

Р.И. МАКАРОВ

Моделирование процесса отжига в производстве листового стекла

УДК 658.562

ФГБОУ ВПО
«Владимирский
государственный
университет имени
А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
г.Владимир

Проведен статистический анализ отходов стекла в процессе производства на стадии отжига с использованием данных мониторинга. Выявлены влияющие факторы и показана возможность уменьшения отходов коррекцией температурного режима отжига.

Особенность выработки стекла флоат-способом состоит в формировании ленты стекла на поверхности расплавленного олова. Для получения стекла толщиной 3 мм ленту охлаждают, затем ее снова разогревают и подвергают дополнительному растягиванию до желаемой толщины. Пройдя флоат-ванну, лента стекла поступает в печь отжига [1]. Печь отжига имеет горизонтальную конструкцию, состоит из закрытой и открытой частей. Закрытая часть печи отжига содержит четыре зоны. Температуру в зонах печи стабилизируют системами автоматического регулирования за счет подачи воздуха в зоны со стороны свода и пода. Режим отжига стекла определяется видом кривой изменения температуры вдоль туннеля печи, которая хорошо аппроксимируется линейной зависимостью [2].

Система мониторинга, функционирующая на производстве, непрерывно контролирует режим отжига и пороки, содержащиеся в вырабатываемом стекле. К виду отходов, зависящих от качества ведения процессов, относятся:

- пороки варки (пузыри, свиль, камни и др.);
- пороки формования ленты стекла (кристаллизация, хлопья олова, разнотолщинность, «Зебра», шаговые натиры и посечки от валов, нехватка ширины борта и др.);
- отходы отжига (остаточные напряжения, кривизна, плохая резка стекла);

- отходы резки и раскроя ленты стекла (посечки, трещины, заколы, царапины с поперечной отрезки, отходы раскроя).

Записи об отходах на производстве ведутся в каждой бригаде. При этом возможен субъективизм при оценке причин, порождающих отходы. В работе [3] была оценена теснота связи между качественными признаками, порождающими отходы стекла. Проведенный анализ показал сильную связь между причинами отходов, выявленными в бригадах. Это позволило проводить анализ работы технологической линии по усредненным показателям бригад за каждые сутки. Доля отходов, связанная с процессом резки и раскроя стекла незначительная, не превышает 0,08%. Поэтому основное внимание уделяется анализу отходов, возникающих в процессе варки-выработки стекла. Оценки статистических характеристик отходов приведены в таблице 1[4].

Таблица 1

Статистические оценки отходов при выработке стекла на 1ЛПС

Вид отходов	Количество наблюдений	Средне значение, %	Стандартное отклонение, %	Коэффициент вариации, %
Варки	362	4,41	8,59	195
Формования лены стекла	365	0,96	4,18	435
Отжига	365	0,73	1,43	197

Как следует из данных таблицы 1 процесс варки-выработки стекла в течение года (выборка 365 среднесуточных данных) характеризуется нестабильностью отходов, коэффициент вариации которых изменяется в широком диапазоне от 195 до 435%. Для анализа возможностей процесса варки-выработки листового стекла по уменьшению отходов воспользуемся данными мониторинга процесса выработки листового стекла в течение года непрерывной работы производства. Изменчивость в поведении и результатах стадий процесса варки-выработки обуславливает необходимость применения статистических методов анализа. Статистический анализ данных мониторинга может способствовать лучшему пониманию характера, степени и причин изменчивости, что может помочь в решении и даже предотвращении проблем, обусловленных изменчивостью и тем самым способствовать повышению качества продукции и процессов [5].

Рассмотрим особенности использования статистических методов для анализа возможностей уменьшения отходов на примере отжига листового стекла в процессе производства. Измерения значений факторов и отходов по причине отжига являются единственным источником информации, из которого можно извлечь сведения о состоянии процессов и отходах, их взаимосвязях, недостатках, нарушениях. Для извлечения из них необходимой для практики информации о степени влияния факторов на отходы, о причинах снижения качества, необходимы инструменты четкого выявления причинно-следственных связей между технологическими факторами, отходами и показателями качества. Измерение значений факторов, показателей качества и отходов являются практически единственным источником информации, из которого можно извлечь сведения о состоянии процессов и качестве, их взаимосвязях, недостатках, нарушениях. Для получения сведений, соответствующих определенным сочетаниям значений факторов, используется выборка необходимых значений из базы, сохраняющей результаты мониторинга показателей качества, записи об отходах и технологических факторах в течение года непрерывной работы технологической линии при выработке листового стекла.

Проведем анализ данных отходов процесса отжига, чтобы понять их причину. Анализ включает:

- проверку гипотезы о законе распределения;
- анализ возможностей процесса;
- регрессионный анализ;
- моделирование.

Стабильность технологического процесса отжига листового стекла оцениваем по результатам анализа отходов, связанных с процессом отжига с использованием метода аксиоматического анализа стабильности производственного процесса [6]. Аксиоматический анализ основан на аксиомах и не требует нормальности распределения анализируемых процессов, на которых основан традиционный анализ контроля качества процессов.

Анализируемую выборку отходов, состоящую из 332 данных, распределим по 8-и группам (таблица 2). Данные 332 измерений представлены 8-ю данными, вычисленными методом накопленных

частот: $x_1=-0,56358$; $x_2=-0,54239$; $x_3=-0,50708$; $x_4=-0,42374$; $x_5=-0,32346$; $x_6=-0,22035$; $x_7=2,975589$; $x_8=3,08$.

Предполагается, что измерения равномерно распределены в 8-и группах по отходам. Предполагается также, что отходы отобранных 8-и групп репрезентативны отходам 332 измерений. Эта предпосылка непроверяемая. Однородность отходов 8-и групп проверяемая предпосылка. Проверка репрезентативной однородности этих групп начинается с принципа порядка (таблица 2).

Таблица 2

Вторичная выборка

Отходы, %	Кол-во	Частота	Накопленная частота
0-0,385	241	0,725904	0,725904
0,385-0,77	34	0,10241	0,828314
0,77-1,155	29	0,087349	0,915663
1,155-1,54	12	0,036145	0,951808
1,54-1,925	6	0,018072	0,96988
1,925-2,31	5	0,01506	0,98494
2,31-2,695	4	0,012048	0,996988
2,695-3,09	1	0,003012	1
всего	332	1	

Условие принципа порядка выполняется, т.к. вычисленные экспериментальные значения репрезентативности (ЭЗР) (таблица 3) и расположены в пределах интервалов теоретического значения репрезентативности (ТЗР), которые представлены типом D [6].

Таблица 3

Экспериментальное значение репрезентативности

x	abs(x-x _{cp})	q	γ	ТЗР
-0,56358	0,997954	0,622791	0,827601	1
-0,54239	0,976764	0,6308	0,838244	1
-0,50708	0,941454	0,644147	0,85598	1
-0,42374	0,858114	0,675648	0,89784	1
-0,32346	0,757834	0,713552	0,948209	1
-0,22035	0,654724	0,752526	1	1
2,975589	2,541215	0,039466	0,052444	0
3,08	2,645626	0	0	0

Сходство между двумя распределениями ЭЗР и ТЗР измеряется при помощи коэффициентов асимметрии. Вычисленный коэффициент схождения (1)

$$K_c = 1 - \frac{|sk(\gamma) - sk(y)|}{|sk(y)|} = 1 - \frac{|-1,36 + 0,76|}{|-0,76|} = 0,21 \quad (1)$$

- меньше 0,75. Условие принципа схождения не выполняется, в связи с этим отвергается предпосылка о репрезентативности выборки отходов в отношении однородности невидимой генеральной совокупности. Таким образом, приходим к выводу, что выборка анализируемых отходов отжига ленты стекла не стабильная, что означает отклонение ее от нормального закона распределения вероятностей.

Для выявления закона распределения отходов строим гистограмму (рисунок 1). Плотность распределения экспериментальных данных удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным законом:

$$f(\alpha, y) = 1,7 \exp(-1,7y)$$

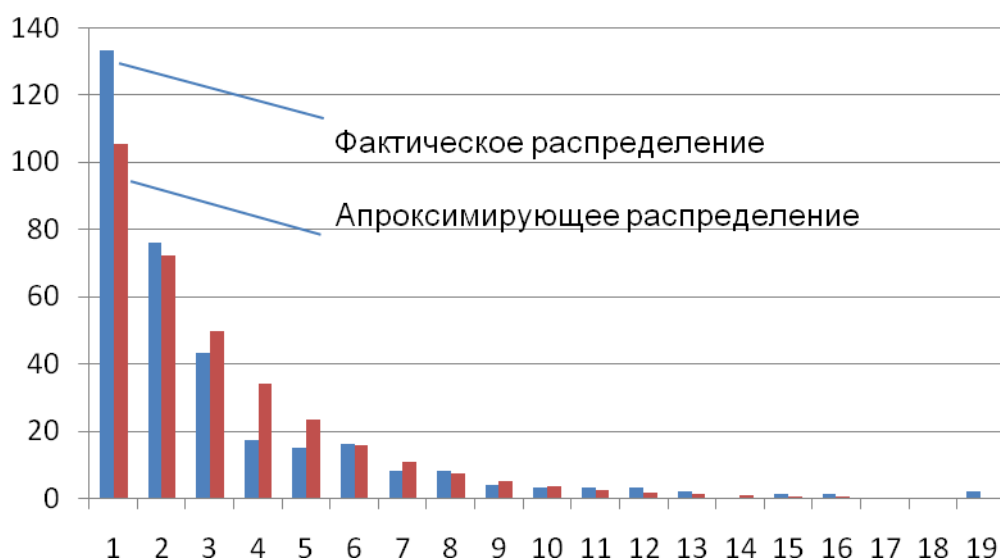


Рис. 1. Гистограмма распределения отходов отжига стекла

Параметры закона распределения: математическое ожидание отходов равно $m_y=0,53\%$, дисперсия $D_y=0,33 (\%)^2$. Знание плотности распределения позволяет оценить диапазон изменения отходов отжига в процессе производства. Так, с высокой вероятностью $P=99,73\%$ можно утверждать, что отходы в процессе отжига будут находиться в интервале от 0 до 2,4%.

Для анализа возможностей процесса необходимо по статистическим данным установить степень влияния факторов на отходы. Ранее были определены факторы, влияющие на величину остаточных напряжений в стекле после отжига [2]. Используя эту информацию, строим линейную регрессионную модель отходов стекла (2):

$$y = -29,12 + 0,063 x_1 - 188,64 x_2 + 3,13 x_3 + 1,28 x_4 - 0,044 x_5 - 0,073 x_6 - 0,098 x_7 + 0,036 x_8 - 0,01 x_9 + 3,15 x_{10}, \quad (2)$$

где x_1 - отбортовка ленты стекла, %;

x_2 - суточное изменение плотности вырабатываемого стекла, г/см³; x_3 - весовое содержание Na₂O в составе шихты, %;

x_4 - весовое содержание CaO в составе шихты, %;

x_5 - температура ленты стекла на выходе флоат-ванны, °C;

x_6 - толщина ленты стекла, мм;

x_7 - оптические искажения стекла в отраженном свете, растр 3-й долянки, мм;

x_8 - температура в зоне А печи отжига, °C;

x_9 - температура в зоне С печи отжига, °C;

x_{10} - наклон температурной кривой вдоль туннели печи отжига, °C/м.

Коэффициент детерминации модели невысокий, равен 38,1%, статистически значим с уровнем значимости 0,05. Остаточная дисперсия погрешности модели равна 0,24(%)². Анализ коэффициентов модели позволяет оценить влияние факторов на величину отходов отжига стекла. Результаты вычислений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние факторов на величину отходов процесса отжига

Оценки	Факторные переменные									
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
Коэффициент вариации, %	27	179	0,4	0,66	0,93	23,6	63,9	0,58	5,1	3,4
Коэффициент эластичности	1,26	- 0,11	113,9	31,4	- 74,5	- 0,73	-0,52	52,7	- 11,67	30,8
Коэффициент β	0,2	- 0,11	0,27	0,12	- 0,41	-0,1	-0,2	0,18	-0,35	0,62
Коэффициент Δ	0,12	0,01	0,02	0,01	0,3	0,03	0,015	0,08	0,011	0,28

Коэффициент вариации отражает колеблемость переменных анализируемой выборки относительно средних значений. Он позволяет судить о стабильности анализируемого процесса выработки листового стекла. Наибольшую вариацию имеют суточное изменение плотности вырабатываемого стекла x_2 , оптические искажения стекла в отраженном свете, измеренные в 3-й долянке x_7 и толщина вырабатываемой ленты стекла x_6 , определяемая планом выработки.

Коэффициент эластичности отражает изменение среднего значения отходов в процентах при изменении на 1% среднего значения факторной переменной. Он позволяет выделить факторы, наиболее сильно влияющие на отходы отжига. Такими факторами являются x_3 - весовое содержание в % Na_2O в составе шихты, x_5 - температура ленты стекла на выходе флоат-ванны, x_8 - температура в зоне А печи отжига, x_4 - весовое содержание в % CaO в составе шихты, x_{10} - наклон температурной кривой вдоль туннели печи отжига. Управляющими воздействиями, среди влияющих факторов, являются x_5 - температура ленты стекла на выходе флоат-ванны, x_8 - температура в зоне А печи отжига, x_{10} - наклон температурной кривой вдоль туннели печи отжига. Варьируя средние значения этих переменных можно воздействовать на уменьшение отходов стекла в процессе отжига.

Процесс отжига характеризуется значительной колеблемостью отходов ленты стекла, колеблемость вызывается нестабильностью значений факторных переменных. Коэффициенты β и Δ отражают влияние нестабильности факторов на вариацию отходов. Так, ко-

эффицент β_i характеризует долю среднеквадратичного отклонения отходов, вызываемую изменением факторной переменной x_i на величину своего среднеквадратичного отклонения при стабильности остальных переменных. Коэффициент Δ_i характеризует долю среднеквадратичного отклонения отходов, вызываемую изменением факторной переменной x_i с учетом нестабильности всех факторных переменных. Знание коэффициентов β и Δ позволяет выделить те факторные переменные, вариация которых оказывает наибольшее влияние на колеблемость отходов отжига. Такими факторными переменными являются температурный режим отжига: x_5 - температура ленты стекла на выходе флоат-ванны, x_{10} - наклон температурной кривой вдоль туннели печи отжига. Стабилизация режима отжига позволит уменьшить колеблемость отходов.

Моделирование процесса отжига с использованием данных мониторинга позволило установить степень влияния факторов на отходы и подтвердило возможность уменьшения отходов на действующем производстве коррекцией температурного режима печи отжига.

Литература

1. Солинов Ф.Г. Производство листового стекла / Ф.Г. Солинов. - М.: Стройиздат, 1976. - 288 с.
2. Автоматизация производства листового стекла: учебное пособие/ Р.И. Макаров, Е.Р. Хорошева, С.А. Лукашин . – М.: Изд-во АСВ, 2002.-192 с.
3. Молодкин А.В. Анализ и управление производством листового стекла. Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.13.01/ Молодкин Алексей Владимирович. – Бор, 2005.-19 с.
4. Щукин М.В. Исследование и разработка управления производством листового стекла с учетом экологических аспектов. Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.13.01/ Щукин Михаил Владимирович. – Бор, 2007.- 19 с.
5. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017- 2005 Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001.
6. Швырков В.В. Тайна традиционной статистики запада / В.В. Швырков. - М.: Финансы и статистика, 1998.-144 с.

ТЕЛЕФОН ДОМАШНИЙ 4922-53-55-87

MAKAROV.RUSLAN@GMAIL.COM