

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2025, №3 https://www.agequal.ru/pdf/2025/AGE_QUALITY_3_2025.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Хорошева Е.Р., Макаров Р.И. Подход к построению математических моделей для оценки качества моллирования в производстве автомобильных стекол // Электронный научный журнал «Век качества». 2025. №3. С. 172-182. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/325011.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 666.1.054.3:519.248

Подход к построению математических моделей для оценки качества моллирования в производстве автомобильных стекол

Хорошева Елена Руслановна,
доктор технических наук,
профессор кафедры информационные системы и программная инженерия,
Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
khorosheva@vlsu.ru

Макаров Руслан Ильич,
доктор технических наук,
профессор кафедры информационные системы и программная инженерия,
Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
makarov.ruslan@gmail.com

В статье рассмотрено построение математических моделей для оценки качества процесса моллирования в производстве автомобильных стекол. С использованием экспериментальных данных и вычислительного эксперимента определялись информативные входы и структура математических моделей. На основе экспериментов обосновано построение адекватных математических моделей объекта исследования.

Ключевые слова: математические модели; автомобильные стекла; моллирование.

К автомобильным стеклам предъявляются высокие требования, определяемые условиями эксплуатации [1]. Качественные ветровые стекла должны улучшать аэродинамические характеристики автомобиля, быть

прочными, обеспечивающими безопасность водителя и пассажиров. Чтобы сделать стекло, соответствующее этим требованиям, применяется технология триплекс.

Модель технологического процесса производства триплекса наглядно описана с использованием методологии *IDEF0* в учебном пособии [2].

Для производства автомобильного триплекса используется автоклавная технология с приданием триплексу нужной формы с помощью моллирования. Не допускаются отклонения геометрии поверхностей стекол, входящих в пакет триплекса. Большие отклонения приводят к избыточным остаточным напряжениям и саморазрушению стекла [3]. Остаточные напряжения сжатия должны распределяться равномерно вдоль кромки изделия и не превышать установленных норм. Остаточные напряжения растяжения в стекле не допускаются [4].

Отклонение геометрии поверхности стекол, входящих в пакет триплекс, контролируется по величине провиса стекол, который зависит от температурного режима моллирования. Это определило цель проводимых исследований по разработке математических моделей для оценки влияния технологии моллирования на качество вырабатываемых автомобильных стекол.

Моллирование проводится в тоннельной печи. В верхней части печи установлены электронагреватели, управляемые микроконтроллерами. В нижней части печи расположена металлическая опорная поверхность, на которую укладываются листы стекла [5].

Печь моллирования представляет собой сложный тепловой агрегат, режим которого контролируется 150-ю термопарами, установленными в своде, поде и по бокам в камерах предварительного нагрева, главной камере и камере отжига. Режим моллирования характеризуется стационарностью и высокой точностью. Колебания температур не превышают 2,9% в камере предварительного нагрева, 3,1% в главной камере и 10,6% в камере

отжига. Это позволило описать режим моллирования линейными математическими моделями.

Размерность системы, описывающей температурный режим моллирования, была понижена с помощью методов кластерного и множественного корреляционного анализов. В результате обработки экспериментальных данных выделены 38 представительных импульсов, достаточных для контроля режима моллирования [2].

В производстве триплекса контролируется качество вырабатываемой продукции. Отклонение поверхности стекла от опорной поверхности контрольного шаблона (провис) измеряется щупом по ширине стекла. Внутренние напряжения в стекле контролируются вдоль кромки изделия.

Анализ качества вырабатываемого триплекса показал недостаточную стабильность параметров стекла. Качество триплекса зависит не только от режима моллирования, но и от режимов подпрессовки, прессования и других неучтенных факторов. В работе анализируется влияние температурного режима моллирования на параметры триплекса, для чего разрабатывались математические модели, описывающие режим моллирования. Для построения моделей использовались статистические данные измерений качества вырабатываемого триплекса и значения температур в камерах печи моллирования в течение 8 месяцев непрерывной работы производства.

Построение обобщенной модели, описывающей зависимость непрелегания, внутренних напряжений в триплексе от режима моллирования, затруднено. С использованием метода декомпозиции решались локальные задачи. Строились отдельные модели, описывающие образование провиса, остаточных напряжений сжатия и растяжения в кромке стекла от режима моллирования.

Существуют проблемы выбора существенных (влияющих на выходные показатели) входных переменных, избыточности данных и мультиколлинеарности. Приходилось проводить вычислительные

эксперименты с различным количеством входных переменных и выбирать оптимальное число входов.

Некоторые входные переменные мультиколлинеарны. Для оценки влияния мультиколлинеарности входных переменных строились факторные модели. Сравнение точности регрессионных моделей с факторными моделями позволило не учитывать коррелированность входных переменных при моделировании.

Имеющиеся исходные данные разбивались на обучающую и проверочную выборки. По ним строились различные модели: регрессионные, модели на нечетких множествах и на нейронных сетях. Анализ результатов позволил выбрать лучшие модели по точности описания выходных переменных.

Геометрия моллированных стекол оценивается по величине провиса, измеряемого в трех точках по ширине стекла. Результаты измерений коррелированы, что позволило ограничиться контролем измерения провиса в середине стекла. Для установления зависимости величины провиса от режима моллирования использовались данные производства. Строились разные типы моделей, и оценивалась их точность (таблица 1).

Таблица 1

Оценки моделей, описывающих провис вырабатываемых стекол

Тип модели	Число входных переменных	Коэффициент детерминации	Стандартное отклонение ошибки модели, мм
Регрессионная	18	0,60	0,31
На нечетких множествах, genefis2	9	0,93	0,12
На нейронных сетях, перцептрон MLP 11 9	11	0,32	0,33

Источник: составлено авторами

Найденные зависимости выходной переменной объекта исследования – провиса к входным температурам в разных зонах печи моллирования, позволяют

выбрать подходящий метод моделирования, оценить характер процессов, протекающих в производстве триплекса, а также обеспечить возможность аппроксимацией построить зависимость выходного значения к входным переменным.

К автомобильным стеклам предъявляются требования по величине остаточных напряжений сжатия в триплексе, которые должны удовлетворять техническим условиям на изделие.

В статье исследуется влияние режима моллирования на величину остаточных напряжений в триплексе. В производстве триплекса контролируется напряжение в 12 точках вдоль кромки изделия (рис. 1). Результаты измерений в этих точках коррелированы между собой. Это позволяет ограничиться контролем остаточных напряжений по одному измерению на каждой стороне стекла. Определены точки контроля напряжений сжатия на сторонах триплекса: 1, 5, 7, 11.

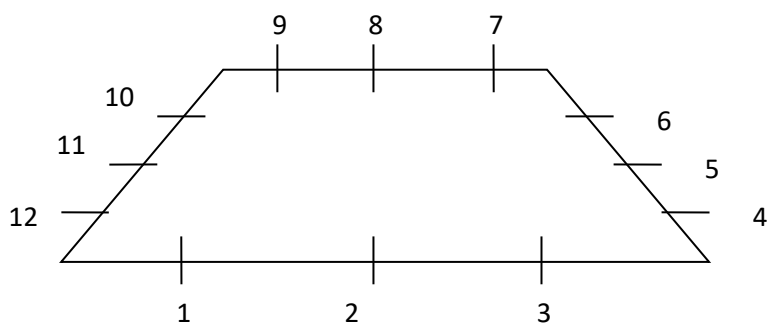


Рис. 1. Точки контроля напряжений на сторонах триплекса

Для построения модели, описывающей зависимость величины остаточных напряжений сжатия от режима моллирования, использовались данные производства. Результаты измерений напряжения сжатия в кромке вырабатываемого триплекса приведены в таблице 2.

Таблица 2

Напряжения сжатия в кромке триплекса

Измеряемый параметр	Точки контроля напряжения сжатия			
	1	5	7	11
Среднее значение, МПа	14,61	20	18,4	19,6
Стандартное отклонение, МПа	1,82	3,5	3,9	3,6

Источник: составлено авторами

Строились регрессионные модели линейные и нелинейные, на главных компонентах. Подбирались входные переменные температур в разных зонах печи моллирования. Оценивалась точность описания экспериментальных данных по величине коэффициента детерминации и среднеквадратичной погрешности моделей. Лучшими по точности оказались линейные регрессионные модели, оценки которых приведены в таблице 3.

Таблица 3

Оценки регрессионных моделей напряжения сжатия

Точки контроля	Число входных переменных	Коэффициент детерминации	Стандартное отклонение ошибки модели, МПа
1	10	0,4	1,4
5	14	0,53	2,46
7	17	0,44	3,07
11	15	0,47	2,81

Источник: составлено авторами

Исследовалась точность описания напряжения сжатия моделями на нечетких множествах *genefis2* и *robustfit* (таблица 4). Модели на нечетких множествах описывают напряжения сжатия в кромках вырабатываемого триплекса на проверочной выборке не точнее регрессионных моделей.

Таблица 4

Оценки моделей на нечетких множествах

Модели на нечетких множествах	Число входных переменных				Стандартное отклонение ошибки модели, МПа							
					На обучающей выборке, 50 опытов				На проверочной выборке, 50 опытов			
	Точки контроля напряжения сжатия				Точки контроля напряжения сжатия				Точки контроля напряжения сжатия			
	1	5	7	11	1	5	7	11	1	5	7	11
genefis2	2	4	4	3	1,64	2,32	2,63	2,89	2	-	317	3,52
robustfit	2	4	8	-	1,66	3,06	3,32	-	1,62	24,8	17	-

Источник: составлено авторами

Исследовалась также точность описания напряжений сжатия с помощью моделей на нейронных сетях (таблица 5). Точность описания проверялась на обучающей и проверочной выборках.

Таблица 5

Оценки моделей напряжения сжатия на нейронных сетях

Точки контроля на кромке стекла	Тип модели	Стандартное отклонение ошибки модели, МПа				
		На обучающей выборке 50 опытов	На проверочной выборке 50 опытов	Корреляция между фактическими значениями и данными на обучающей, контрольной и проверочной выборках		
1	MLP 2-6	1,96	2,22	0,16	0,18	-
5	MLP 4 7	3,12	8,91	0,4	0,7	0,5
7	RBF 4 1	4,2	3,2	0,05	0,13	-
11	MLP 3 5	3,53	3,71	-	0,37	-

Источник: составлено авторами

Модели напряжения сжатия на нейронных сетях адекватно описывают данные на обучающей выборке, но имеют завышенную погрешность на контрольной.

К автомобильным стеклам предъявляются высокие требования к величине напряжений растяжения в кромке стекла. Напряжения не должны превышать требований, задаваемых техническими условиями на изделие. Результаты измерений напряжений растяжения в кромке триплекса приведены в таблице 6.

Таблица 6

Напряжения растяжения в кромке триплекса

Измеряемый параметр	Точки контроля напряжения растяжения			
	1	5	8	10
Среднее значение, МПа	2,41	2,26	3,37	2,56
Стандартное отклонение, МПа	0,74	0,75	0,83	0,88

Источник: составлено авторами

Изучалась зависимость величины остаточных напряжений растяжения от режима моллирования. Строились разные модели – регрессионные, на главных компонентах, на нечетких множествах и нейронных сетях. Подбирались входные переменные температур в разных камерах печи моллирования. Лучшими по точности оказались линейные регрессионные модели, оценки которых приведены в таблице 7.

Таблица 7

Оценки регрессионных моделей напряжения растяжения

Точки контроля	Число входных переменных	Коэффициент детерминации	Стандартное отклонение ошибки модели, МПа
1	18	0,44	0,61
5	13	0,4	0,61
8	19	0,58	0,6
10	16	0,44	0,65

Источник: составлено авторами

Модели на нечетких множествах *genefis1* и *genefis2* описывают напряжения растяжения в кромках вырабатываемого триплекса не точнее регрессионных моделей (таблица 8).

Таблица 8

Оценки моделей напряжения растяжения на нечетких множествах

Модели на нечетких множествах	Число входных переменных				Стандартное отклонение ошибки модели, МПа							
					На обучающей выборке, 50 опытов				На проверочной выборке, 50 опытов			
	Точки контроля напряжения растяжения				Точки контроля напряжения растяжения				Точки контроля напряжения растяжения			
	1	5	8	10	1	5	8	10	1	5	8	10
genefis1	5	7	2	3	0,63	0,5	0,6	0,68	0,76	165	0,79	0,93
genefis2	3	7	2	3	0,73	0,48	0,62	0,66	0,62	922	0,81	1,73

Источник: составлено авторами

Точность описания напряжений растяжения в кромке триплекса моделью на нейронных сетях GRNN 12_25 приведена в таблице 9. Модель содержит 12 нейронов на входе, 25 в промежуточном слое и четыре нейрона на выходе.

Таблица 9

Оценки модели напряжения растяжения на нейронной сети GRNN 12_25 с четырьмя выходными переменными

Точки контроля на кромке стекла	Стандартные отклонения ошибок модели, МПа	
	На обучающей выборке 50 опытов	На проверочной выборке 50 опытов
1	0,75	0,67
5	0,71	0,73
8	0,7	0,74
10	0,86	0,87

Источник: составлено авторами

Модель GRNN 12_25 имеет невысокую точность описания данных напряжений растяжения в кромке триплекса, усредняет данные измерений напряжений растяжения и не отслеживает выбросы.

Заключение

Анализ результатов применения различных моделей для описания технологического процесса моллирования в производстве автомобильных стекол – регрессионных, на нечетких множествах, на нейронных сетях,

показывает преимущества линейных регрессионных моделей. Регрессионные модели обеспечивают точность описания процессов, просты в разработке, информативны с точки зрения физического смысла.

Математические модели дают возможность настройки технологического процесса моллирования оптимальным образом для повышения качества вырабатываемого триплекса и предотвращения брака [6, 7, 8].

Список литературы

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32565-2013. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 54 с.
2. Макаров Р.И., Суворов Е.В., Тарбеев В.В., Хорошева Е.Р. Информационные технологии в управлении качеством автомобильного стекла: учебное пособие. – Владимир: Издательство Владимирского государственного университета, 2010. – 275 с.
3. Логинов Н.Ю., Кучеров А.О. Анализ формирования остаточных напряжений в стекле типа триплекс при его изготовлении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-formirovaniya-ostatochnyh-napryazheniy-v-stekle-tipa-tripleks-pri-ego-izgotovlenii/> (дата обращения 25.05.2025).
4. Мурзаева И.В., Носов Н.В., Якубович Е.А. Исследование формирования остаточных напряжений при сборке автомобильного стекла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://doi.org/10.26160/2572-4347-2020-10-22-29 /](https://doi.org/10.26160/2572-4347-2020-10-22-29/) (дата обращения 25.05.2025).
5. Маневич В.Е., Чесноков А.Г., Емельянова О.А. Автомобильные стекла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.oskolocheck.ru/file/avto_stekla.pdf (дата обращения 25.05.2025).

6. Makarov R.I., Khorosheva E.R. Sag bending control in the production of automobile windshields // Glass and Ceramics. – 2018. – Т. 74. – № 11-12. – Pp. 432-433.
7. Makarov R.I. Morphological approach to taking corrective actions in quality control systems for laminated glass production // Glass and Ceramics. – 2008. – Т. 65. – № 7-8. – Pp. 227-230.
8. Makarov R.I., Khorosheva E.R. Multilayer glass quality improvement during production // Glass and Ceramics. – 2022. – Т. 78. – № 9-10. – Pp. 350-352.

An approach to constructing mathematical models for assessing the quality of bending in the production of automotive glass

Khorosheva Elena Ruslanovna,
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Departments of Information Systems and Software Engineering,
Vladimir State University Alexander Grigoryevich
and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
Russia, 600000, Vladimir, 87 Gorky St.
khorosheva@vlsu.ru

Makarov RuslanIlyich,
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Departments of Information Systems and Software Engineering,
Vladimir State University Alexander Grigoryevich
and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
Russia, 600000, Vladimir, 87 Gorky St.
makarov.ruslan@gmail.com

The construction of mathematical models for assessing the quality of the bending process in the production of automobile glass is considered. Using experimental data and a computational experiment, informative inputs and the structure of mathematical models were determined. Based on the experiments, the construction of adequate mathematical models of the object of study is substantiated.

Keywords: mathematical models; automotive glass; bending.