластических деформаций и величины односторонне накапливаемых пластических деформаций. Эти деформации, в свою очередь, определяют интенсивность накопления усталостных и квазистатических повреждений, ведущих к предельному состоянию металлические конструкции.

В связи с этим вопросам выбора конструкционных материалов, а также решениям закрепления листов металлооблицовки на нулевой отметке стартового сооружения (СС) при проектировании должно уделяться соответствующее внимание. Проводя анализ возможных схемных решений, можно

провести декомпозицию и описать содержательную постановку задачи анализа возможных схемных решений закрепления листов металлооблицовки в следующем виде:

1. Исходными данными для проведения анализа являются: температура в камере сгорания двигательной установки (ДУ), температура на срезе сопла ДУ, температура плавления стали, время прогрева листа, статическое давление на срезе сопла ДУ, теплоемкость газов на срезе сопла ДУ.

2. Обоснование требований к металлооблицовке СС в составе стартового комплекса (СК) (по способу крепления, по оперативности проведения ремонтно-восстановительных работ (РВР), по минимизации воздействий на СС, по защищенности СС от тепловых и газодинамических воздействий).

3. Формирование вариантов крепления листов металлооблицовки на СС.

4. Оценивание вариантов крепления листов металлооблицовки на СС (на безотказность, долговечность, защищенность, ремонтпригодность).

5. Выбор вариантов крепления листов металлооблицовки на СС, предусматривающий рациональный вариант крепления листов с учетом минимизации времени проведения РВР, а также удовлетворяющий требованиям технического задания.

Анализ схемных решений подобного типа позволяет совершенствовать элементы конструкций СС, функционирующие в условиях высоких газодинамических и тепловых нагрузок от струй ДУ. Выполнение требований к металлооблицовке позволяет увеличить надежность и долговечность СС с учетом принятых ограничений и существующих технических решений защиты СК, включающих конкретный способ крепления листов металлооблицовки.

На основании проведенного анализа предложены возможные способы крепления листов металлооблицовки с возможностью пластического деформирования не в ущерб конструкции СС в целом, что, в свою очередь, позволяет увеличить промежутки времени между проведением очередных РВР, а значит, повысить готовность стартового комплекса к запуску ракет космического назначения (РКН).

Математическая постановка задачи анализа схемных решений предполагает введение требований к металлооблицовке по температуре, давлению и времени воздействия струи ракетного двигателя (РД) на металлооблицовку СС. В свою очередь, требования к металлооблицовке подразделяются на требования по диапазону времени безотказной работы $t_{б.р.}$, оперативности испол-

зования СС в условиях военной обстановки $\Delta t_{зап.}$ по точности определения времени на проведение РВР $\Delta t_{рвр} \approx 1 \text{сут.}$, по периодичности контроля целостности листов металлооблицовки СС $\Delta t_{контр.} = \Delta t_{зап.}$.

Выбор конструктивной схемы закрепления листов металлооблицовки определяется, в основном, зависимостью физико-механических параметров материалов конструкции от динамических параметров, задаваемых эксплуатационными нагрузками.

Увеличение жесткости закрепления листов металлооблицовки СС уменьшает напряжения и деформации, связанные с силовым воздействием струи РД на листы металлооблицовки, но одновременно увеличивает напряжения и деформации, вызванные тепловым воздействием этой струи [4].

Поскольку тепловое воздействие на листы металлооблицовки является более опасным, то представляется целесообразным использовать схемы закрепления листов металлооблицовки, между которыми имеются тепловые зазоры, обеспечивающие возможность свободного или близкого к свободному продольного смещения и свободного поворота сечения листов облицовки.

На рис. 1 показана схема закрепления листов, неподвижных относительно бетонной подложки, которая позволяет листам смещаться в направлении x (эти перемещения будем обозначать через u_x), что будет частично компенсировать термонапряжения в любом из листов металлооблицовки [1].

Следует отметить, что для такой схемы классическая теория пластин неприменима. Действительно, в этом случае в листе возникают значительные сдвиговые напряжения τ_{xz} , которые в теории пластин [5] считаются малыми.

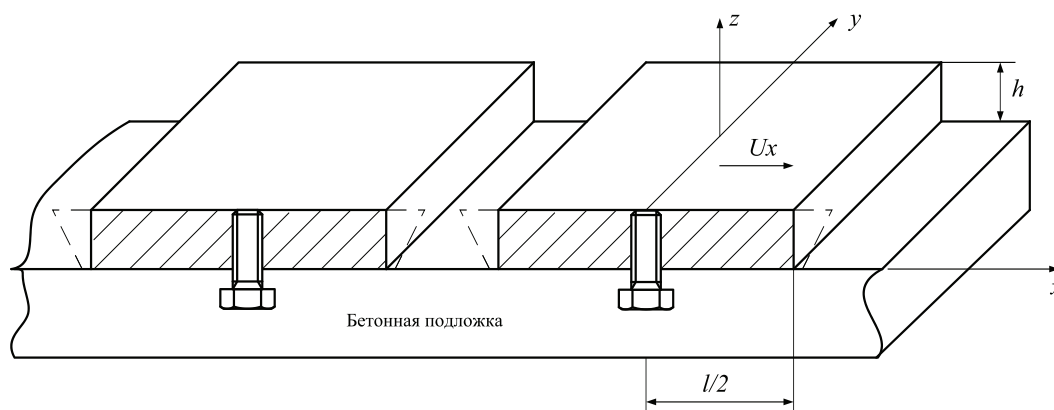


Рис. 1. Схема закрепления листов металлооблицовки с зазорами между листами

Для оценки эффективности такой схемы рассмотрим следующую модельную задачу.

Если поперечный (в направлении z , перпендикулярном плоскости листа (рис. 1)) размер части листа мал в сравнении с продольным (l) и соизмерим с толщиной (h), то в этом случае напряжениями σ_y можно пренебречь.

Если распределение температуры по толщине верхней части листа линейно, т.е.

$$\Delta T(z) = \Delta T_0 \frac{z}{h},$$

а максимальное значение избыточной температуры ΔT_0 таково, что значения величин α – коэффициент термического линейного расширения, λ – теплопроводность, E – модуль Юнга и G – модуль сдвига можно считать постоянными, а напряжения – чисто упругими. При этом принимается, что продольные деформации пропорциональны температурным, т.е. линейно изменяющимся по сечению листа.

В такой постановке поле перемещений можно искать в следующем виде:

$$u_x(x, z) = u_1 \frac{2x}{l} \frac{z}{h}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Pi &= 2 \int_0^{l/2} \int_0^h \left(\frac{\sigma_x^2}{2E} + \frac{\tau_{xz}^2}{2G} \right) dz dx = \int_0^{l/2} \int_0^h \left(E \left(2u_1 \frac{z}{lh} - \frac{\alpha \Delta T_0}{h} z \right)^2 + 4G \left(\frac{u_1}{lh} \right)^2 x^2 \right) dz dx = \\ &= E \left(2u_1 \frac{1}{lh} - \frac{\alpha \Delta T_0}{h} \right)^2 \times \int_0^{l/2} \int_0^h z^2 dz dx + 4G \left(\frac{u_1}{lh} \right)^2 \times \\ &\quad \times \int_0^{l/2} \int_0^h x^2 dz dx = E \frac{lh^3}{6} \left(2u_1 \frac{1}{lh} - \frac{\alpha \Delta T_0}{h} \right)^2 + \\ &\quad + 4G \frac{l^3 h}{24} \left(\frac{u_1}{lh} \right)^2 = \left(E \frac{2h}{3l} + G \frac{l}{6h} \right) u_1^2 - E \frac{2\alpha h \Delta T_0}{3} u_1 + E \frac{lh (\alpha \Delta T_0)^2}{6}. \end{aligned} \quad (6)$$

Значение u_1 можно найти из условия минимума потенциальной энергии:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u_1} = 2 \left(E \frac{2h}{3l} + G \frac{l}{6h} \right) u_1 - E \frac{2\alpha h \Delta T_0}{3} = 0, \quad (7)$$

$$u_1 = \frac{h \alpha \Delta T_0}{\left(\frac{2h}{l} + \frac{Gl}{E2h} \right)} = \frac{\alpha \Delta T_0 l}{2 \left(1 + \frac{Gl^2}{4Eh^2} \right)}. \quad (8)$$

В этом случае продольные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_x = E \left(2 \frac{\alpha \Delta T_0 l}{2 \left(1 + \frac{Gl^2}{4Eh^2} \right) lh} \frac{z}{h} - \frac{\alpha \Delta T_0}{h} z \right) = E \alpha \Delta T_0 \frac{z}{h} \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{Gl^2}{4Eh^2} \right)} - 1 \right) = -E \alpha \Delta T_0 \frac{z}{h} \left(\frac{1}{\frac{4Eh^2}{Gl^2} + 1} \right). \quad (9)$$

где u_1 – продольные перемещения верхнего правого угла листа ($x = l, z = h$).

Тогда выражения для продольных (ϵ_x) и сдвиговых (γ_{xz}) деформаций примут вид

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = 2u_1 \frac{z}{lh}, \quad (2)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} = 2u_1 \frac{x}{lh}. \quad (3)$$

В соответствии с законом Гука продольные (σ_x) и касательные (τ_{xz}) напряжения запишутся в виде [3]:

$$\sigma_x = E (\epsilon_x - \alpha \Delta T) = E \left(2u_1 \frac{z}{lh} - \frac{\alpha \Delta T_0}{h} z \right), \quad (4)$$

$$\tau_{xz} = G \gamma_{xz} = 2Gu_1 \frac{x}{lh}. \quad (5)$$

где ΔT – разница распределения температуры по толщине;

E – модуль Юнга;

G – модуль сдвига.

Потенциальная энергия (Π) упругих деформаций листа (на единицу ширины) определяется из соотношения

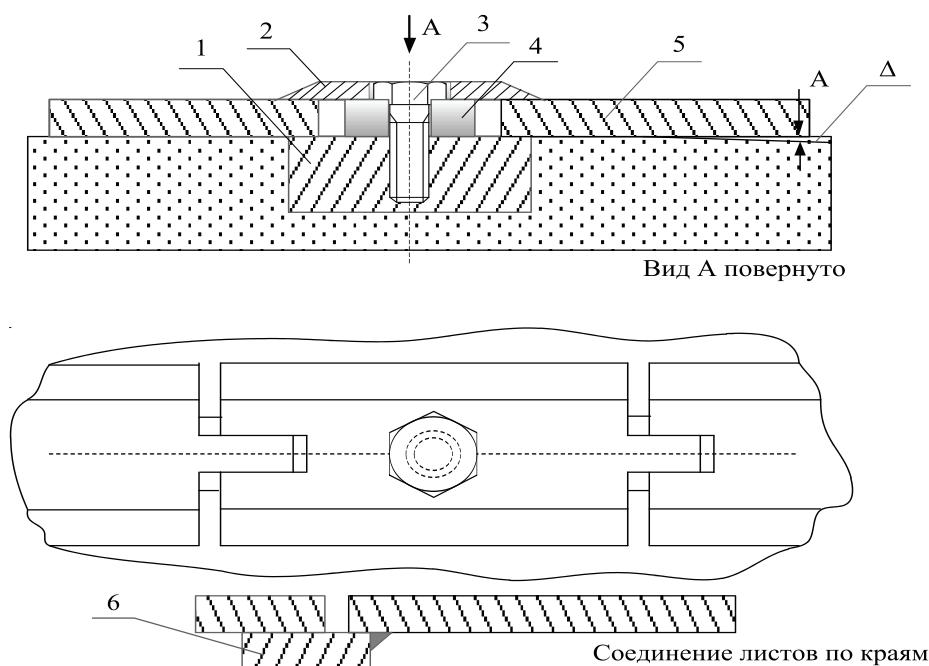


Рис. 2. Крепление накладными планками (вариант 1)

Заметим, что для листа (пластины), у которого края жестко заделаны и не имеют возможности продольного смещения, напряжения определяются формулой

$$\sigma_x = -E\alpha\Delta T_0 \frac{z}{h}. \quad (10)$$

Таким образом, при $h \ll 1$ значения напряжений в обеих схемах одинаковы, т.е. схема на рис. 1 позволяет снизить термонапряжения только в случае, если значения h и l соизмеримы. Таким образом, создание зазора между листами при жестком соединении их с основанием не дает эффекта.

На рис. 2–4 показаны различные варианты крепления листов, в которых реализуются условия продольной податливости. В варианте 1 (рис. 2) крепление осуществляется при помощи накладной планки 2. Планка выполняется из стали 12МХ. Для возможности термодформации планки выполняются достаточно короткими и каждая планка крепится к закладному элементу 1 одним болтом 3. Для исключения проворачивания планки центрируются относительно друг друга специальным выступом, который входит паз соседней планки.

В данной схеме могут быть реализованы различные варианты крепления листов. Для того, чтобы схема закрепления была близка к шарниру, ширина накладки 2 должна быть больше ширины планки 4 на 20–25 мм, а высота планки 4 должна быть гарантированно больше толщины ли-

ста 5 на 0,2–0,4 мм. Шарнирное соединение будет работать, если между планкой 4 и закладным элементом 1 устанавливается прокладка, обеспечивающая этот размер с учетом допусков на толщину листов. Болты 3 рассчитываются на отрицательный перепад давления $0,3 \cdot 10^5$ Па (под листом давление выше). Для уменьшения теплового воздействия на торцы листов, особенно в начале воздействия, когда тепловой зазор между листами максимальный, к одной из коротких сторон листа снизу приваривается полоса 6. Для этой полосы в бетонной заливке должно быть предусмотрено углубление. Как было показано выше, в некоторых случаях целесообразно, чтобы по оси x листа уровень заливки был ниже на величину Δ , чем в крайних сечениях. Данное крепление позволяет крепить листы любой толщины, причем при толщине листа более 40 мм края длинной стороны листа могут иметь фрезерованный уступ, таким образом, что накладка 4 не будет выступать над верхней плоскостью листа 5.

Жесткая заделка листов не должна позволять поворачиваться листу 5 в заделке, но должна допускать горизонтальное смещение листа при термодформациях. Это можно обеспечить увеличением ширины накладки 4 до 80–100 мм. Болты 3 (обязательно с шайбами) рассчитываются на значение вертикальной силы N , возникающей от момента M в заделке листов.

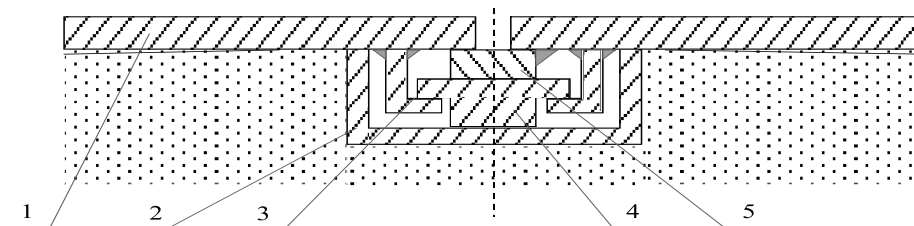


Рис. 3. Скользящее крепление (вариант 2)

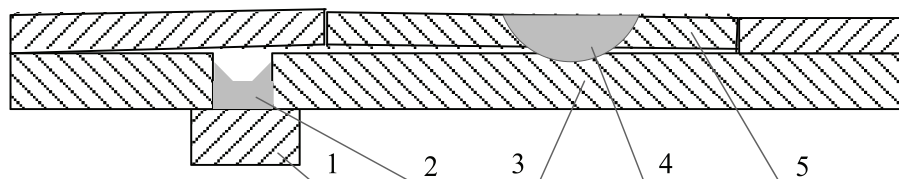


Рис. 4. Использование теплозащитных листов (вариант 3)

Удельная сила (отнесенная к единице длины) от двух листов определяется как

$$N = \frac{4M}{3l},$$

где l – ширина поверхности листа, контактирующая с накладкой 4. Для обеспечения прочности в этом варианте необходимо использовать большее количество болтов 3 увеличенного диаметра с мелкой резьбой и с малым расстоянием между ними. Болты затягиваются динамометрическим ключом таким образом, чтобы предварительное поджатие накладки 4 не превышало $0,05 \div 0,2 N$ (в противном случае увеличится сила трения при линейном расширении листа и в листе возникнут дополнительные напряжения). Учитывая, что термомодеформироваться будет и накладка 4, крайние отверстия под болты 3 в накладке 4 должны быть выполнены в виде паза. Планка 4 в данном случае может отсутствовать. Данная схема применима только к листам небольшой толщины 10–20 мм.

В варианте 2 (рис. 3) к закладному элементу 2 болтами крепится Т-образная направляющая 4. К листам 1 приварены специальные уголки 3. Для уменьшения теплового воздействия на торцы листов, особенно в начале воздействия, когда тепловой зазор между листами максимален, к одной из длинных сторон листа приваривается полоса 5.

Для возможности заведения листов в пазы самый крайний от пусковой рамы лист крепится при помощи накладных планок по варианту 1. В этом месте Т-образные

направляющие отсутствуют, поскольку остальные листы заводятся в пазы и протаскиваются до конца накладных планок. По этому способу могут крепиться листы любой толщины. Этот вариант обеспечивает заделку листа, близкую к шарнирной.

В варианте 3 (рис. 4) тепловое воздействие на силовой лист 3 минимальное, поэтому его термомодеформации можно не учитывать, и для крепления использовать любые стандартные схемы металлооблицовки. Теплозащитный лист 5 толщиной 10–12 мм и шириной 300–500 мм приваривается в центре 4 и имеет предварительный прогиб.

При нагреве теплозащитный лист выпрямляется и садится на силовой лист. Величина начального прогиба определяется таким образом, чтобы исключить появление значительной отрывающей силы после термического изгиба, в результате которого края теплозащитного листа войдут в контакт с силовым листом. Вместо сварки могут использоваться два – четыре расположенных близко друг к другу силовых болта с конической головкой, выполненных из теплостойкой стали.

Выводы

Анализ схемных решений закрепления листов металлооблицовки нулевой отметки СС позволит, прежде всего, сравнить различные варианты конструктивных решений, в частности определить возможность снятия ограничений на деформацию листа, что, в свою очередь, повысит ресурс безотказной работы металлооблицовки СС.

Разработка схемных решений крепления листа металлооблицовки, допускающих деформацию листа при воздействии высокотемпературной газовой струи РД, благоприятно сказывается на ресурсе работы металлооблицовки СС.

Список литературы

1. Дикарев В.И. Энциклопедия изобретателя. – СПб.: Издательство «Вит-Принт», 2002. – 400 с.
2. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности / Учебное издание. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. – 424 с.
3. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. – Издательство Московского университета, 1965. – 262 с.
4. Полупан А.В. Повышение безопасности эксплуатации металлоконструкций ракетно-космической тех-

ники: Монография. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. – 278 с.

5. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 1. Под ред. Биргера И.А., Пановко Я.Г. – М.: Машиностроение, 1968.

References

1. Dikarev V.I. Jenciklopedija izobretatelja. SPb.: Izdatelstvo «ViT-Print», 2002. 400 p.
2. Ikrin V.A. Soprotivlenie materialov s jelementami teorii uprugosti i plastichnosti / Uchebnoe izdanie. M.: Izdatelstvo Assoiatsii stroitelnyh vuzov, 2005. 424 p.
3. Moskvitin V.V. Plastichnost pri peremennyh nagruzhenijah. Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1965. 262 p.
4. Polupan A.V. Povyshenie bezopasnosti jekspluatatsii metallokonstrukcij raketno-kosmicheskoy tehniki: Monografija. SPb.: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 278 p.
5. Prochnost, ustojchivost, kolebanija. Spravochnik v treh tomah. Tom 1. Pod red. Birgera I.A., Panovko Ja.G. M.: Mashinostroenie, 1968.