

УДК 621.791.725

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ИЗ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

¹Гоц А.Н., ²Гусев Д.С., ¹Гуськов В.Ф., ¹Люхтер А.Б.

¹ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: hotz@mail.ru;

²ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, e-mail: gusev@laser33.ru

В статье предложена методика расчета на долговечность алюминиевых панелей, соединенных со стальным каркасом лазерной сваркой с учетом остаточных напряжений, возникающих при сварке, а также под действием инерционных нагрузок, возникающих при ускорении и торможении транспортного средства во время движения по дорогам общего пользования. В предложенной блок-схеме предлагаемой методики описан процесс расчета от выбора способа соединения алюминиевых панелей со стальным каркасом до прогнозирования долговечности конструкции. При выборе типа соединения показано, что при соединении лазерной сваркой облицовочных алюминиевых панелей со стальным каркасом возникают минимальные остаточные напряжения, что повышает долговечность конструкции. На контрольных образцах проведены исследования температурных полей для уточнения граничных условий движущегося источника теплоты, а также прочностных характеристик сварных соединений, что позволило провести расчет методом конечных элементов теплового напряженно-деформированного состояния контрольных образцов после сварки. Параллельно проводилось экспериментальное определение деформации листов в процессе сварки. Полученные результаты численного расчета на контрольных образцах теплового напряженно-деформированного состояния после проверки перенесены на сварную конструкцию. Для расчета напряженно-деформированного состояния составной конструкции в эксплуатации проводилось измерение ускорения транспортного средства при торможении и ускорении во время движения по дорогам общего пользования. Так как нагружение кузовов транспортного средства инерционными силами является случайным, то в расчетах реальный характер изменения ускорения от начала движения до остановки заменяется схематизированным. Полученные исходные данные позволяют провести расчет на долговечность элементов кузовов транспортного средства на действие переменного нагружения инерционными силами с использованием, например, гипотезы Кортена – Долана.

Ключевые слова: алюминиевая панель, стальной каркас, лазерная сварка, температурное поле, граничные условия, амплитудное напряжение, эквивалентные напряжения, долговечность

METHOD OF CALCULATION OF THE DURABILITY OF THE CONSTITUENT ELEMENTS OF VEHICLE BODIES MADE OF STEEL AND ALUMINUM ALLOYS

¹Gots A.N., ²Gusev D.S., ¹Guskov V.F., ¹Lyukhter A.B.

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, e-mail: hotz@mail.ru;

²EC at VSU LLC, Vladimir, e-mail: gusev@laser33.ru

The article proposes a method of calculating the durability of aluminum panels connected to the steel frame by laser welding, taking into account the residual stresses arising during welding, as well as under the influence of inertial loads arising during acceleration and braking of the vehicle while driving on public roads. The proposed block diagram of the proposed method describes the calculation process from the choice of the method of connecting aluminum panels with a steel frame to predict the durability of the structure. When choosing the type of connection, it is shown that when laser welding of facing aluminum panels with a steel frame, minimal residual stresses occur, which increases the durability of the structure. The temperature fields were studied on the control samples to clarify the boundary conditions of the moving heat source, as well as the strength characteristics of the welded joints, which allowed the finite element calculation of the thermal stress-strain state of the control samples after welding. In parallel, the experimental determination of deformation of sheets during welding was carried out. The results of the numerical calculation on the control samples of the thermal stress-strain state after the test were transferred to the welded structure. To calculate the stress-strain state of a composite structure in operation, the vehicle acceleration during braking and acceleration while driving on public roads was measured. Since the loading of the vehicle bodies by inertial forces is accidental, the real character of the acceleration change from the beginning of the movement to the stop is replaced by a schematized one in the calculations. The initial data allow us to calculate the longevity of the body components of the vehicle on the effect of variable loading inertia forces using, for example, hypotheses Korten-Dolan.

Keywords: aluminum panel, steel frame, laser welding, temperature field, boundary conditions, amplitude stress, equivalent stress, durability

Для снижения массы транспортных средств (легковые автомобили, автобусы) с целью обеспечения максимального запаса хода их в городском режиме при полной заправке используются новые материалы, а также легкие металлы, такие как алюми-

ний и магний, составляющие в сумме около 50% всей снаряженной массы автомобилей [1]. Кроме того, стальной облицовочный материал заменяется на алюминиевые листы, которые закрепляются на каркасах из стального металлопроката, что уменьша-

ет собственную массу автомобиля, а также к снижению расхода топлива эксплуатационных расходов при обеспечении прочности элементов конструкции при действии эксплуатационных нагрузок [2].

Соединение алюминиевых панелей на стальном каркасе в современном производстве автобусов и легковых автомобилей осуществляется либо с помощью различного рода клеев или сваркой. При последнем способе соединения происходит нагрев соединяемых деталей, что приводит к появлению в них остаточных напряжений после остывания [3–5]. Даже если в эксплуатации облицовка кузова испытывает переменные напряжения невысокого уровня от действующих нагрузок, то влияние остаточных напряжений в сварных соединениях на пределы выносливости оказывается высоким [6, 7]. В связи с этим проблема повышения надежности элементов кузова транспортных средств, состоящих из листов алюминиевых сплавов, сваренных на каркасе из стали, прогнозирование ее долговечности является актуальной задачей.

Цель исследования: разработка методики расчета на долговечность элементов кузовов транспортных средств со сварными соединениями из стали и алюминиевых сплавов, что позволит прогнозировать их надежность в эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является долговечность сварных составных элементов кузовов транспортных средств из стали и алюминиевых сплавов под действием инерционных нагрузок при эксплуатации с учетом остаточных напряжений в соединении после сварки. В качестве предмета исследования принята опытная крышка смотрового люка отсека силовой установки электробуса Волгабас 5270Е.

Основные положения предлагаемой методики расчета на долговечность составных элементов кузовов из стали и алюминия, работающих под действием инерционных нагрузок при наличии остаточных напряжений, которые возникают в конструкции после сварки стального каркаса с алюминиевым листом, представлены в виде блок-схемы на рис. 1.

Численные методы расчета проводятся с использованием метода конечных элементов (МКЭ), и для всей конструкции конечно-элементная модель (КЭМ) должна быть достаточно громоздкой, так как состоит из значительного количества элементов и узлов, что скажется на эффективности расчета. Поэтому отработка методики проводится на контрольных образцах (рис. 2), а результаты этого исследования будут перенесены на реальную конструкцию.

После выбора способа соединения листов из алюминия со стальным каркасом для элементов конструкции на контрольных образцах проводится его экспериментальная отработка. В нашем случае в качестве способа соединения была выбрана лазерная сварка [8].

Рассмотрим исследования, проводимые в соответствии с блок-схемой на рис. 1.

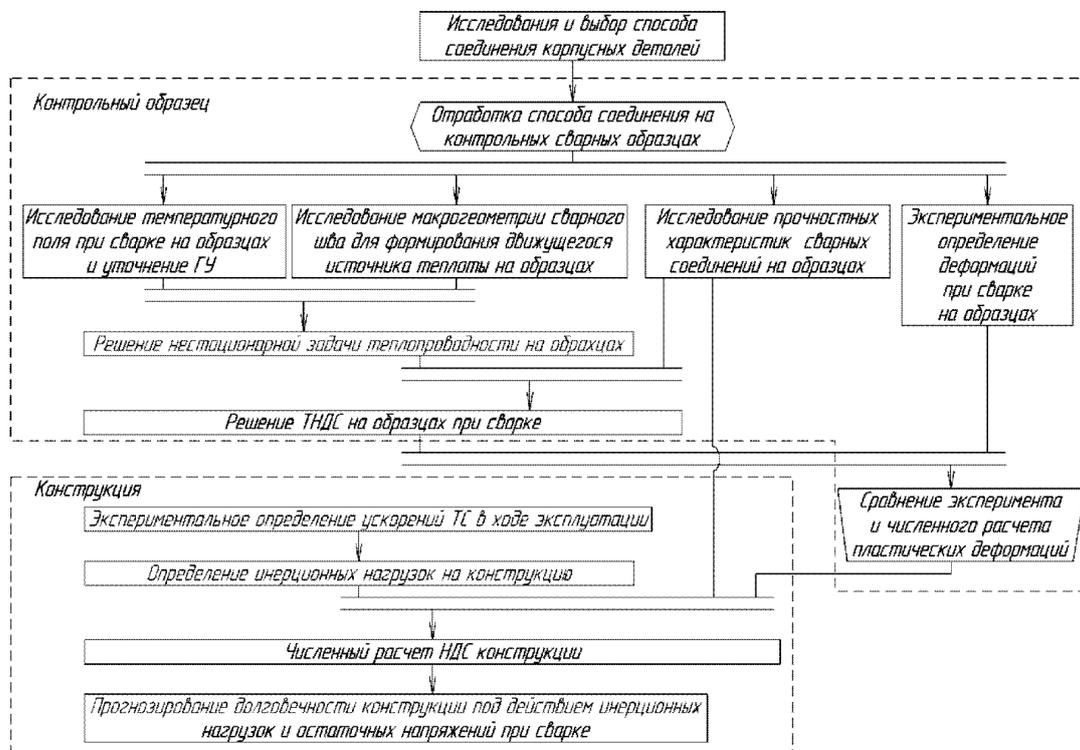


Рис. 1. Блок-схема методики прогнозирования долговечности сварных элементов кузова

При сварке температурное поле в окрестностях сварного шва регистрируется хромель-алюмелевыми термопарами, что позволяет выбрать способ сварки с наименьшим тепловым потоком, а также для формирования начальных и граничных условий теплообмена с целью проверки сходимости расчетных и экспериментальных температур при решении нестационарной задачи теплопроводности в процессе лазерной сварки [9].

Для определения геометрии сварочной ванны и ее влияния на остаточные напряжения изготавливаются макрошлифы сварных соединений из сварных образцов, что позволяет определить объем сварочной ванны, а также характер передачи теплоты при движении лазерного луча [9]. В объеме сварочной ванны из-за воздействия лазерного луча за время сварки происходит перемешивание металлов, что позволяет принять температуру расплава равной температуре плавления стали. Такая формализация источника теплоты упрощает задание начальных и граничных условий теплообмена в процессе сварки. Расчет температурных полей в процессе лазерной сварки стальных и алюминиевых листов внахлест более подробно рассмотрен в работе [9].

Для исследования прочности сварных соединений и уточнения ГУ в качестве объекта исследования принят контрольный сварной образец (рис. 2), полученный лазерной сваркой по разработанному способу и состоящий из двух стальных и двух алюминиевых пластин, соединенных четырьмя сварными швами (прямолинейными или кольцевыми). Длина рабочей части образца составляет $l_0 = 120$ мм, ширина рабочей части образца $b = 30 \pm 0,5$ мм, согласно ГОСТ 6996-66.

Для определения временного сопротивления σ_v контрольные сварные образцы были испытаны по ГОСТ 6996-66 при статическом растяжении на разрывной машине WDW-100E, скорость нагружения составляла 5 мм/мин (что составляло в ходе экспериментов рост напряжения не более 6 МПа/с, а по ГОСТ 1497-84 для цветных металлов допускается его рост от 1 до 10 МПа/с) [10].

На контрольных образцах экспериментально проводится измерение деформации под действием тепловой нагрузки при сварке, например, с помощью рычажного тензометра.

После проведения указанных выше исследований и уточнения ГУ, решается задача нестационарной теплопроводности, а также проводится расчет МКЭ теплового напряженно-деформированного состояния МКЭ на контрольных образцах с определением величины остаточных напряжений, возникающих после процесса сварки [2].

Для оценки достоверности полученных результатов значение остаточных напряжений после численного расчета МКЭ сравнивается с результатами эксперимента, а результаты численного расчета на контрольных образцах – с результатами расчета МКЭ части конструкции.

В эксплуатации на кузовах транспортного средства (ТС) действуют различные силы [11, 12]. Так как в качестве предмета исследования принята опытная крышка смотрового люка отсека силовой установки электробуса Волгабас 5270Е, то основной нагрузкой на него являются силы инерции, возникающие при ускорении и торможении ТС. Экспериментальное определение ускорений ТС в ходе эксплуатации и определение инерционных нагрузок на элементы кузовов рассмотрено в нашей работе [2].

После проведения указанных выше операций проводится численный расчет НДС конструкции с вычислением эквивалентных напряжений [13].

Поскольку в нашем случае имеем сложное напряженное состояние, то при вычислении эквивалентного напряжения [2] вклад величины остаточных напряжений в усталостную долговечность в соответствии с рекомендациями И.А. Биргера [14] следует учесть путем добавления их к наибольшему постоянному напряжению цикла [2].

По результатам численных расчетов МКЭ проводится расчет надежности и прогнозирование долговечности по гипотезе Кортена – Долана [14, 15]:

$$(N_g)_f = \frac{N_1}{\alpha_1 + \alpha_2 (\sigma_2/\sigma_1)^d + \alpha_3 (\sigma_3/\sigma_1)^d + \dots + \alpha_n (\sigma_n/\sigma_1)^d}, \quad (1)$$

где $(N_g)_f$ – общее число циклов до разрушения в условиях действия напряжений с изменяющейся амплитудой; d – постоянная материала (для алюминиевого сплава $d_{\text{сп.ал}} = 6$); N_1 – число циклов до разрушения при действии напряжений с наибольшей амплитудой σ_1 ($N_1 = 100000$, для малоциклового нагружения); $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – относительные доли числа циклов нагружений с амплитудами $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, соответственно.

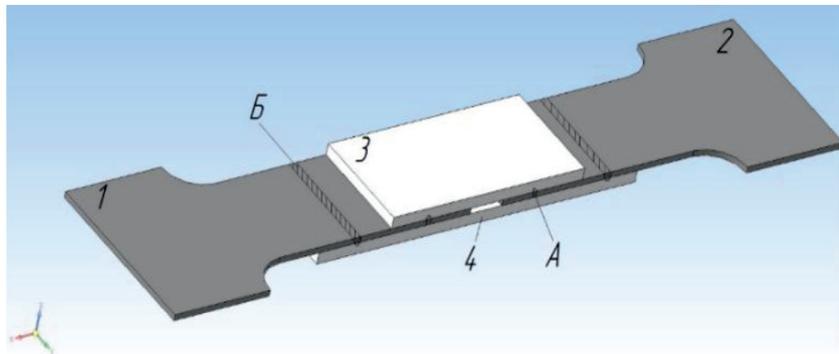


Рис. 2. Контрольный сварной образец: 1 и 2 – листы стали 20 толщиной 1,5 мм; 3 и 4 – листы алюминиевого сплава АМг2М толщиной 3,0 мм; А и В – места сварных соединений

Как отмечается в [15], во многих практических приложениях напряжения меняются квазислучайно, сумма вероятностей возникновения этих напряжений может изменяться от 0,6 до 1,6, т.е. в знаменателе

формулы (1) $\sum_{i=1}^n \alpha_n = 0,6 \dots 1,6$, что следует учитывать при прогнозировании нагружения автобусов от действия инерционных нагрузок.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований были изготовлены серии контрольных сварных образцов с целью определения временного сопротивления сварных соединений $\sigma_{sv.sh}$ и коэффициент ослабления прочности сварного соединения $k = \sigma_{sv.sh} / \sigma$ относительно основного материала. Поскольку разрушение контрольных сварных образцов происходило путем смятия сварных соединений в зоне термического влияния (ЗТВ) алюминиевого листа от нормальных напряжений, в качестве σ применяется временное сопротивление смятию алюминиевого сплава равное 270 МПа. Граница смятия в поперечном сечении определялась по макрошлифам сварных соединений. Результаты механических испытаний приведены в таблице.

Определение расчетных остаточных напряжений в зоне термического влияния алюминиевых листов для контрольных сварных образцов исходило из следующих предположений. После нагрева в ходе лазерной сварки высокую прочность и пластичность алюминиевые сплавы приобретают при температуре ниже 300 °С. Начиная с данной температуры начинает формироваться значительная часть остаточных напряжений.

Расчетное температурное поле, полученное путем решения уравнений нестационарной теплопроводности с использованием модифицированной модели сварочной ванны на стадии остывания, для задачи ТНДС в сварочном шве должно соответ-

ствовать началу формирования твердых фаз и остаточных напряжений, т.е. 300 °С.

Применяя метод переменных параметров упругости И.А. Биргера [14], определяется ТНДС в КЭ исследуемой области для расчетного температурного поля в упруго-пластической постановке с использованием свойств материалов (модуля упругости E), характерных для принятой в расчете температуры. Расчет ТНДС контрольных сварных образцов проводился с использованием программы Solidworks Simulation в упруго-пластической постановке с использованием критерия пластичности Мизеса.

Распределение эквивалентных напряжений в ЗТВ алюминиевого листа по длине прямолинейного и кольцевого сварных швов [8] в расчетной точке приведено на рис. 3, которое позволяет получить необходимые данные для расчета остаточных напряжений $\sigma_{ост}^{(300)}$ в расчетной точке:

$$\sigma_{ост}^{(300)} = \sigma_{экр}^{(300)} - \sigma_T^{(300)}, \quad (2)$$

где $\sigma_{экр}^{(300)}$ – эквивалентные напряжения, вычисленные МКЭ с учетом температуры 300 °С; $\sigma_T^{(300)}$ – предел текучести по справочным данным при температуре 300 °С.

Далее, используя обобщенные кривые деформирования при растяжении образцов для температур 300 °С и 20 °С, проводится расчет процесса теплового нагружения при остывании (ломаная линия ACB , рис. 4) с отысканием остаточных напряжений после остывания по формуле

$$\sigma_{ост}^{(20)} = \sigma_{ост}^{(300)} + (E_k^{(20)} - E_k^{(300)}) \cdot \epsilon_{экр}^{(300)} - \alpha \cdot \Delta T \cdot E_k^{(20)}, \quad (3)$$

где $\sigma_{ост}^{(20)}$ – остаточные напряжения при температуре 20 °С; $\sigma_{ост}^{(300)}$ – остаточные напряжения при температуре 300 °С; $E_k^{(20)}$ и $E_k^{(300)}$ – касательные модули упругости при температурах 20 °С и 300 °С соответственно [14]; $\epsilon_{экр}^{(300)}$ – эквивалентные деформации при температуре 300 °С; $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град – коэффициент линейного расширения алюминиевого сплава АМг2М; ΔT – перепад температур (280 °С).

Результаты механических испытаний контрольных сварных образцов

Тип шва	Мощность лазерного излучения P , Вт	Скорость сварки v , мм/с	Усилие разрушения $P_{max.sp}$, кН	Начальная площадь поперечного сечения F_0 , мм ²	Временное сопротивление $\sigma_{sv.sh}$, МПа	k
Прямолинейный	2900	18	8,09	51,22	158,19 ± 14,27	0,59
	2900	20	7,56	47,72	157,94 ± 5,61	0,58
	3000	18	8,03	33,04	242,99 ± 19,68	0,90
	3000	20	8,12	36,65	221,59 ± 9,52	0,82
Кольцевой	2900	20	8,99	51,04	176,09 ± 7,90	0,65
	2900	22	8,11	45,73	177,39 ± 4,73	0,66
	3000	20	12,57	49,80	252,42 ± 7,30	0,93
	3000	22	10,03	52,05	192,70 ± 3,16	0,71

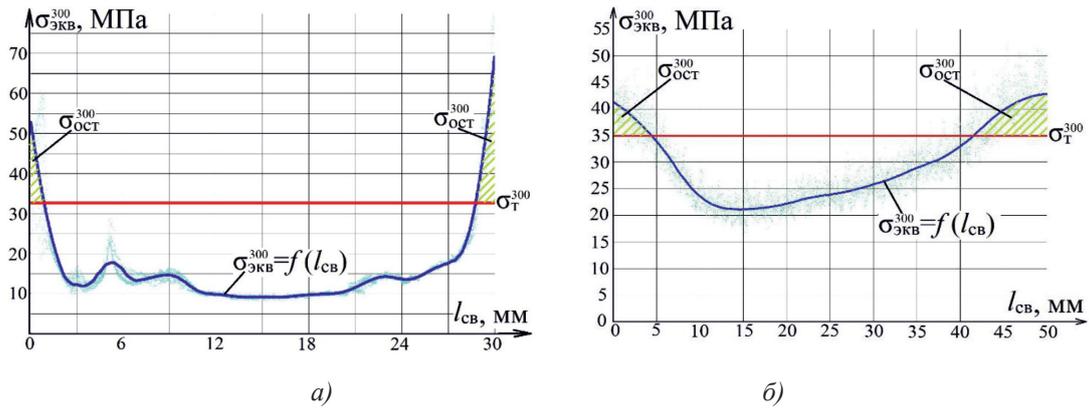


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в ЗТВ алюминиевого листа в расчетной точке по длине: а – прямолинейного; б – кольцевого сварных швов

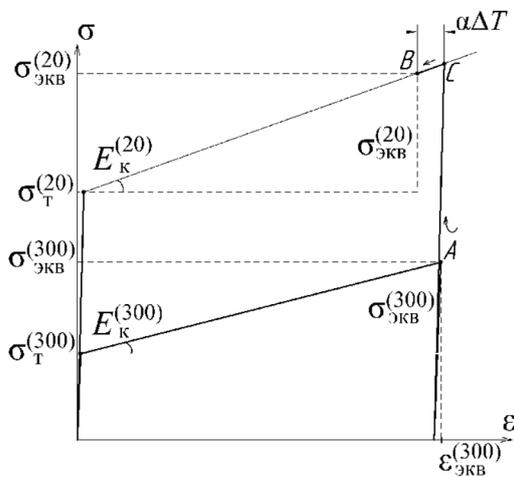


Рис. 4. К определению пластических деформаций на стадии остывания

Подставив в формулу (3) вычисленные и справочные известные величины, остаточные напряжения в зоне термического влияния алюминиевого листа для прямолинейного сварного шва составили 47,26 МПа, для кольцевого шва – 28,54 МПа.

Сравнение результатов расчета остаточных напряжений проводилось на облицовочной поверхности алюминиевого листа, где может быть установлен тензометр Гугенбергера, поскольку определение деформаций в ЗТВ алюминиевого листа не представляется возможным (рис. 5). Результаты экспериментального определения деформаций приведены на рис. 6. Расчетное значение остаточных напряжений по формуле (2) составляет – 6,87 МПа, что хорошо согласуется с величиной остаточных напряжений, полученных экспериментально на облицовочной поверхности алюминия:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ост.эксп}} &= \epsilon_{\text{эксп}} \cdot E = -0,000075 \cdot 71000 = \\ &= 5,325 \pm 1,8 \text{ МПа.} \end{aligned} \quad (4)$$



Рис. 5. Стенд для определения деформаций с использованием тензометра Гугенбергера (а) и результаты измерения (б): 1 – стальной лист Ст20, 2 – лист алюминиевого сплава АМг2М; 3 – тензометр Гугенбергера; 4 – сварное соединение

Последним этапом методики является расчет долговечности по гипотезе Кортена – Долана по формуле (1):

$$(N_g)_f = \frac{100000}{0,030220296} = 3309034,$$

где $\sum_{i=1}^n \alpha_n = 1,6$, напряжения $\sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$

соответствуют амплитуде интенсивности напряжений σ_{ia} в [2] с вероятностями α_n , соответствующими частоте появления каждой группы циклов во время регистрации ускорений ТС, $\sigma_{v,Al} = 192$ МПа, $\sigma_1 = \sigma_{-1}^{os} \cdot k = (0,8 \cdot \sigma_{-1}^{iz}) \cdot k = 0,8 \cdot (0,3 \cdot \sigma_{v,Al}) \cdot k = 41,47$ МПа.

Полученное значение циклов соответствует 20,77 лет эксплуатации при нормативном сроке в 7 лет.

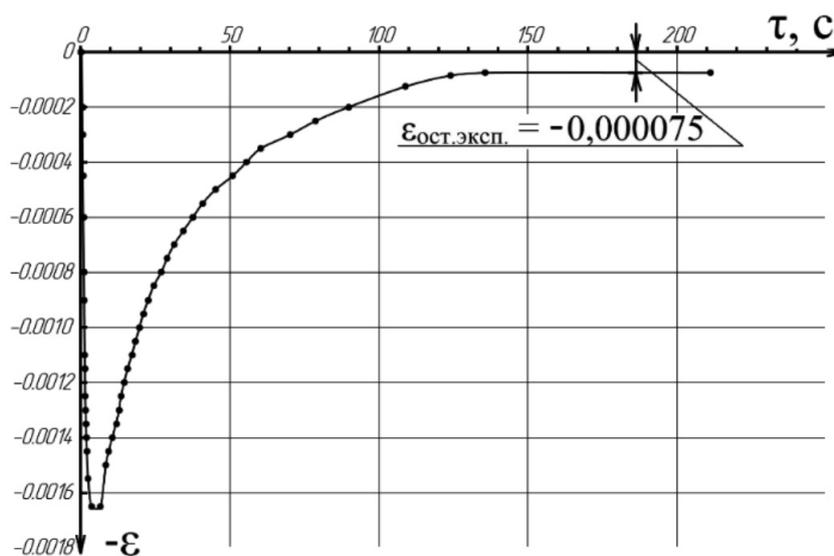


Рис. 6. Результаты замеров деформации при сварке: $\varepsilon_{\text{ост.экср}}$ — величина остаточных пластических деформаций (знак «-» соответствует сжатию образцов в месте измерения)

Заключение

В статье предложена методика расчета на долговечность алюминиевых панелей, соединенных со стальным каркасом лазерной сваркой. Рассмотрен выбор граничных условий для теплового напряженно-деформированного состояния при сварке, что позволяет корректно определить остаточные напряжения, возникающие при этом. Полный расчет предлагается под действием инерционных нагрузок, возникающих при ускорении и торможении транспортного средства во время движения по дорогам общего пользования. Полученные исходные данные позволяют провести расчет на долговечность элементов кузовов транспортного средства на действие переменного нагружения инерционными силами с использованием с учетом влияния остаточных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0158 от 28 ноября 2014 г. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEF157714X0158.

Список литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. Колесные и гусеничные машины. Т. IV-15 / В.Ф. Платонов, В.С. Азаев, Е.Б. Александров и др. Под общ. ред. В.Ф. Платонова. М.: Машиностроение. 1997. 688 с.
2. Гоц А.Н., Гусев Д.С., Гуськов В.Ф., Люхтер А.Б. Расчет на прочность элементов кузовов автобусов от действия инерционных нагрузок // Современные наукоемкие технологии, 2019. № 6. С. 39–44.
3. Навроцкий Д.И. Расчет сварных конструкций с учетом концентрации напряжений. М.: Машиностроение, 1968. 170 с.

4. Зарезин В.Е. Повышение ресурса соединений сварных узлов и конструкций железнодорожной техники // Технические проблемы сервиса. 2015. № 4. Т. 34. С. 26–29.

5. Петин С.В. Строительные конструкции зданий и сооружений. Эксплуатационная надежность металлических конструкций: учеб. пособие СПб.: Изд-во Политехнического. ун-та, 2013. 219 с.

6. Десярев В.А. Прогнозирование предельных амплитуд цикла напряжений сварных соединений с установившимися остаточными напряжениями // Автоматическая сварка. 2016. № 10. Т. 757. С. 16–21.

7. Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Европин С.В. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Часть 2. Численное статистическое моделирование // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2013. № 11. С. 3–11.

8. Шлегель А.Н., Люхтер А.Б., Кононов В.А., Валуйских В.П., Гусев Д.С. Способ лазерной сварки внахлест листов конструкционной стали и сплавов алюминия. Патент РФ № 2638267. Патентообладатель ФГБОУВО ВлГУ. 2017. Бюл. № 35.

9. Гоц А.Н., Гусев Д.С., Гуськов В.Ф., Люхтер А.Б. Расчет температурных полей в процессе лазерной сварки стальных и алюминиевых листов внахлест // Современные наукоемкие технологии, 2019. № 2. С. 32–37.

10. Люхтер А.Б., Шлегель А.Н., Леонтьев А.А., Гусев Д.С. Результаты механических испытаний корпусных элементов автобусов, полученных лазерной сваркой стального профиля Ст3 с алюминиевой облицовкой АМг2М // Цветные металлы. 2017. № 10. С. 85–89.

11. Селифонов В.В., Хусаинов А.Ш., Ломакин В.В. Теория автомобиля: учеб. пособие. М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 102 с.

12. Савкин А., Горобцов А., Андроник А. Оценка прочности и усталостной долговечности конструктивных элементов автомобиля // САПР и графика, 2012. № 8. С. 93–96.

13. Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Шиверский Е.А. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 2. Численное статистическое моделирование // Известия высших учебных заведений. МАШИНОСТРОЕНИЕ. 2013. № 12. С. 10–18.

14. Биргер И.А. Детерминированные и статистические модели долговечности / Проблемы прочности летательных аппаратов: сб. стат. / Под ред. И.Ф. Образцова, А.С. Вольмира. М.: Машиностроение, 1985. С. 105–150.

15. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. Под ред. Э.И. Григолюка. М.: Мир, 1984. 624 с.