

УДК 620.178.15

Л. П. Вовк, д-р техн. наук, Е. С. Кисель, канд. физ.-мат. наук**Автомобильно-дорожный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
в г. Горловка****КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОВОГО СТЕКЛА
АВТОМОБИЛЯ**

Представлена эффективная конечно-элементная модель лобового стекла для систематических численных исследований на основе метода конечных элементов для изучения способности поглощения энергии и конструкции безопасности поливинилбутирального ламинированного ветрового стекла.

Ключевые слова: многослойное стекло, конечный элемент, численный анализ, математическое моделирование аварийных ситуаций

Постановка проблемы

Поливинилбутиральное (ПВБ) ламинированное лобовое стекло является предпочтительным материалом для современных автомобильных лобовых стекол [1] с определенной степенью ударопрочности и характеристиками поглощения энергии. Эти свойства ПВБ стекла могут уменьшить последствия дорожно-транспортных происшествий. Корреляционный анализ показывает, что столкновения между головой и лобовым стеклом являются основной причиной травматизма и гибели участников дорожного движения [2].

Многослойное стекло состоит из нескольких слоев стекла, скрепленных мягкой полимерной прослойкой. Очень мягкая прослойка полимерного материала не проскальзывает между слоями стекла, сгибаясь параллельно стеклу под действием напряжения сдвига. Напряжение сдвига прослойки нарушает принцип прямых нормалей, остающихся прямыми после деформации, на котором основаны обычные элементы оболочки в анализе методом конечного элемента (МКЭ). В результате этого традиционные конечные элементы не способны эффективно решать проблемы расчета прочности многослойного стекла. Исходя из предположения, что слои стекла многослойного стекла подчиняются теории пластин Кирхгофа [3] и межслойному переносу сдвигового напряжения, формулировка конечного элемента (КЭ) разрабатывается путем введения новых степеней свободы и реализуется в специальной прямоугольной триплексной пластине многослойного стекла КЭ. В большинстве случаев слоев стекла всего два. Оно называется триплексным многослойным стеклом (TLG), а прослойка, выполнена из поливинилбутирала. Многослойное стекло применяется в качестве материала для автомобильных стекол и окон самолетов, а также широко используется в современных зданиях в качестве архитектурного остекления.

Однако эффективное применение многослойного стекла в сложных конструкциях ограничено из-за трудностей расчета их прочности на этапе проектирования. Модуль упругости ПВБ-материала в тысячи раз меньше модуля упругости стекла и может изменяться в зависимости от температуры и времени. Прочность ламинированного стекла рассматривается как промежуточная из двух предельных случаев: случая слоистого стекла – две стеклянные пластины без какой-либо прослойки между ними, и случая монолитного стекла – одна стеклянная пластина толщиной, равной общей толщине стеклянных пластин [4]. Прочность ламинированного стекла находится между этими двумя случаями в зависимости от модуля сдвига прослойки G , Монолитный предел в два раза больше, чем слоистый предел для прочности и в четыре раза ниже для прогиба.

Анализ последних исследований и публикаций

Было проведено несколько экспериментальных исследований и численных исследований для изучения поведения ламинированного стекла в условиях динамической нагрузки. Достаточно подробный обзор этих работ приведен в [5]. В работах [6–8] были сконструированы серии моделей КЭ лобового стекла с использованием различных методов анализа для точного выполнения оптимизационного моделирования. Между тем, были проведены исследования свойств ПВБ [9] и изучено механическое поведение лобового стекла при ударе головы взрослого человека в ходе ударного испытания [10]. Авторы работы сравнили возможности поглощения энергии двух типов лобовых стекол: ПВБ и нанопористой системы поглощения энергии прослойками, и провели систематическое численное исследование на основе расширенного метода конечных элементов, чтобы изучить влияние переменных материала и системы на характер трещин.

Следует отметить, что для предыдущих численных исследований было доступно мало экспериментальных данных о материалах и соответствующих верификационных данных испытаний на удар. Любая попытка точно смоделировать поведение ламинированного лобового стекла могла быть достигнута только с помощью надлежащих методов моделирования с внедренными экспериментальными данными, проверенными соответствующим испытанием на удар, что и стало основной целью данного исследования. Затем должны проводиться параметрические исследования для изучения влияния параметров на модель конечного элемента с целью оптимизации его формы.

Цель исследования

Цель исследования – математическое и численное конечно-элементное моделирование прогнозного поведения ПВБ лобового стекла при ударных нагрузках и изучение влияния входных параметров модели на структуру КЭ.

В данной работе геометрическая модель лобового стекла построена с использованием трехслойной структуры. Физико-механические характеристики ПВБ соответствуют [11].

Основной материал исследования

1. Входные параметры модели

В 2024 году более миллиона человек погибли в результате дорожно-транспортных происшествий по всему миру. Почти треть погибших составляли пешеходы и велосипедисты – группа уязвимых участников дорожного движения. Травмы головы имеют особое значение в этом контексте, поскольку голова является наиболее часто травмируемой частью тела среди пешеходов и велосипедистов. Это подтверждают данные о смертности от дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с СИМ (средства индивидуальной мобильности, например, электросамокаты). В публикациях за 2024 год особо отмечается, что абсолютно все пользователи СИМ, погибшие в авариях в прошлом году, скончались вследствие полученных травм головы. Это подчеркивает критическую роль травм головы в смертности при ДТП с участием таких средств.

Основополагающим шагом для профилактики травм участников дорожного движения является анализ данных о реальных столкновениях. Анализы часто включают виртуальные реконструкции столкновения, чтобы лучше понять последовательность событий, динамику и оценить возможные превентивные меры. Многие исследования продемонстрировали то, как реальные аварии могут быть вычислительно реконструированы для получения ценной информации о механизмах травм головы и рисках, с которыми сталкиваются участники дорожного движения.

Модель КЭ ударника в виде головы пешехода построена в соответствии с требованиями Глобального технического регламента (GTR) [12]. Внутренняя структура ударника упрощена с использованием метода эквивалентности массы и положения центра тяжести в процессе моделирования конечных элементов и откалибрована. Тест динамической калибровки был проведен

с использованием программного обеспечения LS-DYNA [13].

LS-DYNA – это универсальный код конечных элементов для анализа статического и динамического отклика больших деформаций конструкций, включая конструкции, соединенные с жидкостями. Основная методология решения основана на явном интегрировании по времени. В настоящее время доступен неявный решатель с несколько ограниченными возможностями, включая структурный анализ и теплопередачу. Алгоритм контактного удара позволяет легко решать сложные контактные проблемы. Благодаря специализации этого алгоритма интерфейсы можно жестко привязывать для допуска переменного зонирования без необходимости в переходных областях сетки.

Пространственная дискретизация достигается за счет использования четырехузлового тетраэдра и восьмиузловых сплошных элементов, двухузловых балочных элементов, трех- и четырехузловых оболочечных элементов, восьмиузловых сплошных оболочечных элементов, элементов фермы, мембранных элементов, дискретных элементов и жестких тел. Для каждого типа элемента доступны различные формулировки.

Специализированные возможности для подушек безопасности, датчиков и ремней безопасности адаптировали LS-DYNA для применения в автомобильной промышленности.

В настоящее время LS-DYNA содержит примерно сто конститутивных моделей и десять уравнений состояния для охвата широкого диапазона поведения материалов.

Модель КЭ лобового стекла разработана с использованием элементов оболочки (рисунок 1). Слоистая структура ламинированного лобового стекла моделируется с использованием трех элементов оболочки с общими узлами на их границах: два внешних элемента оболочки представляют слои стекла, а внутренний элемент оболочки представляет промежуточный слой ПВБ. Модель КЭ разбита с использованием четырехугольных элементов с треугольными элементами в центральной области с исследованием конвергенции.

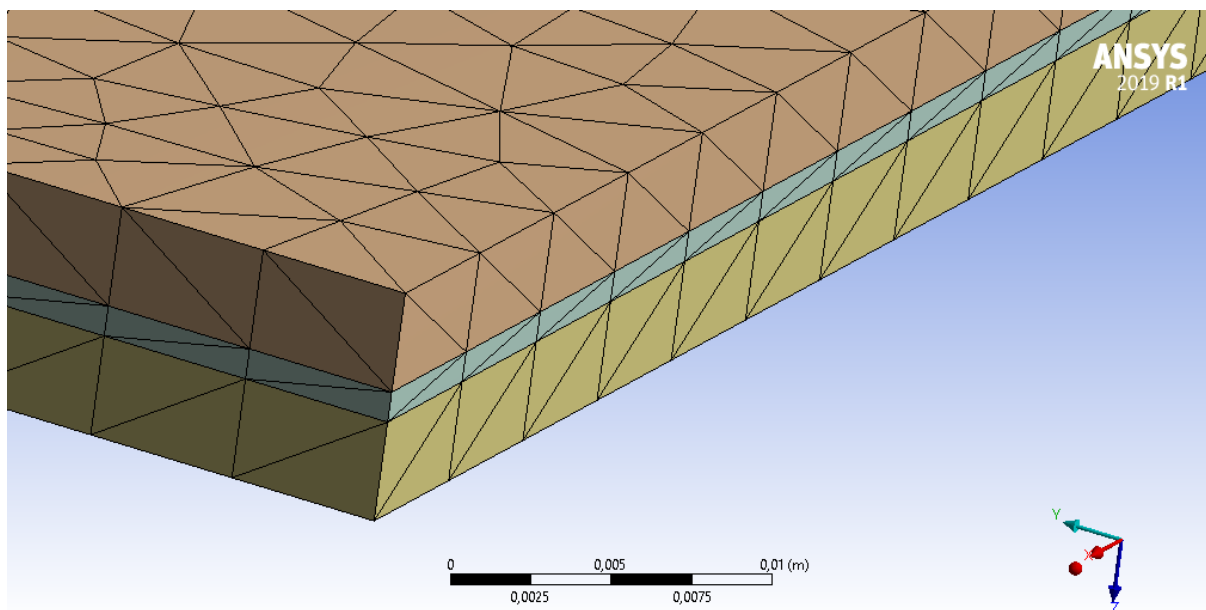


Рисунок 1 – Геометрия расчетного объекта

Проведена серия симуляций на основе платформы LS-DYNA для различных условий, чтобы получить влияние параметров на модель лобового стекла. Форма контакта между моделью головы и лобовым стеклом применяет контакт поверхность-поверхность с коэффициентом трения 0,3 [14].

В числовом алгоритме изменяется модуль Юнга стекла, деформация разрушения стеклопластика и кривая напряжения-деформации ПВБ, в соответствии с данными, указанными в таблице 1, в то время как другие условия сохраняются на их исходных значениях, показанных в таблице 2.

Затем устанавливаются четыре граничных условия, а именно: четыре края зажаты, четыре края просто подперты; левый и правый края зажаты, а верхний и нижний края просто подперты; левый и правый края просто подперты, а верхний и нижний края зажаты, с другими условиями моделирования на их исходных значениях.

Таблица 1 – Диапазон изменения параметров

Модуль упругости стекла	0,8 ГПа	8 ГПа	80 ГПа	400 ГПа	800 ГПа
Пластическая деформация разрушения стекла	6×10^{-3}	2×10^{-3}	6×10^{-4}	2×10^{-4}	6×10^{-5}
Скорость деформации кривой напряжения-деформации ПВБ	$5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	$3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	$5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$	$9 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$	120 с^{-1}

Таблица 2 – Параметры, используемые в модели КЭ лобового стекла

Слой	Переменные	Значение
Слой стекла	Плотность $\rho_{\text{стекла}}$	$2\,600 \text{ кг/м}^3$
	Модуль упругости $E_{\text{стекла}}$	75 ГПа
	Коэффициент Пуассона $\nu_{\text{стекла}}$	0,3
	Предел текучести $\sigma_{\text{стекла}}$	0,145 ГПа
	Пластическая деформация до разрушения $\epsilon_{\text{стекла}}$	0,001
	Толщина $h_{\text{стекла}}$	0,003 м
Промежуточный слой ПВБ	Плотность $\rho_{\text{ПВБ}}$	$1\,080 \text{ кг/м}^3$
	Модуль упругости $E_{\text{ПВБ}}$	2,25 ГПа
	Скорость степени изменения кривой «деформация-напряжение»	120 с^{-1}
Глобальные настройки	Граничные условия	Закреплено

Дальнейшее моделирование проводилось для проверки модели КЭ лобового стекла с помощью динамических экспериментов с ламинированным лобовым стеклом ПВБ при ударе муляжа головы, которые приведены в [14].

Скорости и углы удара муляжа головы установлены на уровне 6,6 м/с–11,2 м/с и 60° – 90° в соответствии с реальными данными об авариях с участием пешеходов в базе данных случаев дорожно-транспортных происшествий в России за 2024 год [15]. Всего проведено 8 численных экспериментов, показанных в таблице 3. Моделирование с использованием наиболее точной модели лобового стекла, полученной выше, проводится в соответствии с настройками в таблице 3 для проверки модели FE лобового стекла.

Таблица 3 – Настройки параметров численного тестирования

Номер	Угол удара ($^\circ$)	Скорость при ударе (м/с)
1	90	6,7
2	90	8,2
3	90	8,9
4	90	11,4
5	90	8,2
6	82	8,3
7	73	8,3
8	60	8,3

2. Выходные параметры модели

2.1. Влияние модуля Юнга стекла

Модуль Юнга относится к стеклянным слоям триплекса, в то время как ПВБ-пленка имеет значительно меньший модуль Юнга и демонстрирует вязкоупругие (пластические) свойства.

Стекло обладает очень высоким модулем Юнга по сравнению с полимерами или биологическими тканями. Это означает, что стекло чрезвычайно жесткое и мало деформируется упруго под нагрузкой. Однако именно эта жесткость делает его хрупким материалом. Когда предел прочности стекла на растяжение (который значительно ниже, чем предел прочности на сжатие) превышен, оно быстро и без значительной пластической деформации образует трещины и разрушается. Если бы лобовое стекло было из обычного (неламинированного) стекла, его высокий модуль Юнга привел бы к мгновенному образованию острых, разлетающихся осколков. Удар головой о такую поверхность означал бы катастрофические резаные и проникающие раны, а также передачу очень высоких пиковых сил из-за отсутствия поглощения энергии вязкой деформацией.

В момент контакта головы со стеклом, именно жесткость стеклянных слоев (определяемая модулем Юнга) предопределяет начальное распределение напряжений и деформаций. Однако, в отличие от многих других конструкций, где высокая жесткость желательна, в данном случае эта жесткость в сочетании с хрупкостью приводит к немедленному разрушению стеклянных слоев.

Ключевая роль ламинирования (ПВБ-пленки) заключается в изменении общего механизма разрушения лобового стекла, переключая его с чисто хрупкого на «псевдо-вязкое» при ударе. Несмотря на высокий модуль Юнга самого стекла, ПВБ-пленка, имеющая низкий модуль Юнга, способна к значительной пластической деформации, и поглощает основную часть энергии удара после того, как стеклянные слои уже разрушились. Пленка предотвращает разлет острых осколков и растягивается, демпфируя удар.

Таким образом, высокий модуль Юнга стекла способствует его быстрому разрушению (что нежелательно), но в конструкции триплекс это разрушение является частью контролируемого процесса благодаря свойствам низко модульной вязкой пленки.

Таким образом, высокий модуль Юнга самого стекла способствует его хрупкому разрушению при ударе головой. В случае обычного стекла это привело бы к крайне тяжелым, проникающим и резаным травмам.

На рисунках 2 и 3 приведены эпюры эквивалентных напряжений и деформаций в ламинированном стеклопакете при воздействии ударной нагрузки под углом 90 °.

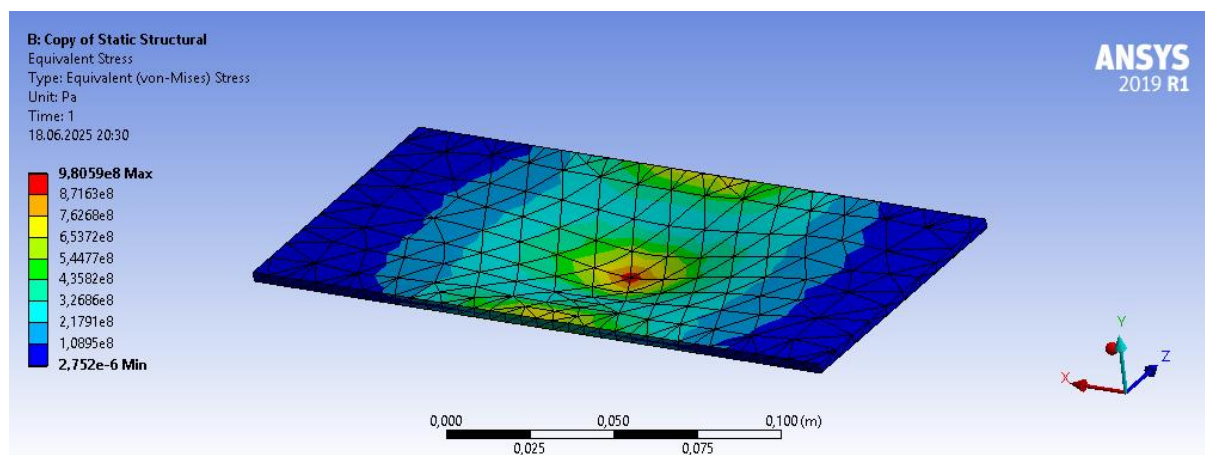


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных напряжений в лобовом стекле

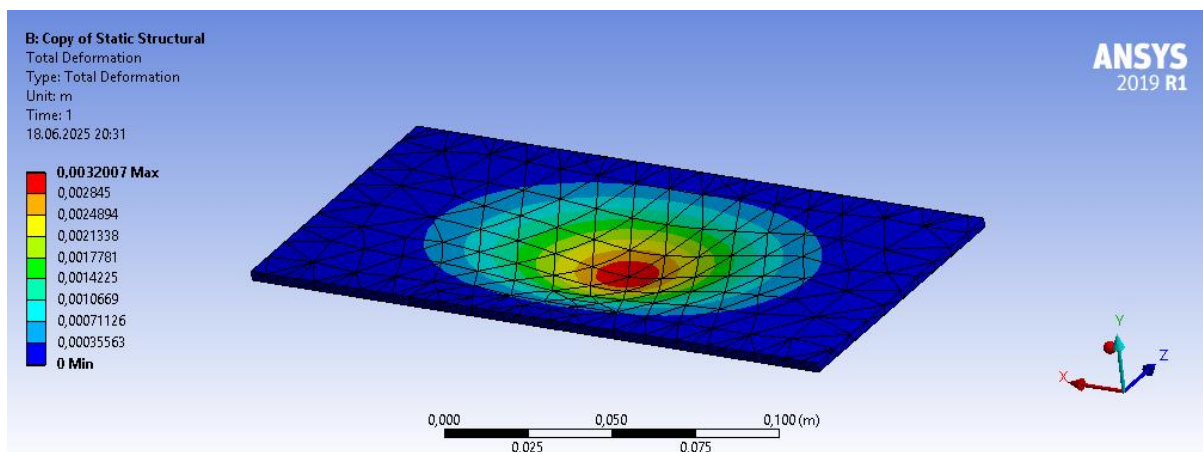


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных деформаций в лобовом стекле

На рисунке 4 показаны кривые ускорения-времени для разных модулей Юнга стекла в сравнении с соответствующими результатами испытаний. Когда модуль Юнга стекла установлен на 700 МПа и 7 ГПа, лобовое стекло не трескается, а тенденции ускорения отличаются от экспериментальных результатов. Как только модуль Юнга стекла превышает 70 ГПа, начинают образовываться трещины, интенсивность их появления становится выше с повышением модуля Юнга. Когда модуль Юнга стекла установлен на 70 ГПа, результаты моделирования и экспериментальные результаты кривой ускорения становятся ближе. Независимо от трещин, ускорение модели головы увеличивается с увеличением модуля Юнга стекла.

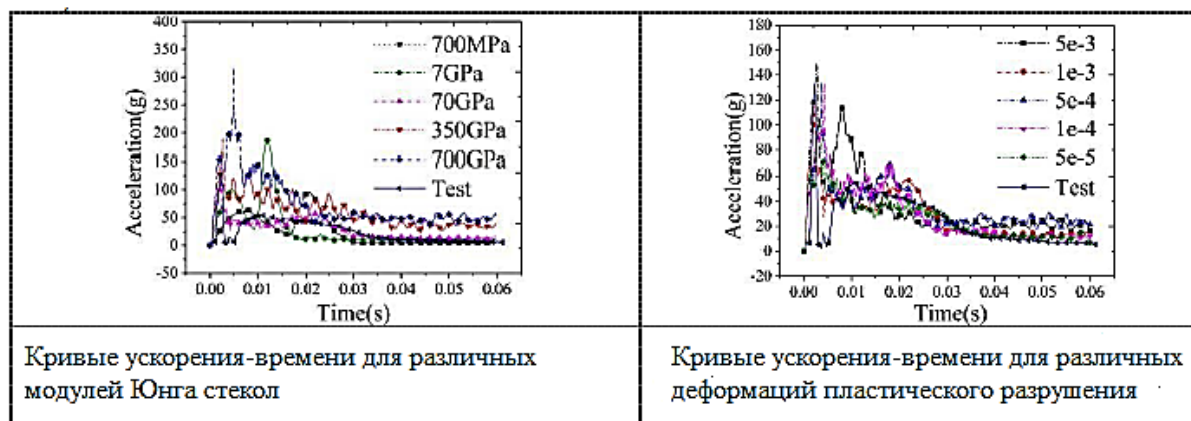


Рисунок 4 – Кривые ускорения-времени для различных модулей упругости стекол и деформаций пластического разрушения

С увеличением модуля Юнга стекла лобовое стекло становится жестче, поэтому пиковое ускорение соответственно увеличивается. Поскольку предел текучести и пластическая деформация разрушения фиксированы, деформация разрушения становится меньше, и трещины легче образуются с увеличением предела текучести стекла.

2.2 Влияние пластической деформации разрушения

При ударе головой о лобовое стекло автомобиля во время ДТП пластическая деформация играет критически важную роль в механизме разрушения стекла и, как следствие, в тяжести полученных травм. Современные лобовые стекла автомобилей, как уже было отмечено, не являются обычным стеклом. Именно ПВБ-пленка придает лобовому стеклу особые свойства, связанные с пластической деформацией.

Результаты численных экспериментов позволяют утверждать, что вязкий слой ПВБ способен к значительной пластической деформации. Когда голова ударяется о стекло, стекло ломается (хрупкое разрушение), но осколки остаются приклеенными к эластичной ПВБ-пленке. Сама пленка растягивается и деформируется. Эта пластическая деформация пленки поглощает значительную часть кинетической энергии удара, рассеивая ее. За счет поглощения энергии пиковые нагрузки, передающиеся на голову, значительно снижаются по сравнению с ударом о жесткую, недеформируемую поверхность. Это приводит к уменьшению пикового замедления головы, что является ключевым фактором в предотвращении тяжелых черепно-мозговых травм.

Хрупкое разрушение обычного стекла приводит к образованию острых, проникающих осколков, которые могут вызвать глубокие резаные раны головы, лица, глаз, а также проникающие травмы мозга. Благодаря ПВБ-пленке, осколки триплекса остаются прикрепленными к ней, образуя «паутину» трещин, но не разлетаются. Это значительно снижает риск рвано-ушибленных и резаных ран мягких тканей головы и лица, а также предотвращает проникающие травмы.

За счет демпфирования удара лобовым стеклом энергия, передающаяся на череп, уменьшается. Это снижает вероятность переломов костей черепа и непосредственного ушиба мозга.

Таким образом, можно утверждать, что пластическая деформация полимерного слоя в лобовом стекле является ключевым свойством, которое позволяет стеклу поглощать энергию удара, предотвращать образование опасных осколков и, в конечном итоге, значительно снижать тяжесть травм головы и лица при столкновениях.

На рисунке 4 показаны кривые ускорения-времени для различных пластических деформаций разрушения по сравнению с соответствующими результатами испытаний. С увеличением пластической деформации разрушения ускорение, очевидно, не меняется. С уменьшением пластической деформации разрушения трещины становятся более интенсивными. Когда пластическая деформация разрушения установлена на 1×10^{-3} и 5×10^{-4} , результаты моделирования и эксперимента лучше согласуются.

Из-за фиксированных предела текучести и модуля Юнга разрушающее напряжение становится меньше с уменьшением пластической деформации разрушения. Трещины становятся более интенсивными, так как зарождение трещин становится более легким.

2.3. Влияние кривой напряжения-деформации ПВБ и граничных условий

По сравнению с применением динамической кривой напряжения-деформации второй пик ускорения неочевиден, когда используются квазистатические кривые напряжения-деформации. Когда же применяются квазистатические кривые напряжения-деформации с разной скоростью деформации, полученные кривые ускорения не сильно отличаются. Кроме того, результаты моделирования и эксперимента по кривой ускорения ближе, когда применяется динамическая кривая напряжения-деформации.

Из результатов квазистатических и динамических испытаний образцов на растяжение мы можем видеть, что материалы ПВБ демонстрируют различные характеристики растяжения при динамических и квазистатических нагрузках [7]. Кроме того, сам процесс удара является динамическим процессом. Поэтому результаты, полученные при применении динамической кривой испытания на растяжение, больше соответствуют реальной ситуации.

Данные численного анализа показывают, что кривые ускорения-времени при различных граничных условиях в сравнении с соответствующими результатами испытаний мало отличаются друг от друга. Это показывает, что граничные условия оказывают лишь небольшое влияние на характеристики напряженно-деформированного состояния стеклопакета.

Заключение

При конечно-элементном моделировании лобового стекла с ламинированной структурой проведена серия симуляций в различных условиях для получения влияния входных параметров на модель лобового стекла. Предложена модель конечных элементов с правильными настройками параметров. Приведены результаты численного исследования влияния механических характеристик лобового стекла на параметры безопасности в дорожно-транспортных происшествиях. Развитие этих моделей, включая более точные конститутивные модели для ПВБ, усовершенствованные алгоритмы моделирования разрушения стекла и эффективные вычислительные методы, продолжает играть ключевую роль в повышении пассивной безопасности автомобилей, снижая риск травм и спасая жизни при ДТП. Будущее этой области связано с интеграцией МКЭ с методами машинного обучения для ускорения оптимизации и с более точным учетом физиологических моделей травмирования. Исследование обеспечивает надежный шаг для будущих систематических численных исследований динамики лобового стекла, подверженного удару головы.

Список литературы

1. Поливинилбутираль (PVB): обзор рынков стран СНГ и мирового рынка / Инвестиционная группа «Профессиональные Комплексные Решения». – Москва : Market Publishers, 2017. – 466 с.
2. Всемирный доклад о предупреждении дорожно-транспортного травматизма / А. Джонстон [и др.] ; под ред. М. Педен [и др.] ; пер. Н. В. Заборин [и др.]. – Москва : Весь Мир, 2004. – 258 с. – ISBN 5-7777-0158-2.
3. Аннин, Б. Д. Неклассические модели теории пластин и оболочек / Б. Д. Аннин, Ю. М. Волчков // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т. 57. – № 5. – С. 5–14.
4. Analysis of damage in laminated automotive glazing subjected to simulated head impact / L. R. Dharani, Sh. Zhao, L. Chai, S. D. Barbat // Engineering failure analysis. – 2006. – № 13(4) – P. 582–597.
5. A numerical model on PVB laminated windshield subjected to headform low-speed impact / X. Q. Xu, B. H. Liu., Y. Wang [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. – 2013. – V. 451. – P. 1–6.
6. Otte, D. Injury protection and accident causation parameters for vulnerable road users based on German – In-Depth Accident Study GIDAS / D. Otte, M. Jansch, C. Haasper // Accid Anal Prev. – 2012. – № 44(1). – P. 149–153.
7. Pyttel, T. Failure criterion for laminated glass under impact loading and its application in finite element simulation / T. Pyttel, H. Liebertz, J. Cai // International Journal of Impact Engineering. – 2011. – № 38(4). – P. 252–263.
8. Sun, D. Z. Modelling of the failure behaviour of windscreens and component tests / D. Z. Sun, F. Andrieux, A. Ockewitz // Journal of Automotive Technology. – 2015. – № 10(3). – P. 542–558.
9. Бандорин, В. Г. Влияние концентрации растворов поливинилнитрата и поливинилбутираля на их поверхностные кислотно-основные характеристики / В. Г. Бандорин, Н. В. Баранова, С. А. Богданова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – № 9. – С. 70–72.
10. Wingren, M. Windscreen study using a free moving headform: An investigation of windscreen behaviour when subjected to headform impact / M. Wingren // Proc Inst Mech Eng Part D-J Automob Eng. – 2011. – № 197(D2). – P. 62–88.
11. ГОСТ 9439-85. Поливинилбутираль. Технические условия : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 марта 1985 г. № 627 : взамен ГОСТ 9439-73 / разработан Министерством химической промышленности. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 38 с.
12. ECE/TRANS/180/Add.9. Agreement concerning the establishing of global technical regulations for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles : Global technical regulation No. 9 "Pedestrian safety" : Done at Geneva on 25 June 1988 : Addendum : Established in the Global Registry on 12 November 2008. – 2008. – 74 p. – URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a9e.pdf> (дата обращения: 18.06.2025). – Текст : электронный.
13. LS-DYNA Theory Manual. – 2025. – 898 p. – URL: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Theory.pdf (дата обращения: 19.06.2025). – Текст : электронный.
14. Numerical study of PVB laminated windshield cracking upon human head impact / J. Xu, Y. B. Li, X. Chen X [et al.] // Computers, Materials & Continua. – 2010. – № 18(2). – P. 183–211.
15. Статистика ДТП по России за 2024 год. – Текст: электронный // RusDTP.ru : [сайт]. – URL: <https://rusdtp.ru/stat-dtp/> (дата обращения: 20.06.2025).

Л. П. Вовк, Е. С. Кисель
Автомобильно-дорожный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донецкий национальный технический университет» в г. Горловка
Конечно-элементная модель ветрового стекла автомобиля

Конечно-элементное моделирование ветрового стекла автомобиля является неотъемлемой частью современного процесса проектирования и оценки безопасности. Благодаря способности метода конечного элемента обрабатывать сложную геометрию, неоднородные материалы, нелинейные процессы и динамические нагрузки, инженеры могут с высокой точностью предсказывать поведение стекла в различных эксплуатационных условиях, а также при критических воздействиях, таких как удар. В этой статье представлена эффективная конечно-элементная модель лобового стекла для систематических численных исследований на основе метода конечных элементов для изучения способности поглощения энергии и конструкции безопасности поливинилбутирального ламинированного ветрового стекла. Приведены результаты численного исследования влияния механических характеристик лобового стекла на параметры безопасности в дорожно-транспортных происшествиях.

МНОГОСЛОЙНОЕ СТЕКЛО, КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ, ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

L. P. Vovk, E. S. Kisel
Automobile and Road Institute (Branch) of the Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education "Donetsk National Technical University" in Gorlovka
Finite Element Model of the Automobile Windshield

Finite element modelling of the automobile windshield is an integral part of the modern design and safety assessment process. Due to the ability of the finite element method to handle complex geometry, heterogeneous materials, nonlinear processes and dynamic loads, engineers can accurately predict the behavior of the glass under various operating conditions, as well as under critical impacts such as impact. This paper presents an efficient finite element model of the windshield for systematic numerical studies based on the finite element method to study the energy absorption capacity and safety design of polyvinyl butyral laminated windshield. The results of numerical study of the influence of windshield mechanical characteristics on safety parameters in road accidents are presented.

LAMINATED GLASS, FINITE ELEMENT, NUMERICAL ANALYSIS, MATHEMATICAL MODELLING OF EMERGENCY SITUATIONS

Сведения об авторах:

Л. П. Вовк

SPIN-код РИНЦ: 9860-6682
 Телефон: +7 949 301-98-55
 Эл. почта: leonidvovk166@gmail.com

Е. С. Кисель

SPIN-код РИНЦ: 7676-8943
 Телефон: +7 949 443-74-77
 Эл. почта: e.s.kisel@gmail.com

Статья поступила 23.06.2025
 © Л. П. Вовк, Е. С. Кисель, 2025
 Рецензент: В. В. Быков, канд. техн. наук, доц.,
 Автомобильно-дорожный институт
 (филиал) ДонНТУ в г. Горловка