

ПРОЧНОСТЬ КОРПУСОВ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Аннотация.

Актуальность и цели. При проектировании и доводке конструкций машин необходимо стремиться к снижению их снаряженной массы при одновременном улучшении эксплуатационных характеристик, таких как грузоподъемность, расход топлива и других. Кузов составляет значительную часть от всего транспортного средства как по массе, так и по стоимости. Снижение материалоемкости кузова при одновременном улучшении прочностных и жесткостных параметров является одной из важнейших задач при проектировании. Для достижения этого в работе проведена оценка влияния изменения отдельных деталей на параметры корпуса в целом.

Материалы и методы. Исследование проводилось методом регрессионного анализа. Расчетные исследования по оценке прочности корпуса гусеничной машины выполнены методом конечных элементов.

Результаты. Разработаны подробные конечно-элементные модели корпуса снегоболотохода. Получены результаты исследования влияния отдельных элементов на прочность, жесткость и металлоемкость корпуса гусеничной машины.

Выводы. По результатам проведенного исследования установлено, что наиболее нагруженным режимом является переезд машиной через препятствие с опорой на крайние диагональные катки. Наиболее напряженной зоной является передняя часть корпуса в зоне соединения основания с каркасом пола. Одно основание не способно воспринимать эксплуатационные нагрузки, характерные для снегоболотоходов. На прочность конструкции наибольшее влияние оказывает каркас пола, а на изгибную жесткость – основание корпуса.

Ключевые слова: гусеничная машина, снегоболотоход, корпус, прочность, жесткость.

STRENGTH OF CATERPILLAR VEHICLE'S HULL

Abstract.

Background. At the stages of initial and final machine design it is important to strive to reduce the curb weight while improving performance such as capacity, fuel consumption and others. The hull construction is a significant proportion of the total vehicle weight as well as the cost. Reduction of hull material capacity while improving strength and stiffness parameters is one of the most important objectives during the design. To achieve this goal, the authors evaluated the influence of changes of individual parameters of the hull body parts on its strength and stiffness characteristics.

Materials and methods. The research was conducted by the regression analysis. Computational studies of the caterpillar vehicle's hull strength were carried out using the finite element method.

Results. The authors developed a detailed finite element model of a terrain vehicle. The results of the research of individual elements' influence on strength, stiffness and metal casing of a terrain vehicle were obtained.

Conclusions. According to the results of the study it has been found that the most loaded vehicle mode is moving through an obstacle, bearing on the extreme

diagonal rollers. The most stressed area is the front part of the hull at the junction with the base frame. It has been found that the base frame separately is not able to perceive the operating load characteristics of a terrain vehicle. The greatest effect on the strength of the structure is performed by the hull bottom frame; the bending stiffness - by the base frame.

Key words: caterpillar vehicle, terrain vehicle, hull, strength, stiffness.

Введение

Специальные гусеничные и колесные снегоболотоходы применяются для использования в особо тяжелых дорожных и климатических условиях. В настоящее время происходит замещение конверсионной гусеничной техники, разработанной в первую очередь для нужд Вооруженных сил, на машины для гражданского применения. Одним из применяемых решений при создании корпусов гусеничных машин данного типа является использование верхней части кузова серийно выпускаемых автомобилей [1–3]. При конструировании корпуса такого типа машин особое внимание уделяется конструкции основания и способу соединения его с верхней частью, взятой от серийного автомобиля. Стоимость корпуса составляет не менее 50 % от общей стоимости специального транспортного средства. Выход его из строя практически означает выход из строя транспортера. Поэтому при проектировании важно знать, как работает корпус и распределяются в нем напряжения, каковы его продольная, поперечная и крутильная жесткости. В этой связи возникают задачи проведения виртуального эксперимента для детального исследования влияния отдельных элементов несущей системы транспортера на напряженно-деформированное состояние (НДС) корпуса. В настоящее время для исследования НДС сложных кузовных конструкций наибольшее применение получили программные комплексы, основанные на методе конечных элементов [4].

1. Постановка задачи исследования

Для нахождения рациональных параметров конструкции необходимо прежде всего изучить влияние укрупненных структурных групп, из которых состоит корпус (рис. 1). В корпусе снегоболотохода можно выделить несколько структурных групп: основание корпуса, каркас пола, кузов, состоящий из деталей серийного автомобиля. Кроме того, существует группа деталей (кронштейны, опоры агрегатов и др.), размеры которых выбираются исходя из условий, не связанных со статической прочностью корпуса.

Первоначально необходимо оценить НДС исходной конструкции корпуса. При этом рассматриваются наиболее характерные и нагруженные режимы движения машины. Интересуют в первую очередь условия воздействия на корпус изгибной и скручивающей нагрузок. Можно выделить следующие режимы:

1. Изгиб корпуса при переезде машиной через препятствие в виде бревна или бугра, когда она опирается только на средние катки.
2. Изгиб корпуса, когда машина опирается крайними катками.
3. Кручение корпуса, когда машина опирается только крайними диагонально расположенными катками.

В первом случае граничные условия задаются на концах балансиров третьего и четвертого катков по обоим бортам с ограничением всех степеней

свободы, кроме вращения относительно оси Y ; принимается перегрузка, равная $1g$. Схема приложения нагрузки и опор показана на рис. 2.

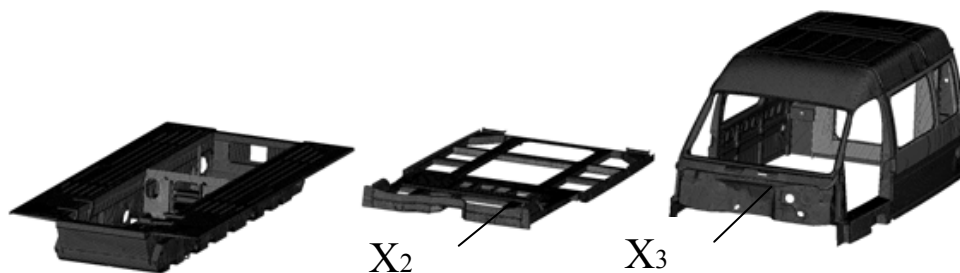


Рис. 1. Структурные группы корпуса снегоболотохода
 X_1 – Основание корпуса; X_2 – Каркас пола; X_3 – Кузов

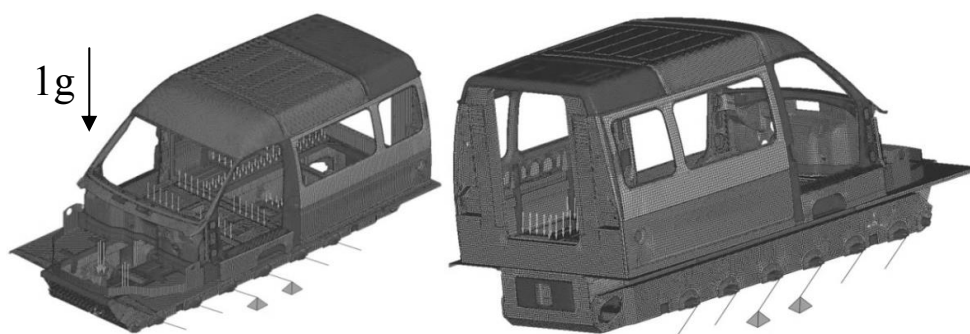


Рис. 2. Закрепление и нагружение расчетной модели при режиме 1

Для режима 2 граничные условия задаются на концах балансиров крайних катков с ограничением всех степеней свободы, кроме вращения относительно оси Y , перегрузка равна также $1g$.

Граничные условия при третьем режиме задаются на концах балансиров крайних диагонально расположенных катков с аналогичным ограничением и той же нагрузкой (рис. 3).

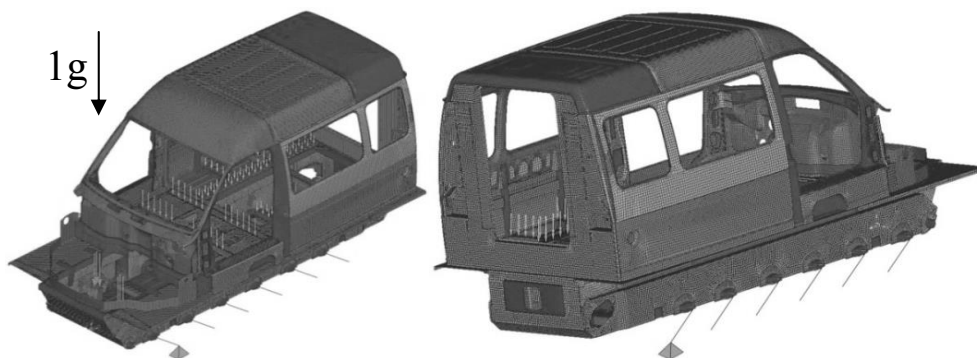


Рис. 3. Закрепление и нагружение расчетной модели при режиме 3

Расчеты выполнены с использованием программного комплекса MSC.Nastran. Разработанная расчетная модель состоит из 284042 узлов и 284710

элементов, из них: оболочечных типа SHELL, моделирующих основные детали корпуса – 267608 (из них 8396 – треугольных элемента, что составляет 3,2 % от общего числа пластинчатых элементов); одномерных жестких элементов типа Rigid – 16910; одномерных элементов типа Beam, моделирующих торсионы и балансиры – 192.

2. Результаты расчета исходного корпуса

Для режима 1 на рис. 4 показано распределение напряжений по элементам модели. При этом максимальные напряжения будут возникать в лонжеронах основания корпуса около фланцев средних катков. Их значение составляет $0,32 \sigma_T$ без учета перегрузки, где σ_T – предел текучести.

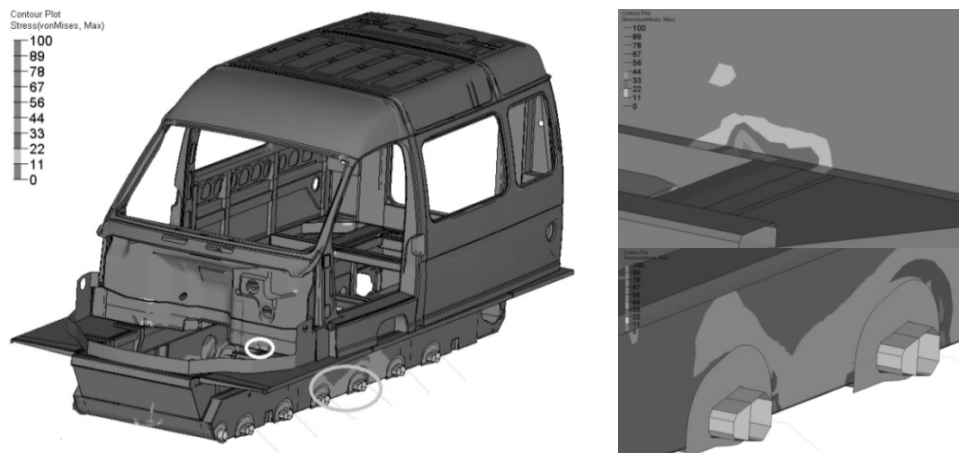


Рис. 4. Картина напряженного состояния исходной модели в режиме 1

Для режима 2 распределение напряжений по элементам показано на рис. 5. Максимальные напряжения, около $0,28\sigma_T$, возникают в передней части кузова в зоне соединения основания с каркасом пола.

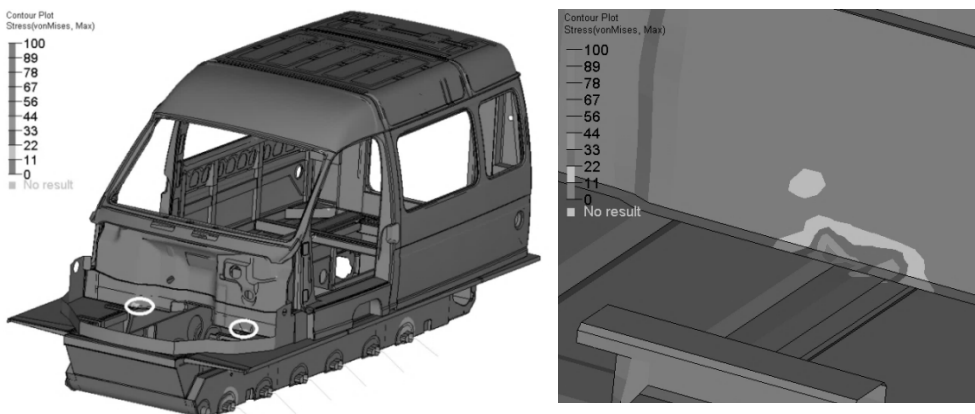


Рис. 5. Поле напряжений исходной модели в режиме 2

На рис. 6 приведено распределение напряжений по элементам в режиме 3. Максимальные значения напряжений, сравнимые с пределом текуче-

сти, также возникают в передней части в зоне соединения основания с каркасом пола.

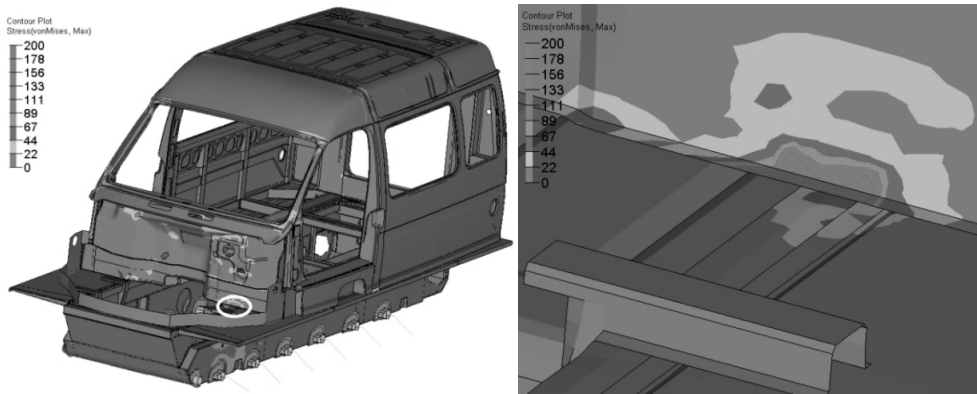


Рис. 6. Поле напряжений исходной модели в режиме 3

Важным исследуемым параметром является также жесткость кузова. В режиме 3 корпус снегоболотохода воспринимает скручивающие и изгибные нагрузки. Характеристики жесткости можно определять по относительным перемещениям точек нижней полки лонжерона (рис. 7).

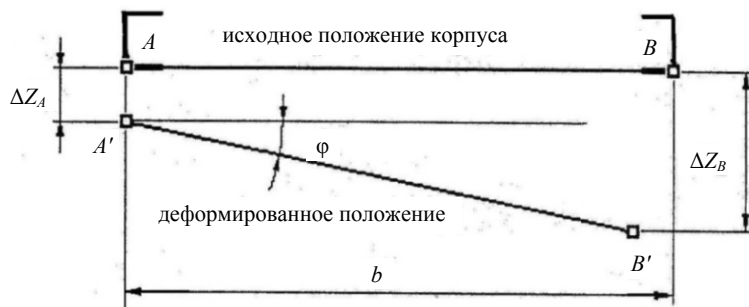


Рис. 7. Схема для определения прогиба и угла закручивания торсиона

Прогиб (как среднее арифметическое перемещений точек левого и правого лонжеронов) определяется по формуле

$$\Delta Z = (\Delta Z_A + \Delta Z_B) / 2. \tag{1}$$

Жесткость кузова на изгиб рассчитывается по формуле

$$C_{\text{изг}} = \frac{\sum F}{f^{\text{max}}}, \tag{2}$$

где $\sum F$ – суммарная нагрузка; f^{max} – максимальное перемещение.

Жесткость кузова на кручение нагрузок определяется через относительный угол поворота поперечных сечений кузова. Угол поворота сечений определяется через разницу деформаций

$$\varphi = (180^\circ / \pi) \cdot ((\Delta Z_A - \Delta Z_B) / b). \tag{3}$$

Из анализа полученных результатов расчета корпуса можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее тяжелым режимом нагружения является переезд машины через препятствие с опорой на крайние диагональные катки.

2. Во всех режимах нагружения наибольшие напряжения возникают в передней части кузова в зоне соединения основания с каркасом пола.

3. Для дальнейшего анализа следует использовать расчетные схемы с нагрузкой, имитирующей переезд машины через препятствие с опорой на средние катки (режим 1) и переезд через препятствие с опорой на крайние диагональные катки (режим 3).

3. Оценка влияния отдельных элементов конструкции на НДС корпуса

При проектировании гусеничных машин часто считают, что всю нагрузку воспринимает основание корпуса, так как оно выполнено из металлических листов относительно большой толщины, а влияние верхней части (салона кузова) незначительно. Поэтому не уделяют должного внимания ее конструкции и способу соединения с основанием. Для проверки правомерности такого подхода проведен анализ двух моделей корпуса – модели, содержащей только основание, и модели, содержащей основание с каркасом пола (рис. 8). Значения нагрузок, прикладываемых к расчетным моделям, приняты одинаковыми.

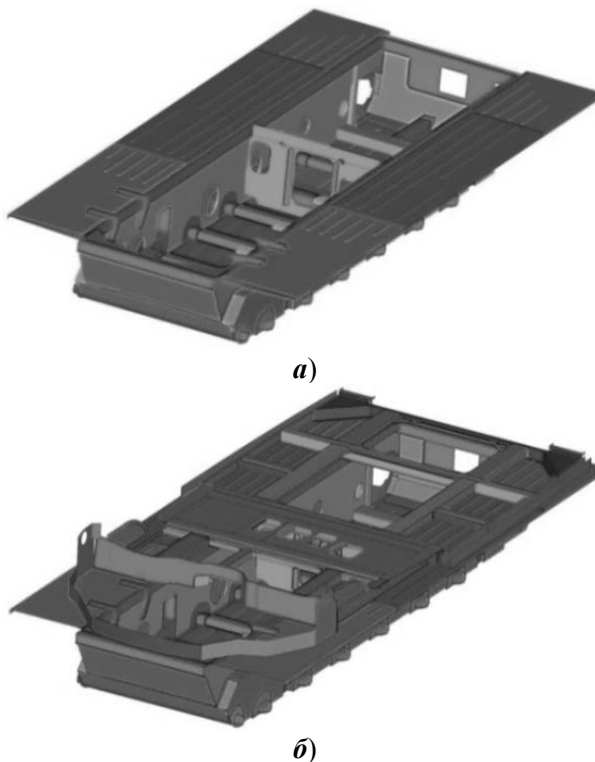


Рис. 8. Расчетные модели: *a* – основание корпуса;
б – основание корпуса с каркасом пола

Для модели основания корпуса в режиме переезда через бревно с опорой на средние катки максимальное напряжение имеет значение, в 3,02 раза превышающее значение у полной модели корпуса. Напряженно-деформированное состояние основания показано на рис. 9.

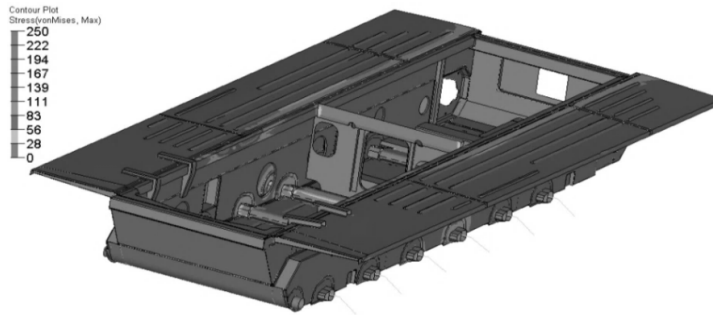


Рис. 9. Картина напряжений модели «Основание корпуса» для режима 1

В режиме переезда через препятствие с опорой на крайние диагональные катки максимальное напряжение в модели основания превышает в 3,36 раза максимальное напряжение, возникающее в полной модели. Напряженно-деформированное состояние модели показано на рис. 10.

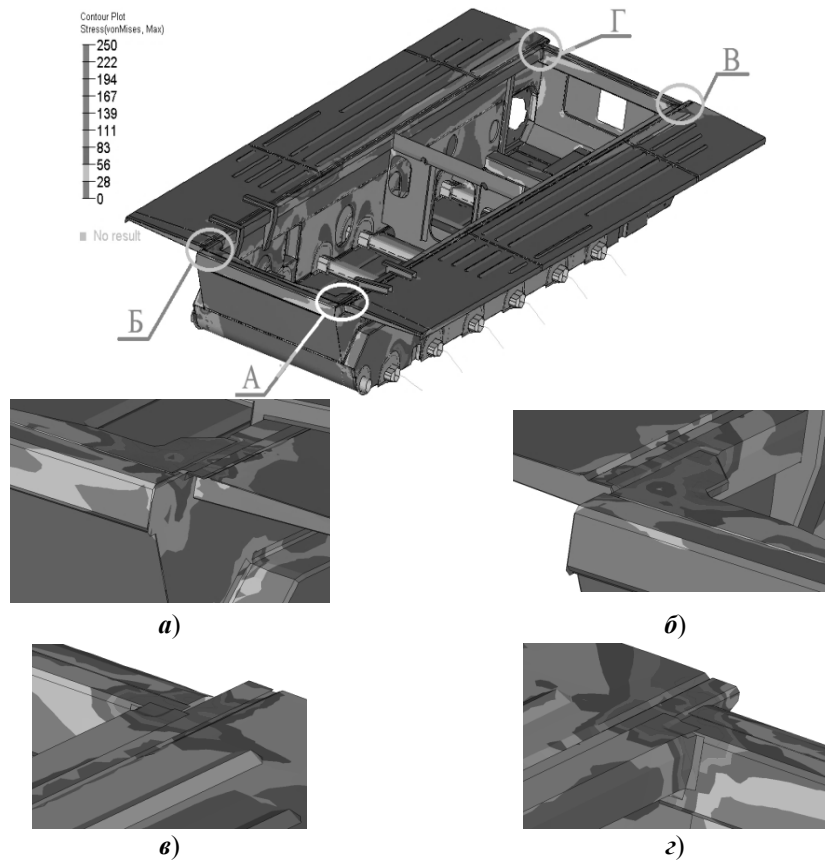


Рис. 10. Картина напряжений в модели «Основание корпуса» конструкции в режиме 3

Для модели основания корпуса с каркасом пола в режиме 1 максимальное напряжение превышает на 14 % максимальное напряжение полной модели (рис. 11).

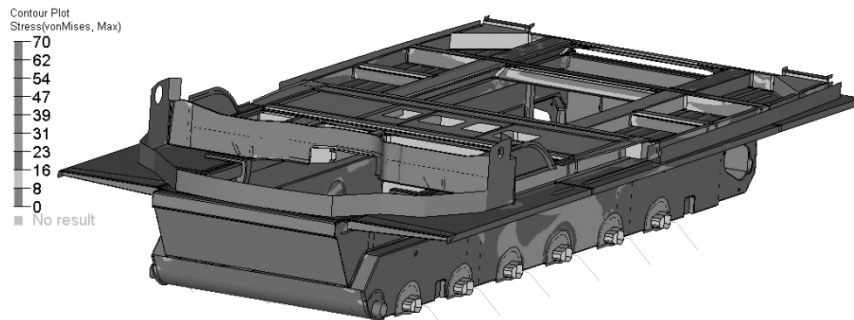


Рис. 11. Картина напряжений в модели «Основание корпуса с каркасом пола» для режима 1

В режиме переезда машины через препятствие с опорой на крайние диагональные катки максимальное значение напряжений составляет 73 % от максимального напряжения полной модели.

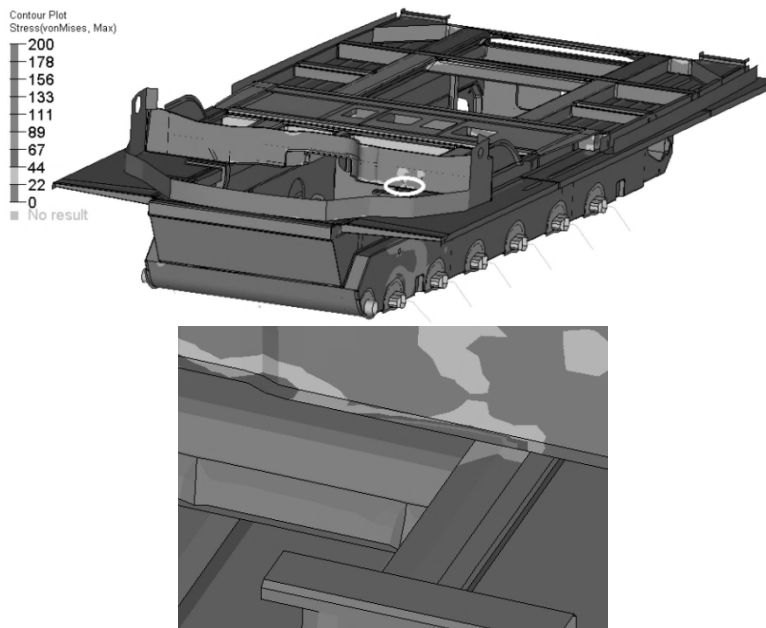


Рис. 12. Картина напряжений модели «Основание корпуса с каркасом пола» для режима 3

Из анализа полученных результатов можно сказать, что одно основание не способно воспринимать эксплуатационные нагрузки, характерные для снегоболотоходов, так как в отдельных его местах отмечается трехкратное превышение напряжений по отношению к значениям у полной модели. Отдельно основание корпуса имеет не замкнутое в поперечном направлении сечение, поэтому оно плохо работает на кручение. Модель «Основание корпуса с кар-

касом пола» воспринимает нагрузки, почти как целая модель, так как каркас пола сверху замыкает поперечные сечения основания корпуса.

Для оценки влияния изменения толщин деталей на напряженно-деформированное состояние корпуса снегоболотохода была получена аналитическая зависимость интересующих параметров (функций отклика) от параметров конструкции (факторов). При этом применялся метод регрессионного анализа. При составлении регрессионных уравнений за функции отклика брали:

- массу транспортера;
- максимальное напряжение в корпусе для режима 3;
- максимальное напряжение в корпусе для режима 1;
- жесткость кузова при кручении в режиме 1;
- угол поворота сечений корпуса в режиме 3.

Факторами являлись толщины деталей структурных групп (рис. 1). При варьировании факторов в модели менялись толщины всех деталей соответствующих структурных групп на 20 % относительно значений, предусмотренных конструкторской документацией (КД). Наиболее распространен случай планирования на двух уровнях. Тогда в расчетах используются значения, соответствующие кодированному верхнему (+1) и нижнему (-1) границам интервала варьирования. Кодирование факторов (линейное преобразование координат факторного пространства) определяется соотношением

$$x_i = \frac{\tilde{x}_{io} - \tilde{x}_i}{\Delta\tilde{x}_i}, \quad (4)$$

где x_i – кодированное текущее значение фактора; \tilde{x}_{io} – натуральное значение нулевого уровня; \tilde{x}_i – натуральное текущее значение фактора; $\Delta\tilde{x}_i$ – натуральное значение интервала варьирования.

Отождествление верхнего уровня со знаком плюс и нижнего со знаком минус приводит к стандартной форме матрицы планирования, использующей только знаки. Для исследования использована матрица полного факторного плана эксперимента, которая позволяет получить математическое описание процесса в форме отрезка ряда Тейлора. При этом ограничились моделью с линейными эффектами и двойными взаимодействиями факторов:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (5)$$

По результатам проведенного анализа (оценка значимости коэффициентов регрессии, оценка адекватности моделей) по формулам и таблицам, приведенным в [5–7], получены определенные зависимости, приведенные ниже. Регрессионная зависимость массы корпуса имеет вид

$$Y_m = 748,591 + 78,609X_1 + 15,856X_2 + 38,731X_3. \quad (6)$$

Для наглядного изображения влияния структурных частей кузова построена диаграмма, показанная на рис. 13.

Видно, что наибольшую массу имеет основание корпуса: 52 % от общей массы; 26 % от общей массы имеет «кузов»; 11 % составляет каркас пола и 11 % от массы кузова вносят кронштейны, опоры и другие детали размеры, которых выбираются для обеспечения других параметров.

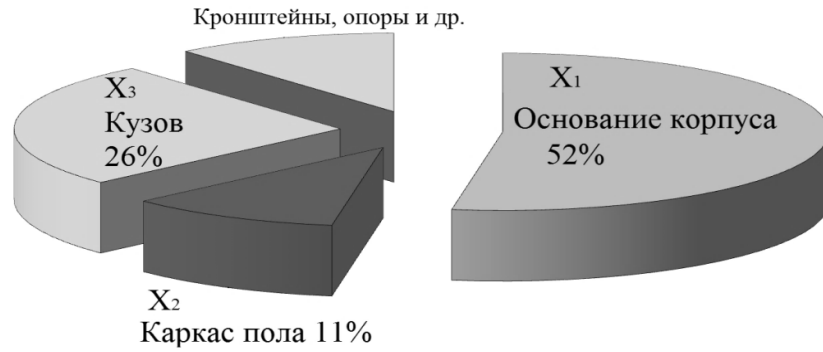


Рис. 13. Диаграмма распределения массы по структурным группам

Регрессионная зависимость максимальных напряжений для режима 3 (переезд через препятствие с опорой на крайние диагональные катки) (рис. 14):

$$Y_{\sigma 1} = 260 - 13,325X_1 - 32X_2 + 11,65X_3 + 7,6 X_{12} - 16,08X_{23}.$$

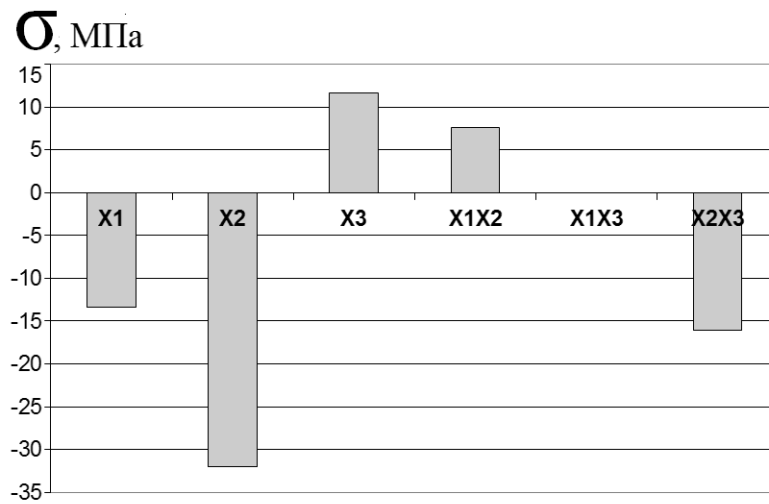


Рис. 14. Диаграмма влияния факторов на максимальные напряжения конструкции в режиме 3

Из полученного регрессионного уравнения видно, что на максимальное напряжение существенное влияние оказывают каркас пола, основание корпуса, кузов и совместно каркас пола с кузовом. Влияние некоторых факторов отрицательно. Наибольшее влияние оказывает каркас пола.

Регрессионная зависимость угла перекоса торсионов в режиме 3 имеет вид

$$Y_{\varphi} = 2,8005 + 0,06341X_1 + 0,007268X_2 + 0,08271X_3 - 0,0051X_{12} + 0,0044X_{13} + 0,014X_{23}.$$

После оценки значимости коэффициентов регрессии по формулам и таблицам, приведенным в работах [5–7], получили, что при заданной погреш-

ности измерения контролируемого параметра изменения параметра укладываются в доверительный интервал.

$$Y_{\phi} = 2,8005.$$

Регрессионная зависимость максимальных напряжений, возникающих в корпусе снегоболотохода для режима 1 (переезд через бревно с опорой на средние катки), имеет вид

$$Y_{\sigma_2} = 81,025 - 6,975X_1 - 13,765X_2 + 6,8375X_3 - 6,31X_{12} - 4,073X_{23}.$$

Соответствующая диаграмма приведена на рис. 15.

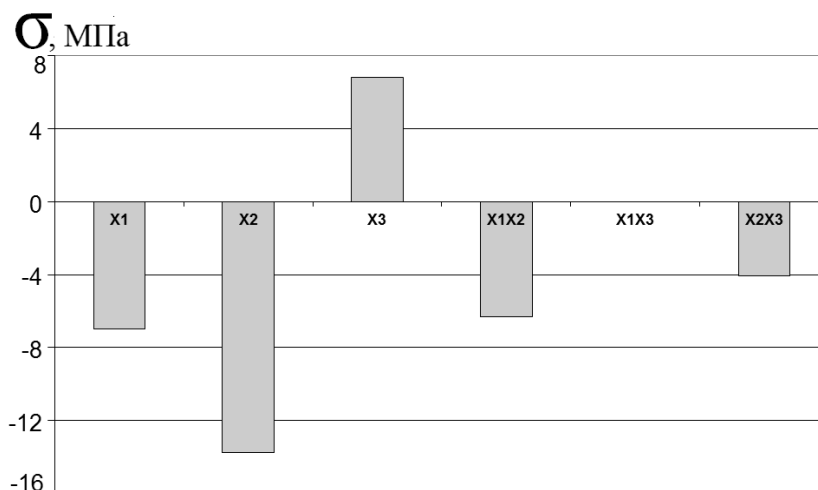


Рис. 15. Диаграмма влияния факторов на максимальные напряжения конструкции в режиме 1

Видно, что на максимальные значения напряжений существенное влияние оказывают каркас пола, основание корпуса, кузов и совместно основание корпуса с каркасом пола, а также каркас пола с кузовом. Наибольшее влияние оказывает каркас пола. Влияние структурной группы «Кузов» в данной конструкции машины проявляется отрицательно, так как при увеличении толщин ее деталей максимальные напряжения в зоне соединения основания с каркасом пола возрастают.

Регрессионная зависимость изгибной жесткости корпуса снегоболотохода имеет вид

$$Y_C = 49001,72 - 6367,98X_1 + 1703,64X_2 - 1832,58X_3.$$

Соответствующая диаграмма приведена на рис. 16. Видно, что на изгибную жесткость наибольшее влияние оказывает основание корпуса.

Полученные результаты показывают степень влияния изменения толщин деталей на напряженно-деформированное состояние корпуса снегоболотохода, могут быть использованы при проектировании машин данного типа.

Выводы

1. Наиболее нагруженным режимом является режим переезда машины через препятствие с опорой на крайние диагонально расположенные катки.

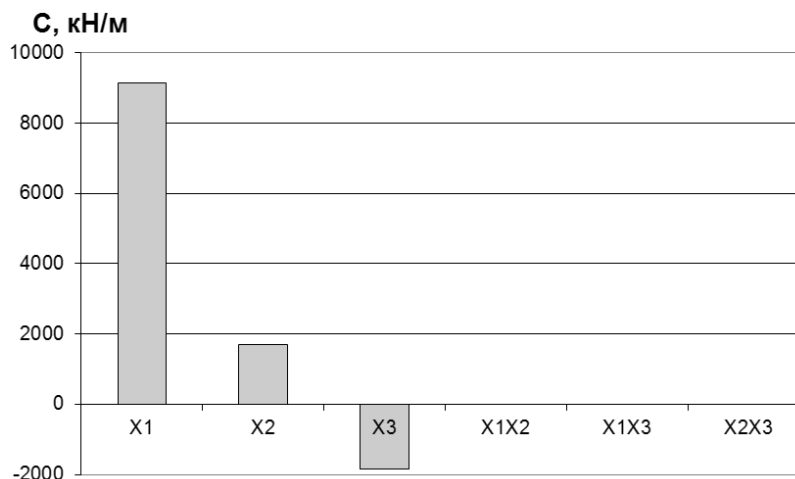


Рис. 16. Диаграмма влияния факторов на изгибную жесткость

2. При всех режимах нагружения наибольшие напряжения возникают в передней части корпуса, в зоне соединения основания с каркасом пола.

3. Отдельно основание корпуса машины не способно воспринимать эксплуатационные нагрузки, характерные для снегоболотоходов. Оно имеет открытые в поперечном направлении сечения, поэтому плохо работает на кручение.

4. Модель основания корпуса с каркасом пола воспринимает нагрузки, почти как целая модель, так как каркас пола замыкает поперечные сечения основания корпуса.

5. На прочность конструкции в интервале варьирования толщин деталей на 20 % наибольшее влияние оказывает каркас пола. Существенное влияние оказывает также совместное действие структурных групп «Каркас пола» и «Основания корпуса», а также каркас пола с кузовом.

6. Влияние некоторых структурных групп может быть отрицательным как на максимальные напряжения, так и на жесткость корпуса. При увеличении толщин, а следовательно, и массы деталей таких групп, уровень напряжений повышается.

7. На изгибную жесткость корпуса наибольшее влияние оказывает основание.

Список литературы

1. Заволжский завод гусеничных тягачей. – URL: <http://www.zzgt.ru>.
2. Завод вездеходных машин. – URL: <http://www.zvm-nn.ru>.
3. Завод транспортных машин ООО «ТрансМаш». – URL: <http://www.transmashnn.ru>.
4. Проектирование полноприводных колесных машин : учебник для вузов : в 3 т. / Б. А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, Л. Ф. Жеглов и др. ; под общ. ред. А. А. Полунгяна. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – Т. 3. – 432 с.
5. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
6. Автомобили: Испытания : учеб. пособие для вузов / М. В. Беляев, М. С. Высоцкий, Л.Х. Гилелес ; под ред. А. И. Гришкевича, М. С. Высоцкого. – Мн. : Высшая школа, 1991. – 187с.

7. **Ящерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Высшая школа, 1985. – 288 с.

References

1. *Zavolzhskiy zavod gusenichnykh tyagachey* [Zavolzhs factory of caterpillar tractors]. Available at: <http://www.zzgt.ru>.
2. *Zavod vezdekhodnykh mashin* [Factory of all-terrain vehicles]. Available at: <http://www.zvm-nn.ru>.
3. *Zavod transportnykh mashin OOO «TransMash»* [Transport vehicle factory "TransMash" Ltd.]. Available at: <http://www.transmashnn.ru>.
4. Afanas'ev B. A., Belousov B. N., Zheglov L. F. et al. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin: uchebnik dlya vuzov: v 3 t.* [Design of AWD vehicles: textbook for universities: in 3 volumes]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2008, vol. 3, 432 p.
5. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experiment planning at searching the optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 280 p.
6. Belyaev M. V., Vysotskiy M. S., Gileles L. Kh. *Avtomobili: Ispytaniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Automobiles: Testing: tutorial for universities]. Minsk: Vysshaya shkola, 1991, 187 p.
7. Yashcheritsyn P. I., Makharinskiy E. I. *Planirovanie eksperimenta v mashinostroyeni* [Experiment planning in machine building]. Minsk: Vysshaya shkola, 1985, 288 p.

Вашурин Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра автомобилей и тракторов, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

E-mail: andreyctg@gmail.com

Vashurin Andrey Sergeevich

Candidate of engineering sciences, senior lecturer, sub-department of automobiles and tractors, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Y. Alekseev (24 Minina street, Nizhny Novgorod, Russia)

Орлов Лев Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобилей и тракторов, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

E-mail: ait.ngtu@gmail.com

Orlov Lev Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of automobiles and tractors, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Y. Alekseev (24 Minina street, Nizhny Novgorod, Russia)

УДК 629.373

Вашурин, А. С.

Прочность корпусов гусеничных машин / А. С. Вашурин, Л. Н. Орлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 205–217.