

УДК 678.067.5

*М.И. Вавилова¹, А.О. Курносов¹, Д.А. Мельников¹***СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ
ВЫХОДНОГО КОНТРОЛЯ ПРЕПРЕГА СТЕКЛОПЛАСТИКА
ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-10-10

Рассмотрено применение статистических методов контроля для оценки стабильности процесса производства. Описаны основные принципы и порядок построения контрольных карт Шухарта для управления процессом производства. На примере процесса производства препрега стеклопластика марки ВПС-33 проведена статистическая обработка результатов выходного контроля по показателям массовой доли летучих продуктов и содержания связующего. Проведен анализ контрольных карт Шухарта, а также оценка управляемости технологического процесса производства препрега стеклопластика.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, препрег стеклопластика, статистическая обработка результатов, метод контрольных карт, контрольные карты Шухарта.

The statistical method of control for assessment stability the process of manufactured is considered. The basics principles and series of creation the control Shukhart's card for process operation of manufactured are described. The statistical processing results of output monitoring by mass fraction of volatile products and content of resins is carried out on example the process of production fiberglass VPS-33. The analysis of control Shukhart's card and the assessment of controllability the technological process manufacturing of a fiberglass is carried out.

Keywords: polymer composite materials, fibreglass prepreg, statistical processing of results, method of control cards, control cards of Shukhart.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиакосмической промышленности стало тенденцией в мировом авиастроении, наиболее интенсивно в настоящее время ведутся разработки и исследования в области армирующих компонентов, связующих и технологий их переработки в ПКМ. Полимерные композиционные материалы состоят из двух основных компонентов: непрерывной фазы – матрицы (связующего) и армирующего наполнителя. Разработкой и исследованием ПКМ на основе стеклянных наполнителей для авиационной промышленности занимаются как в России, так и в ряде зарубежных стран [1, 2]. Развитие высоких технологий требует создания принципиально новых изделий из полимерных и конструкционных материалов, обладающих кроме высоких эксплуатационных и технологических характеристик способностью сохранять свои свойства при воздействии различных деструктивных факторов. С расширением области применения ПКМ увеличивается не только спрос на них и их ассортимент, но и возрастают качественные требования, предъявляемые как к готовой продукции, так и к полуфабрикатам, используемым на предварительной стадии получения изделий. Именно в

авиации впервые в отечественной практике была создана система управления качеством авиационных материалов: от их разработки, опытного и серийного производства до эксплуатации [3, 4].

Традиционный подход к производству вне зависимости от вида продукции – это изготовление и контроль качества для проверки готовой продукции, а также отбраковка изделий, не соответствующих установленным требованиям. Такой подход необходим, однако приводит к потерям и не экономичен, поскольку построен на проверке тогда, когда бракованная продукция уже создана. Более эффективна стратегия предупреждения потерь, позволяющая избежать производства непригодной продукции. Такая стратегия предполагает сбор информации о самих процессах, ее анализ и эффективные действия по отношению к процессам, а не к продукции.

Применение статистических методов контроля позволяет не только выявить нарушения, но и поддерживать процесс в стабильном состоянии и, таким образом, обеспечивать повторяемость его результатов. С использованием инструментов статистического управления процессами можно своевременно проконтролировать появление значимых вариаций и свести к минимуму вероятность их появления, что в итоге приведет к снижению уровня дефектов и ошибок [5–7].

Одним из основных инструментов статистических методов контроля качества являются контрольные карты. Контрольная карта – это графическое средство с использованием статистических подходов, важность которых для управления производственными процессами впервые показана У. Шухартом в 1924 г. Теория контрольных карт различает два вида изменчивости.

Первый вид – изменчивость из-за «случайных (обычных) причин», обусловленная бесчисленным набором разнообразных причин, присутствующих постоянно, которые нелегко или невозможно выявить. Каждая из таких причин составляет очень малую долю общей изменчивости, и ни одна из них не значима сама по себе. Тем не менее сумма всех этих причин измерима и предполагается, что она внутренне присуща процессу.

Второй вид – реальные перемены в процессе. Они могут быть следствием некоторых определяемых причин, не присущих процессу внутренне, и могут быть устранены. Эти выявляемые причины рассматриваются как «неслучайные» или «особые» причины изменения. К ним могут быть отнесены поломка инструмента, производственного или контрольного оборудования, недостаточная однородность материала и квалификация персонала, невыполнение процедур и т. д.

Цель контрольных карт – обнаружить неестественные изменения в данных из повторяющихся процессов и дать критерии для обнаружения отсутствия статистической управляемости. Процесс находится в статистически управляемом состоянии, если изменчивость вызвана только случайными причинами. При определении этого приемлемого уровня изменчивости любое отклонение от него считают результатом действия особых причин, которые следует выявить, исключить или ослабить.

Задача статистического управления процессами – обеспечение и поддержание процессов на приемлемом и стабильном уровне с гарантией соответствия продукции и услуг установленным требованиям. Метод контрольных карт помогает определить, действительно ли процесс достиг статистически управляемого состояния на правильно заданном уровне или остается в этом состоянии, а затем поддерживать управление и высокую степень однородности важнейших характеристик продукции или услуги посредством непрерывной записи информации о качестве продукции в процессе производства. Использование контрольных карт и их тщательный анализ ведут к лучшему пониманию и совершенствованию процессов [8].

Целью данной работы является статистический анализ результатов выходного контроля препрега стеклопластика с построением контрольных карт Шухарта.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9].

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрали технологический процесс производства препрега стеклопластика марки ВПС-33, поставка и оценка качества которого проводятся в соответствии с ТУ1-595-10-846–2015. Изготовление препрега стеклопластика ВПС-33 осуществляется в соответствии с утвержденной технологической документацией ТИ1.595-25-357–2011 «Изготовление стекло-, органо-, углепрепрегов на установке УПСТ-1000М» [10].

Для оценки закономерностей и стабильности процесса производства препрега стеклопластика ВПС-33, проведен статистический анализ показателей выходного контроля. В качестве контролируемого параметра производства препрега стеклопластика ВПС-33 выбран показатель массовой доли летучих продуктов и связующего в препреге стеклопластика.

Порядок построения контрольных карт рассмотрим на примере построения карты средних арифметических значений и их размахов. Это двойная карта, при построении которой в качестве характеристик показателя качества принимаются среднее арифметическое значение этого показателя (анализ уровня настройки процесса) и его размах (анализ рассеяния значений показателя качества).

При построении контрольных карт используются мгновенные выборки, в которые входят экземпляры продукции, произведенные последними к моменту отбора. Основное требование к мгновенной выборке заключается в том, что изменения внутри нее должны обуславливаться только общими (случайными) причинами. Поэтому условия, в которых проводились измерения, должны быть неизменными – например, обработка заготовок из одной партии, при неизменной наладке оборудования, под управлением одного наладчика, с использованием одного инструмента. Если это условие не выполняется, контрольная карта не сможет эффективно отличать особые причины изменчивости, которые проявляются в вариациях между выборками.

Объем выборки n , как правило, варьируется от 2 до 25 и определяется техническими (однородность и возможность извлечения выборки) и экономическими соображениями. При больших затратах на измерение, например в случае разрушающего контроля, объем выборки берется минимальным. Рекомендуемый объем выборки – обычно 4–5 измерений. Это связано с тем, что распределение средних арифметических значений при таком объеме выборки начинает подчиняться нормальному или близкому к нему распределению, даже если распределение самого контролируемого показателя качества отличается от нормального.

Конкретных численных рекомендаций по определению периодичности взятия выборок не существует, да и не может существовать, поскольку процессы могут быть самыми разнообразными и отличаться длительностью реализации, скоростью изменения во времени показателей качества, затратами на измерение и т. п. В качестве факторов, влияющих на периодичность контроля, можно назвать:

– реальную возможность взятия выборок через определенный период времени – например, измерение таких показателей, как твердость заготовки или толщина покрытия невозможно провести раньше, чем закончатся процессы термической обработки или нанесения покрытия;

- стабильность процесса – период между выборками должен быть существенно меньше периода времени между изменениями в процессе;
- потери от выпуска несоответствующей продукции, если происходят изменения процесса, не обнаруживаемые до конца периода времени между выборками;
- затраты на контроль.

При первоначальном обследовании, выборки рекомендуется брать чаще. После построения контрольных карт, на стадии текущего контроля процесса, интервал между выборками может быть откорректирован до разумной величины [11, 12].

Для выявления свойств процесса рекомендуется использовать не менее 20 выборок, содержащих в совокупности 100 или более значений. Например, если объем выборки составляет четыре измерения, то число выборок должно быть не менее 25, если объем выборки включает пять измерений, то достаточно 20 выборок.

В данной работе для исследований представлены 9 выборок, соответствующие девяти партиям препрега стеклопластика ВПС-33, изготовленного в период с марта 2015 г. по июнь 2017 г. В соответствии с рекомендациями объем выборки должен быть не менее 12 измерений, в данной работе произведено более 12 измерений по каждой из девяти партий изготовленного препрега. По нормативной документации (ТУ1-595-10-846–2015) приемочный контроль препрега по показателям массовой доли летучих продуктов и связующего осуществляется путем проведения четырех измерений с каждого рулона, количество которых в выбранных девяти партиях составляет от 3 до 28.

Из множества разнообразных контрольных карт Шухарта выбрали карты средних значений (\bar{X} -карта) и их размахов (R -карта), так как они являются наиболее подходящими для данного объема выборки. При обработке данных применяли ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015 «Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта» [13].

Результаты

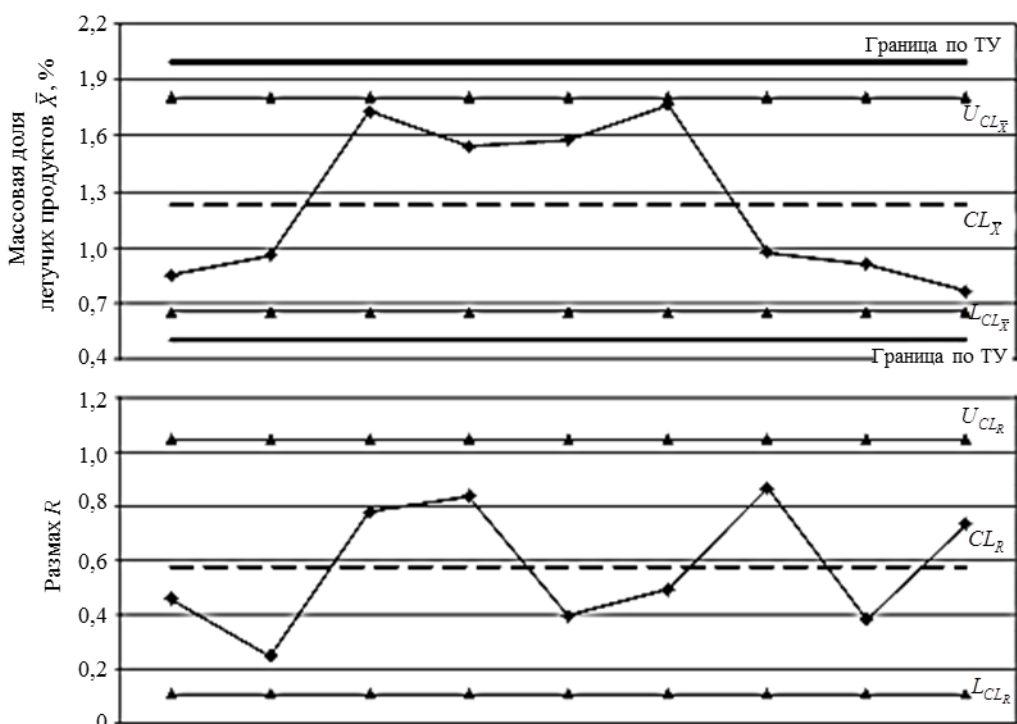
Контрольные карты представляют собой графики, показывающие динамику поведения процесса по его характеристикам настройки и точности. Статистическими характеристиками процесса могут быть, например: среднее арифметическое значение анализируемого показателя качества, стандартное отклонение, число дефектов в выборке и др. [14, 15]. Так, на рис. 1 представлена контрольная карта средних арифметических значений и их размахов по показателю массовой доли летучих продуктов. На контрольные карты наносятся верхняя и нижняя контрольные границы и среднее значение контролируемого параметра. Получаемая по выборкам информация о текущем состоянии процесса сравнивается с контрольными границами, представляющими пределы собственной изменчивости процесса.

Контрольные границы показывают, в каких пределах средние значения и их размахи выборок могут изменяться, если присутствуют только общие (случайные) причины изменчивости. Для определения контрольных границ необходимо вычислить средний размах \bar{R} и среднее значение $\bar{\bar{X}}$ для процесса (средние линии на картах обозначаются как CL – center line):

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k}; \quad \bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{X}_i}{k}, \quad (1)$$

где k – число выборок.

В данном примере $\bar{\bar{X}}=1,23$; $\bar{R}=0,58$. Контрольные границы для средних арифметических значений (\bar{X}) и их размахов (R) определяются следующим образом.



| Количество измерений | Значение показателя* | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| | 02.2015 (1) | 06.2015 (2) | 08.2015 (3) | 05.2016 (4) | 06.2016 (5) | 07.2016 (6) | 02.2017 (7) | 05.2017 (8) | 06.2017 (9) | |
| 1 | 0,82 | 0,87 | 1,40 | 1,27 | 1,71 | 1,76 | 0,70 | 0,90 | 1,00 | |
| 2 | 0,82 | 0,88 | 1,42 | 1,27 | 1,81 | 1,74 | 0,71 | 0,84 | 1,05 | |
| 3 | 0,98 | 0,99 | 1,47 | 1,48 | 1,41 | 1,87 | 0,55 | 0,91 | 0,97 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 12 | 0,87 | 1,10 | 1,72 | 1,31 | 1,58 | 1,87 | 1,16 | 0,80 | 0,78 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | - | ... | ... | ... | ... | |
| 16 | 0,91 | 0,94 | 1,85 | 1,48 | - | 1,86 | 1,05 | 0,93 | 0,81 | |
| ... | ... | - | ... | ... | - | ... | ... | ... | ... | |
| 30 | 0,82 | - | 1,86 | 1,61 | - | 1,75 | 0,98 | 0,93 | 0,65 | |
| ... | - | - | ... | ... | - | ... | ... | ... | ... | |
| 39 | - | - | 1,20 | 1,89 | - | 1,75 | 0,98 | 0,96 | 0,79 | |
| 40 | - | - | - | 1,61 | - | 1,76 | 0,98 | 0,98 | 0,76 | |
| ... | - | - | - | ... | - | ... | - | ... | ... | |
| 42 | - | - | - | 1,78 | - | 1,76 | - | 1,00 | 0,67 | |
| ... | - | - | - | - | - | ... | - | ... | ... | |
| 48 | - | - | - | - | - | 1,75 | - | 0,91 | 0,72 | |
| ... | - | - | - | - | - | - | - | ... | ... | |
| 80 | - | - | - | - | - | - | - | 0,81 | 0,59 | |
| ... | - | - | - | - | - | - | - | - | ... | |
| 112 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,04 | |
| Сумма | 25,54 | 15,27 | 67,28 | 64,38 | 18,93 | 84,87 | 38,88 | 72,61 | 85,31 | |
| \bar{X}^{**} | 0,85 | 0,95 | 1,73 | 1,53 | 1,58 | 1,77 | 0,97 | 0,91 | 0,76 | |
| Размах R | 0,46 | 0,25 | 0,78 | 0,84 | 0,40 | 0,49 | 0,87 | 0,38 | 0,73 | |

* Месяц, год (условный номер партии).

** Среднее значение.

Рис. 1. Контрольная карта средних арифметических значений и их размахов по показателю массовой доли летучих продуктов

Стандартное отклонение контролируемого параметра σ и стандартное отклонение выборочных средних значений $\sigma_{\bar{X}}$ связаны зависимостью:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где n – объем выборки.

Принято, что разброс значений статистических характеристик или контрольных величин процесса (в данном случае среднего значения и его размаха) характеризуется интервалом ± 3 стандартных отклонения соответствующей характеристики. В этот интервал попадают 99,73% всех значений контролируемого параметра в случае его нормального распределения. При этом при нормальном ходе процесса подавляющее большинство значений среднего арифметического будут лежать в границах, отстоящих на расстояние $3\sigma_{\bar{X}}$ от среднего значения $CL_{\bar{X}}$.

Верхняя контрольная граница U_{CL} (upper control limit) определяется как:

$$U_{CL_{\bar{X}}} = \bar{\bar{X}} + 3\sigma_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Нижняя контрольная граница L_{CL} (lower control limit) определяется как:

$$L_{CL_{\bar{X}}} = \bar{\bar{X}} - 3\sigma_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

Оценить значение неизвестного стандартного отклонения σ можно через размах:

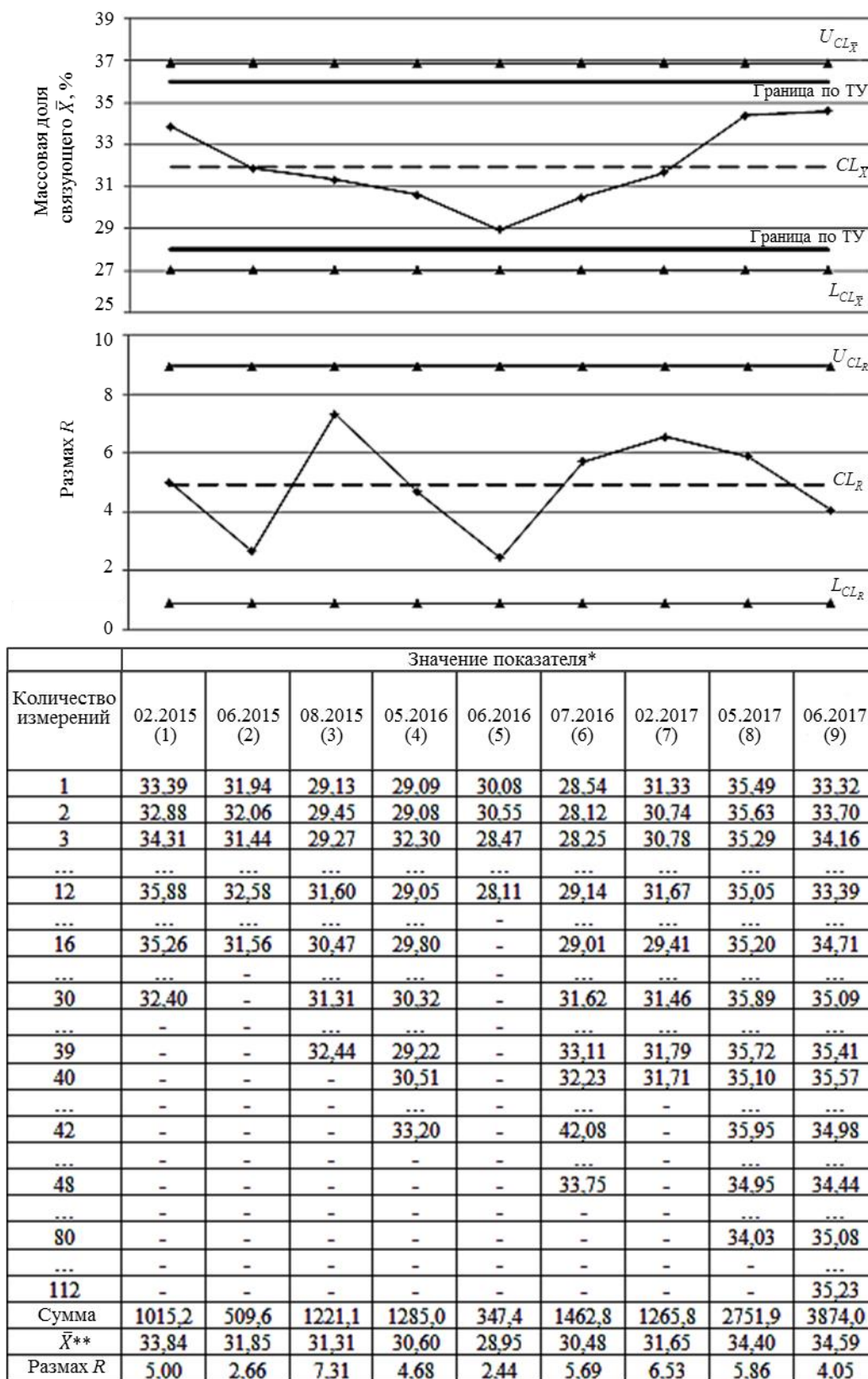
$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}, \quad \text{тогда} \quad U_{CL_{\bar{X}}}, L_{CL_{\bar{X}}} = \bar{\bar{X}} \pm \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R} = \bar{\bar{X}} \pm A_2 \bar{R}, \quad (5)$$

где d_2, A_2 – коэффициенты, зависящие от объема выборки. Значения коэффициентов, используемых для построения контрольных карт, приведены в ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015.

Аналогичным образом строим контрольную карту средних арифметических значений и их размахов по показателю массовой доли связующего в препреге с нанесением верхней и нижней контрольных границ и среднего значения контролируемого параметра (рис. 2).

Ранее рассмотрены так называемые трехсигмовые границы. При этом 0,27% точек (средних значений) могут выходить за пределы этих границ. Эта величина получила название альфа-риск ($\alpha=0,0027$), т. е. риск совершить ошибку первого рода – ошибочно считать, что произошел сдвиг процесса.

Следует особо отметить, что зависимости между контрольными границами на контрольных картах Шухарта и границами поля допуска показателя качества не существует. Контрольные карты строятся по статистическим характеристикам процесса. Если эти характеристики получаются путем обработки результатов измерения показателя (например, \bar{X} -карта при $n > 1$), то вообще недопустимо на контрольных картах изображать границы поля допуска. Эти границы можно наносить лишь на контрольные карты индивидуальных значений контролируемого параметра. Контрольные границы служат для контроля процесса, а границы поля допуска – для контроля самого показателя качества. Таким образом, с помощью контрольных карт Шухарта можно анализировать состояние процесса «относительно самого себя».



* Месяц, год (условный номер партии).

** Среднее значение.

Рис. 2. Контрольная карта средних арифметических значений и их размахов по показателю массовой доли связующего в препреге

Обсуждение и заключения

Как отмечалось ранее, контрольные карты позволяют судить о том, находится ли процесс в управляемом состоянии, и находить признаки наличия особых причин изменчивости. Анализ контрольных карт осуществляется по характеру расположения на ней контрольных точек.

На наличие особых причин указывают следующие случаи (рис. 3).

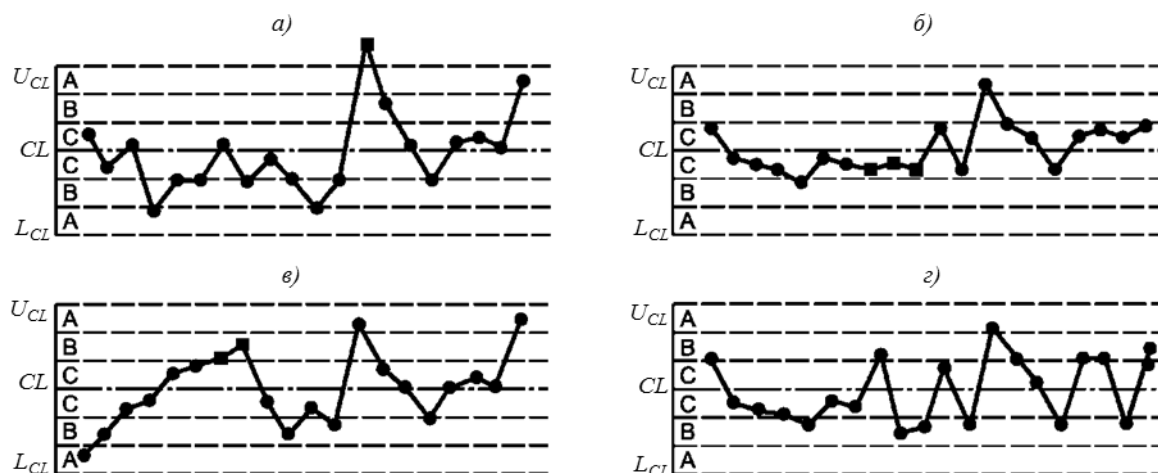


Рис. 3. Примеры типовых структур, вызванных особыми причинами, по критериям 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (з) – см. текст

Критерий 1. Выход точки за контрольные границы. Поскольку при нормальном распределении в пределах $\pm 3\sigma$ располагается подавляющее большинство значений статистических характеристик (99,73%), то при отсутствии особых причин (т. е. для статистически устойчивого процесса) практически все точки на карте будут располагаться между контрольными границами. Если же в процессе присутствуют особые причины, приводящие к изменению процесса (смещению уровня настройки или увеличению разброса значений показателя качества), то контрольная карта может указать на это выходом точек за контрольные границы.

Критерий 2. Серии из семи точек по одну сторону от средней линии. О рассогласовании процесса свидетельствуют семь точек подряд по одну сторону от средней линии. Можно также предположить, что на процесс в это время действовала особая дестабилизирующая причина, которая привела к смещению уровня настройки процесса. Следует отметить, что если на карте размахов значений появится серия точек ниже средней линии, то это будет свидетельствовать об улучшении процесса (уменьшении разброса значений показателя качества).

Критерий 3. Серии из семи последовательно убывающих или возрастающих уровней точек (тренды) относительно средней линии. Тренд точек предполагает изменение условий протекания процесса. При этом некоторые тренды могут быть благоприятными (например, уменьшение размаха значений) и должны изучаться для усовершенствования процесса.

Критерий 4. Другие совокупности данных (циклы или другие закономерности). Могут появляться и другие совокупности данных, которые будут свидетельствовать о воздействии на процесс особых причин.

По результатам оценки стабильности процесса могут быть сделаны следующие выводы:

- процесс стабилен по разбросу значений и уровню настройки (состояние А);
- процесс стабилен по разбросу значений, но нестабилен по уровню настройки (состояние Б);
- процесс нестабилен и по разбросу значений, и по уровню настройки (состояние В).

Исходя из полученных \bar{X} -карт можно сделать вывод, что процесс производства препрега стеклопластика ВПС-33 по исследуемым показателям качества, по разбросу значений и по положению среднего арифметического значения находится в статистически управляемом состоянии (т. е. в состоянии А), поскольку значения \bar{X} и R лежат внутри границ U_{CL} и L_{CL} .

По результатам предварительного анализа стабильности процесса с использованием контрольных карт определяется собственная или полная изменчивость процесса.

Собственная изменчивость процесса – изменчивость, свойственная процессу или полученной с его помощью продукции, когда процесс функционирует в состоянии статистической управляемости. Собственная изменчивость частного процесса (один станок или производственная линия, одна бригада рабочих и одна поставка материала) обычно меньше, чем общего процесса (много станков или линий, бригад и партий материала). Собственная изменчивость определяется для состояния процесса А.

Собственная изменчивость процесса оценивается стандартным отклонением $\bar{\sigma}$, которое определяется по формуле (5). Эта изменчивость проявляется в виде разброса значений внутри мгновенных выборок, т. е. когда по предположению процесс стабилен. Она характеризует наименьший уровень несоответствий, который может обеспечить процесс. Следует периодически пересматривать величину собственной изменчивости процесса, при этом естественные колебания $\bar{\sigma}$ в пределах $\pm 10\%$ возможны, если стандартное отклонение оценено по выборке объемом ~ 100 измерений.

Полная изменчивость процесса – собственная изменчивость процесса с учетом вариации из-за влияния меняющихся факторов (особых причин). Например, ошибки оператора, неправильные регулировки или износ оборудования, применение несоответствующих материалов, систематическая погрешность или другие неслучайные причины. Полная изменчивость определяется для состояний процесса Б и В.

Индексы, характеризующие возможности процессов, выбирают в зависимости от результатов оценки стабильности процесса. Для статистически управляемого процесса (состояние А) используют следующие индексы воспроизводимости:

$$C_p = \frac{T_B - T_H}{6\bar{\sigma}}; \quad C_{pk} = \min\left(\frac{T_B - \bar{X}}{3\bar{\sigma}}, \frac{\bar{X} - T_H}{3\bar{\sigma}}\right), \quad (6, 7)$$

где T_B и T_H – соответственно наибольшее и наименьшее предельные значения показателя качества.

Пользуясь вышеприведенными формулами и полученными данными, для каждой характеристики качества определяем индексы возможности процесса по показателю массовой доли:

- летучих продуктов $C_p=1,29$; $C_{pk}=1,25$;
- связующего в препреге $C_p=1,11$; $C_{pk}=1,09$.

Индекс C_p характеризует соотношение величины поля допуска и разброса значений показателя качества, т. е. потенциальную возможность процесса. Этот индекс определяет минимально возможный уровень несоответствий, если уровень настройки процесса будет стабилен, и будет соответствовать середине поля допуска. Он нечувствителен к смещению уровня настройки процесса. Индекс C_{pk} характеризует уровень центрирования процесса, т. е. фактические возможности процесса удовлетворять установленным требованиям. Его значение зависит от взаимного расположения границ поля

допуска и уровня настройки процесса. Индекс C_{pk} принимает максимальное значение, равное значению индекса C_p , когда центр распределения (уровень настройки) процесса совпадает с серединой поля допуска и равен нулю, т. е. когда центр распределения совпадает с одной из границ поля допуска.

При значениях $C_{pk} < 1$ процесс производства считается нестабильным и требует корректировки. При значениях $1,33 > C_{pk} > 1$ процесс производства считается стабильным, контролируемым, но требует дополнительного анализа и возможной корректировки. При значениях $C_{pk} > 1,33$ процесс производства является стабильным, контролируемым и управляемым.

На основании все проведенных исследований и расчетов можно сделать вывод, о том, что технологический процесс производства препрега стеклопластика ВПС-33 по ТИ1.595-25-357–2011 является стабильным по параметрам массовой доли летучих продуктов и связующего.

При анализе полученных структур на контрольных картах не выявлено неслучайных изменений, все партии находятся в границах статистически управляемого состояния процесса. Проведенный расчет индекса воспроизводимости процесса C_{pk} по показателям массовой доли летучих продуктов и связующего подтвердил фактическую возможность процесса удовлетворять установленным ТУ требованиям. Для более подробного изучения технологического процесса производства препрега стеклопластика марки ВПС-33 необходимо продолжить статистическую обработку данных выходного контроля для увеличения объема выборки ($n > 10$) и построения карт выборочных стандартных отклонений (s) с целью улучшения технологического процесса и, как следствие, сужения допустимых границ разброса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников Д.А., Ильичев А.В., Вавилова М.И. Сравнение стандартов для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №3 (51). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-6-6.
2. Мелёхина М.И., Кавун Н.С., Ракитина В.П. Эпоксидные стеклопластики с улучшенной влаго- и водостойкостью // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 29–31.
3. Kurnosov A.O., Melnikov D.A. The characteristics of fiberglass based on large deformation molten binders under conditions of the impact of operational factors // Polymer Science. Series D. 2016. Vol. 9. No. 2. P. 248–250.
4. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
7. Сундарон Э.М. Статистические методы контроля и управления качеством: учеб. пособие. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2002. 54 с.
8. Царев Ю.В., Тростин А.Н. Статистические методы управления качеством. Контрольные карты: учеб.-метод. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. 250 с.
9. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

10. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
11. Быков Ю.М., Быков С.Ю. SPC. Статистическое управление процессами. URL: <http://www.tem-consulting.ru> (дата обращения: 26.06.2017).
12. *Статистические методы в управлении качеством продукции: учеб. пособие / под ред. И.П. Данилова, А.А. Насырова-Антонова, В.Л. Семенова*. Казань: Познание, 2007. 240 с.
13. ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. М., 2015. 46 с.
14. Седлер М.И., Седлер М.Х. Статистические методы в управлении качеством. Учебное пособие. СПб.: СПбГПУ, 2013. 156 с.
15. Попов Е.А., Успенская Г.И. Статистическая обработка результатов измерений в лабораторном практикуме. Н. Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2015. 15 с.