

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2020-10-22-29>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ АВТОМОБИЛЬНОГО СТЕКЛА

*Мурзаева И.В., Носов Н.В., Якубович Е.А.*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, упруго-пластическая модель, установка стекла, сборка, размерный анализ, триплекс, кузов.

**Аннотация.** В статье выполнен анализ особенностей формирования остаточных напряжений в процессе установки автомобильного стекла с учетом отклонений геометрии и возникающей неравномерности зазора по периметру стекла при сборке. В результате моделирования процесса сборки средствами САД/САЕ получены количественные оценки и установлено распределение остаточных напряжений в стекле. На основании проведенных расчетов можно сделать выводы о влиянии точности формы элементов сборочного узла на уровень результирующих остаточных напряжений и прочность стекла.

## RESEARCH OF THE RESIDUAL STRESSES FORMING AT ASSEMBLING OF AUTOMOTIVE GLASS

*Murzaeva I.V., Nosov N.V., Yakubovich E.A.*

**Keywords:** residual stresses, elastic-plastic model, glass installation, assembly, dimensional analysis, triplex, body.

**Abstract.** The article analyzes the features of the formation of residual stresses during the installation of automotive glass, taking into account geometry deviations and the resulting uneven formation of a gap around the glass perimeter during assembly. Based on the simulation of the assembly process using CAD / CAE, quantitative estimates were obtained and the distribution of residual stresses in the glass was established. The results are obtained that can be used to draw conclusions about the influence of the accuracy of the assembly elements shape on the level of the resulting residual stresses and the strength of the glass.

Широкий круг весьма актуальных для современного автомобилестроения проблем характеризуется высоким уровнем сложности и глубокой спецификой, порождаемой, в частности, необходимостью неуклонного обеспечения качества и снижения дефектности выпускаемых автомобилей [1,2]. Отмеченное в полной мере относится к комплексу вопросов, связанных с исследованием проблем дефектности при установке стекол, обеспечивающих не только хороший обзор, но и безопасность водителя и пассажиров. Современные методы и технологии создания неразъемных соединений стекла с кузовом с помощью клеевых технологий, обеспечивающие их взаимное расположение в пределах заданной точности, улучшают герметичность, жесткость кузова и дизайн автомобиля [3-5].

В работах [6-8] получен ряд ценных для практики результатов в части оценки качества и оптимизации контроля остаточных напряжений в автомобильных стеклах, совокупность которых можно охарактеризовать как существенное развитие технологических возможностей производства. Тем не менее остаются недостаточно исследованы вопросы, связанные с количественной оценкой влияния отклонений геометрии стекла, клеевого шва, неравномерности зазора между стеклом и кузовом на уровень и характер

распределения остаточных напряжений в установленной стекле. В настоящей работе рассматриваются некоторые результаты исследований в указанном направлении.

Для проверки соответствия геометрии стекла заданной в чертеже, на входном контроле АО «АВТОВАЗ» стекла в количестве не более 1% от числа партии проходят проверку на калибре (рис. 1). Форма и размеры плоских и гнутых изделий из стекла определяются по контрольному шаблону максимального контура, имеющему по периметру опорную поверхность шириной 10-15 мм, форма которой должна соответствовать форме изделия, указанной в чертеже.

Величина зазоров по контуру между опорной поверхностью шаблона и стекла не должна превышать заданное значение в чертеже (не более 2 мм) при соблюдении плавности перехода поверхностей.



Рис. 1. Калибр для проверки геометрии стекла

Анализ распределения отклонений по контрольным точкам по контуру стекла показывает, что максимальное отклонение от шаблона составляет не более 0,2 мм.

Геометрическая точность автомобильного стекла зависит в первую очередь от технологии изготовления. Известно, что деформация стекла связана с процессом образования при их изготовлении остаточных напряжений [9]. Возникновение избыточных остаточных напряжений в стекле приводит к разрушению стекла иногда без дополнительных механических воздействий, к которым относятся: соединение стекла с проемом в кузове и влияние рабочих нагрузок при эксплуатации автомобиля.

Основные технические требования для безопасного стекла типа триплекс изложены в ГОСТ 5727-88 [10]. Допустимая величина остаточных напряжений сжатия в стекле триплекс после изготовления при равномерном распределении вдоль всей кромки изделия не должна превышать 10 МПа. При этом остаточные напряжения растяжения не допускаются.

Конструктивные подходы к вопросам компьютерного моделирования остаточных напряжений приведены в [11]. С помощью препроцессора *Patran* и процессора *Marc* поставлена и решена упруго – пластическая нелинейная задача, моделирующая процесс соединения двух листов в один пакет (триплекс). При этом один из листов намеренно имеет отклонение по

геометрии, а именно отклонение по кривизне  $\pm 0,5$  мм. Цель поставленной задачи заключается в выявлении возникновения избыточных внутренних напряжений, которые впоследствии можно назвать остаточными [12]. В качестве ограничения принято, что допустимое значение сжимающих остаточных напряжений в кромках ветрового стекла должно быть не более 10 МПа и располагаться в зоне кромки шириной 20-50 мм. Переход от зоны напряжений сжатия к нейтральной зоне должен быть постепенным, а поверхность изделия вне указанных зон должна быть свободной от напряжений. При соединении основным контролируемым показателем по напряженному состоянию стекла является предел прочности при растяжении.

Рассмотрим два предельных случая. В первом случае при отклонении формы двух листов стекол ( $- 0,5$  мм), определяемом по стреле прогиба на расстоянии 35-50 мм от края стекла, возникли остаточные напряжения растяжения величиной  $\sigma_{\max} = 58,2$  МПа.

По величине полученных остаточных напряжений можно сделать вывод, что эти значения приближаются к пределу прочности стекла при растяжении, особенно на его боковых сторонах. Это означает, что при увеличении нагрузки в процессе соединения двух стекол возникнут внутренние напряжения, превышающие предельно допустимое значение.

Во втором случае при отклонении геометрии формы двух стекол по стреле прогиба ( $+ 0,5$  мм) основным показателем по напряженному состоянию стекла будет предел прочности при сжатии, т.к. основными здесь будут сжимающие усилия. В стекле, имеющем отклонение геометрии поверхности, в зоне, расположенной на кромке стекла на расстоянии 35-50 мм и в середине, появилось внутреннее сжимающее напряжение величиной  $\sigma_{\max} = - 9,08$  МПа (рис. 2).

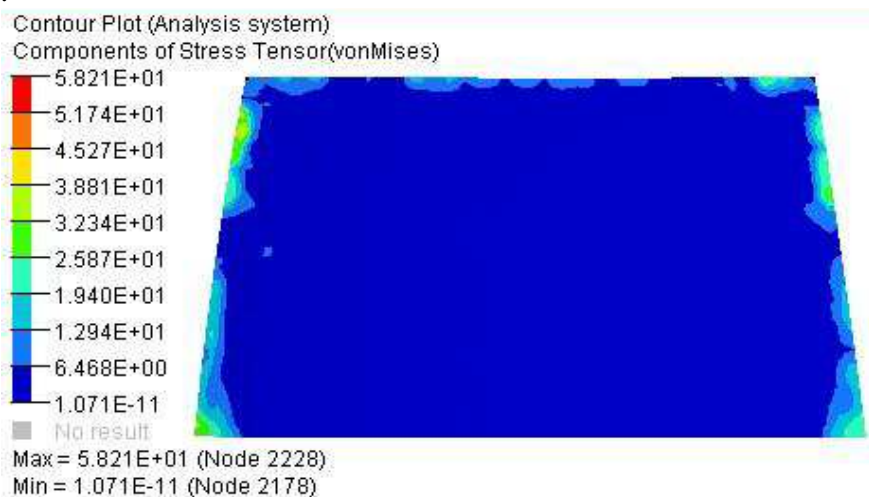


Рис. 2. Распределение напряжений и отклонение геометрии в триплексе после изготовления со стрелой прогиба ( $+ 0,5$  мм)

Из приведенных данных видно, что предельных остаточных напряжений растяжений в стекле нет (зоны красного цвета). Величина появившихся

остаточных напряжений сжатия далека от предельного значения предела прочности при сжатии и укладывается в норму по величине остаточных напряжений при сжатии – 10 МПа. В данном случае величина напряжений не является критической. Таким образом, заложенное отклонение поперечной кривизны + 0,5 мм одного из стекол (в данном расчете рассматривалось верхнее в пакете) является допустимым при изготовлении стекла типа триплекс.

При соединении стекла с проемом в кузове с возможны различные варианты комплектации составляющих элементов. Есть вероятность попадания в сборочную пару стекла без отклонения размеров и поверхности кузова с допускаемым отклонением формы в минимальную или максимальную сторону.

Определим суммарный допуск поверхности кузова по отношению к системным базам. Для этого составлена расчетная схема по размерному анализу [13,14]. При рассмотрении требований, указанных в чертеже, можно при проведении размерного анализа рассчитать максимальное значение зазора между стеклом и кузовом. Расчетное значение допуска зазора в рассматриваемом варианте не превышает 1,8 мм.

Далее необходимо подтвердить полученные данные размерного анализа по требованиям чертежа фактическими размерами и полем рассеяния действительного размера.

После построения математической геометрической модели кузова в сборе можно проследить поле рассеяния действительного размера зазора между стеклом и кузовом  $S_{\text{дейст.}}$  и сравнить эту величину с допустимым значением зазора между стеклом и фланцем кузова  $S_{\text{доп.}} = 2$  мм.

По техническим требованиям есть ограничение по перемещению стекла вдоль одной оси  $Z$  и за счет регулирующих прокладок – поворот вокруг другой оси, поэтому необходимо найти  $S_{\text{факт.}}$ . Проведено определение действительных размеров зазоров, полученных в режиме динамического сечения, установлена его неравномерность. Отклонение замерялось с помощью КИМ с выборкой 50 кузовов, с занесением результатов в карту замера. Допускаемое отклонение по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  составляет  $\pm 1,5$  мм. Установлено, что значение  $S_{\text{факт.}} = 1,811$  мм.

Полученный фактический допуск имеет величину соответствующую конструктивному допуску. При этом можно проследить места, имеющие наибольшее и наименьшее отклонение от требуемой величины. На рис. 3 показано распределение отклонения размера зазора и допуска по динамическим сечениям вдоль контура стекла. Среднестатистическое значение допуска размера зазора составляет 4,978 мм. Статистическая оценка результатов проводилась в программе Excel.

Динамический анализ размера зазоров после сборки позволяет сделать вывод о характере распределения величины зазора с учетом отклонения геометрии стекла и кузова. Отмечено скачкообразное изменение размеров в углах рамы окна, где происходит стыковка деталей: боковины, панели крыши, надставки окна.

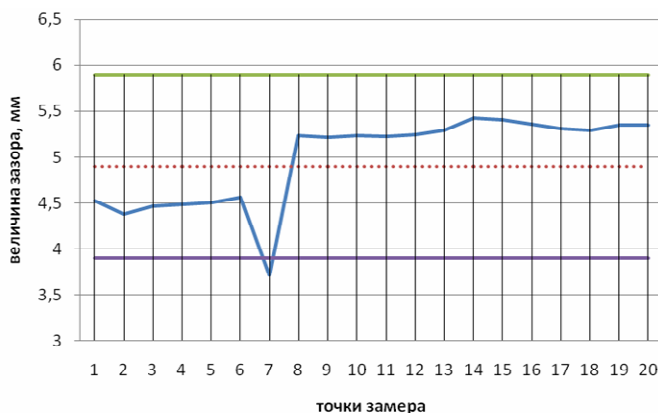


Рис. 3. Распределение величины зазора по контуру стекла

При сборке стекол зазор между стеклом и кузовом заполняется клеевым валиком [5]. До установки стекла валик клея имеет определенную форму и площадь поперечного сечения. После установки стекла в зависимости от приложенного усилия, размера стопорящих прокладок, величины отклонений геометрии проема и стекла формируется размер готового клеевого валика, который соответствует величине зазора между стеклом и кузовом. Применительно к сборке стекол необходимо обеспечить оптимальный объем клеевого валика, при котором будет достигнуто требуемое качество клеевого шва по всему периметру стекла.

Самостоятельный интерес представляет задача оценки влияния отклонения формы поверхности кузова на напряжения при сборке. С использованием расчетного пакета *Marc* смоделирована сборка стекла с кузовом, имеющим отклонение по оси  $Z = \pm 1,5$  мм по координате на кузове  $Y = 0$  (середина кузова), так что поверхность кузова становится более выпуклой или вогнутой посередине.

При моделировании отклонения поверхности кузова в программном комплексе *CatiaV5* в положительную сторону по оси  $Z$  на наружной поверхности стекла установлено возникновение напряжения растяжения (рис. 4), величина которых достигает  $\sigma_{\max} = 43,8$  МПа.

При моделировании отклонения поверхности кузова в отрицательную сторону по оси  $Z$  на внутренней стороне стекла возникают напряжения сжатия (рис. 5), что также влияет на прочность стекла при эксплуатации. Максимальное значение сжимающих напряжений при сборке равно  $\sigma_{\max} = -12,8$  МПа. При расчете учтено упругое поведение клеевого валика после сборки, поэтому после сборки смоделирована возвратная деформация стекла на величину упругой деформации клея, равной 1 мм.

Приведенная схема алгоритмически обоснованного подхода к оценке остаточных напряжений подтверждена экспериментальными данными.

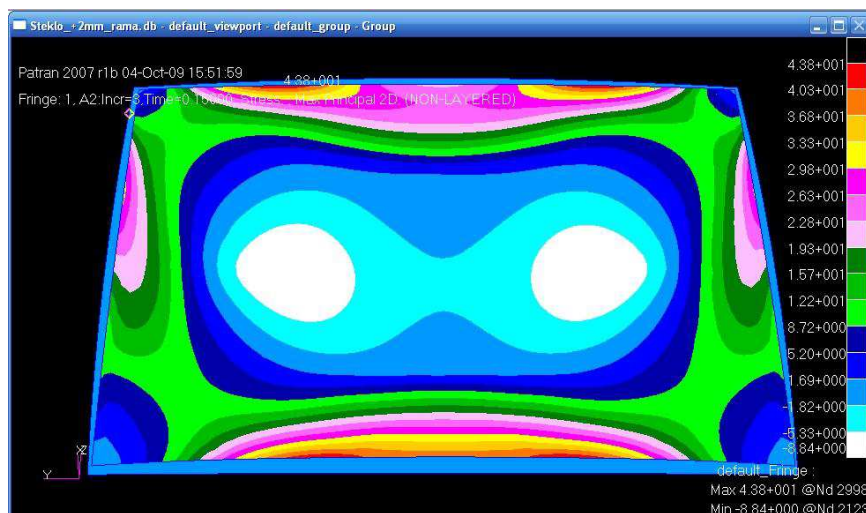


Рис. 4. Напряжения растяжения при сборке стекла и кузова с отклонением формы поверхности (по монтажному фланцу) по оси  $Z = +1,5$  мм ( $\sigma_{\max} = 43,8$  МПа)

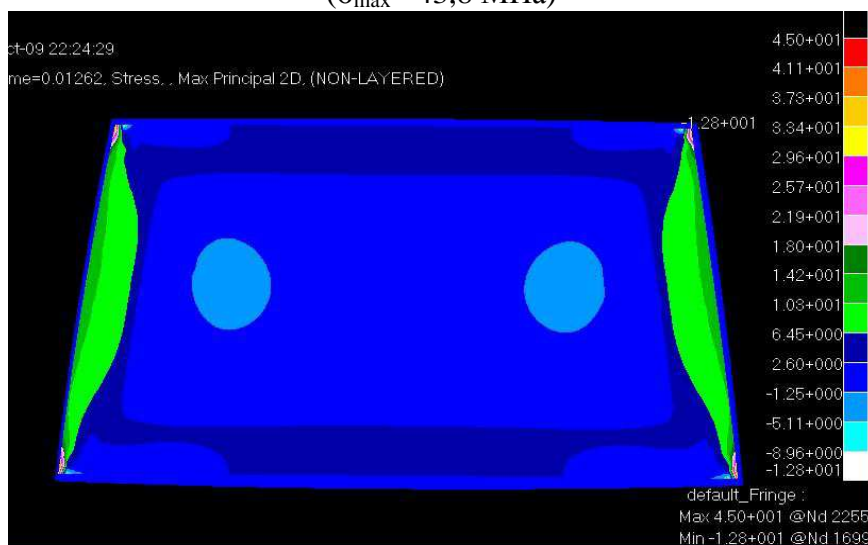


Рис. 5. Напряжения сжатия при сборке стекла с кузовом, имеющим отклонение формы поверхности по монтажному фланцу по оси  $Z = -1,5$  мм ( $\sigma_{\max} = -12,8$  МПа)

Таким образом, на основе проведенных расчетов сделан вывод о влиянии на возникновение результирующих остаточных напряжений в стекле точности формы элементов сборочного узла. Для расчета величины остаточных напряжений в стекле после установки необходимо дополнительно учесть процесс формирования клеевого шва в зависимости от точности собираемых деталей. Результаты моделирования и расчетов свидетельствуют о том, что основной причиной избыточных остаточных напряжений и саморазрушения стекла является отклонение геометрии поверхности стекол, входящих в пакет триплекс.

### **Список литературы**

1. Шторобель В.К. Современный автомобильный кузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264с.
2. Гурин Ф.В. Технология автомобилестроения. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
3. Паймушин В.Н., Фролов В.А. Оболочки из стекла. Расчет напряженно-деформированного состояния. – М.: Машиностроение, 1993. – 208с.
4. Мурзаева И.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния автомобильного стекла при сборке / И.В. Мурзаева, Н.В. Носов // Вестник СамГТУ, серия «Технические науки». 2007. № 20. С. 130-136.
5. Мурзаева И.В. Исследование прочности клеевого соединения автомобильных стекол / И.В. Мурзаева, В.Ю. Дружинин, В.А. Гуляев // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 2. С. 21-24.
6. Гуляев В.А. Повышение качества контроля стекол на основе автоматизированной системы для оценки остаточных напряжений: автореф. дисс. ... канд. техн. наук (05.13.06) / Гуляев Вадим Анатольевич. Тольятти, 2001. – 26 с.
7. Гуляев В.А. Контроль остаточных поверхностных напряжений в автомобильных стеклах / В.А. Гуляев, О.И. Драчев, О.К. Алексеев. – СПб.: Политехника, 1999. – 56 с.
8. Жилин А.А. Разработка системы автоматизированного бесконтактного контроля остаточных напряжений в изделиях из оптически активных материалов / А.А. Жилин, В.А. Гуляев // Вестник ТГУ. 2003. № 3. С. 195-198.
9. Поздеев А.А. Остаточные напряжения: теории и приложения / А.А. Поздеев, Ю.И. Няшин, П.В. Трусов. – М.: Наука, 1982. – 111с.
10. ГОСТ 5727-88. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2005. – 18 с.
11. Черепашков А.А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении. Учеб. для студ. высш. учеб. заведений / А.А.Черепашков, Н.В. Носов. – Волгоград: Изд-во «Ин-Фолио», 2009. – 640 с.
12. Паймушин В.Н. Оболочки из стекла. Расчет напряженно-деформированного состояния / В.Н. Паймушин, В.А. Фирсов. – М.: Машиностроение, 1993. – 208с.
13. Ашихмин В.Н. Выявление и расчет размерных цепей при размерном анализе технологических процессов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 57 с.
14. Справочник технолога / Под общей ред. А.Г. Суслова – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

### **References**

1. Storobel V.K. Modern automobile body. – M.: Mechanical Engineering, 1984. – 264 p.
2. Gurin F.V. Technology of automotive industry. – M.: Engineering, 1975. – 328p.

3. Paimushin V.N., Frolov V.A. Shell made of glass. Calculation of the stress-strain state. – М.: Engineering, 1993. – 208 p.
4. Murzaeva I.V. Modeling the stress-strain state of automobile glass during assembly / I.V. Murzaeva, N.V. Nosov // Bulletin of Samara State Technical University, series of "Technical Sciences". 2007. No. 20. P. 130-136.
5. Murzaeva I.V. Study of the strength of the adhesive bonding of automobile glasses / I.V. Murzaeva, V.Yu. Druzhinin, V.A. Gulyaev // Assembly in mechanical engineering, instrument making. 2008. No. 2. P. 21-24.
6. Gulyaev V.A. Improving the quality of glass control based on an automated system for assessing residual stresses: Extended abstract of diss. ... cand. Of tech. sc. – Togliatti, 2001. – 26 p.
7. Gulyaev V.A. Control of residual surface stresses in automobile glasses / V.A. Gulyaev, O.I. Drachev, O.K. Alekseev – St. Petersburg: Polytechnic, 1999. – 56 p.
8. Zhilin A.A. Development of a system of automated non-contact control of residual stresses in products from optically active materials / A.A. Zhilin, V.A. Gulyaev // Bulletin of TSU. 2003. No. 3. P.195-198.
9. Pozdeev A.A. Residual Stresses: Theories and Applications / A.A. Pozdeev, Yu.I. Nyashin, P.V. Trusov. – М.: Nauka, 1982. – 111 p.
10. GOST 5727-88. Safety glass for ground transportation. General specifications. – М.: Standartinform, 2005. – 18 p.
11. Cherepashkov A.A. Computer technologies, modeling and automated systems in mechanical engineering / A.A. Cherepashkov, N.V. Nosov. – Volgograd: In-Folio Publishing House, 2009. – 640 p.
12. Paimushin V.N. Shell made of glass. The calculation of the stress-strain state / V.N. Paimushin, V.A. Firsov. – М.: Mechanical Engineering, 1993. – 208 p.
13. Ashikhmin V.N. Identification and calculation of dimensional chains during dimensional analysis of technological processes / V.N. Ashikhmin – Yekaterinburg: UrFU, 2010. – 57 p.
14. Technologist handbook / Under general ed. A.G. Suslov – М.: Innovative engineering, 2019. – 800 p.

<b>Мурзаева Ирина Владимировна</b> – кандидат технических наук, инженер	<b>Murzaeva Irina Vladimirovna</b> – candidate of technical science, engineer
<b>Носов Николай Васильевич</b> – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»	<b>Nosov Nikolai Vasilievich</b> – doctor of technical science, professor, Department “Engineering Technology, Machine Tools and Tools”
<b>Якубович Ефим Абрамович</b> – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», eyakubovich@mail.ru	<b>Yakubovich Efim Abramovich</b> – candidate of technical science, professor, Department “Metal Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials”, eyakubovich@mail.ru
Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия	Samara state technical university, Samara, Russia

*Received 23.05.2020*